



Agentschap NL
Ministerie van Economische Zaken

Handboek Risicozonering Windturbines

Eindversie

3^e, geactualiseerde versie mei 2013

opgesteld door DNV KEMA

C.J. Faasen

P.A.L. Franck

A.M.H.W. Taris

in opdracht van Agentschap NL

INHOUDSOPGAVE HANDBOEK

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | INLEIDING | 5 |
| 1.1 | Windenergie en veiligheidsrisico's | 5 |
| 1.2 | Actualisatie Handboek 2013 | 5 |
| 1.3 | Reikwijdte van dit Handboek | 6 |
| 2. | VEILIGHEIDSEISEN VOOR WINDTURBINES | 9 |
| 2.1 | Wetgeving | 9 |
| 2.2 | Toetscriteria | 11 |
| 3. | GEBRUIK VAN HET HANDBOEK | 15 |
| 3.1 | Welke risico's vormen windturbines voor hun omgeving? | 16 |
| 3.2 | Welke personen en objecten lopen risico? | 17 |
| 3.3 | Op welke manier worden trefkansen voor personen en objecten bepaald? | 20 |
| 3.4 | Aan welke criteria moet getoetst worden? | 21 |
| 4. | BEBOUWING | 25 |
| 4.1 | Afstandseis | 25 |
| 4.2 | Risicomethodiek | 25 |
| 4.3 | Risicocriteria | 26 |
| 4.4 | Rekenvoorbeeld | 27 |
| 5. | WEGEN | 28 |
| 5.1 | Afstandseis | 28 |
| 5.2 | Risicomethodiek | 28 |
| 5.3 | Risicocriteria | 29 |
| 5.4 | Rekenvoorbeeld | 31 |
| 5.5 | Contact | 31 |
| 6. | WATERWEGEN | 32 |
| 6.1 | Afstandseis | 32 |
| 6.2 | Risicomethodiek | 32 |
| 6.3 | Risicocriteria | 33 |
| 6.4 | Rekenvoorbeeld | 35 |
| 6.5 | Contact | 35 |
| 7. | SPOORWEGEN | 36 |
| 7.1 | Afstandseis | 36 |
| 7.2 | Risicomethodiek | 37 |
| 7.3 | Risicocriteria | 37 |
| 7.4 | Contact | 38 |
| 8. | INDUSTRIE | 39 |
| 8.1 | Risicomethodiek | 39 |
| 8.2 | Risicocriteria | 40 |
| 8.3 | Rekenvoorbeeld | 41 |
| 9. | BUISLEIDINGEN | 42 |
| 9.1 | Afstandseis | 42 |
| 9.2 | Rekenmethodiek | 42 |
| 9.3 | Risicocriteria en toetsing | 43 |
| 9.4 | Rekenvoorbeeld | 44 |
| 9.5 | Contact | 44 |

| | |
|---|------|
| 10. HOOGSPANNINGS INFRASTRUCTUUR | 45 |
| 10.1 Afstandseis | 45 |
| 10.2 Risicoanalyse en -criteria | 46 |
| 10.3 Contact | 46 |
| 12. DIJKLICHAMEN EN WATERKERINGEN | 47 |
| 12.1 Afstandseis | 47 |
| 12.2 Risicocriteria en Toetsing | 47 |
| 12.3 Contact | 48 |
| 13. BRONMAATREGELEN EN MITIGERENDE MAATREGELEN | 49 |
| 13.1 Bronmaatregelen | 49 |
| 13.2 Hogere IEC-klasse voor mast en fundering | 51 |
| 13.3 Mitigerende maatregelen | 52 |
| REFERENTIES | 54 |
| DEFINITIES EN AFKORTINGEN | 56 |
| | |
| BIJLAGE A: ONGEVALSCENARIO'S EN FAALSTATISTIEK | A-1 |
| 1 Faalscenario's | A-4 |
| 2 Faalstatistiek | A-5 |
| 2.1 Update faalstatistiek | A-5 |
| 2.2 Bladbreuk | A-13 |
| 2.3 Mastbreuk | A-14 |
| 2.4 Gondel- en/of rototafworp | A-15 |
| 2.5 Resultaat | A-16 |
| 3 Ruimtelijke Trefkansdichtheidsverdelingen | A-18 |
| 3.1 Bladafworp | A-18 |
| 3.2 Mastbreuk | A-22 |
| 3.3 Gondel- en/of rotorafworp | A-22 |
| | |
| BIJLAGE B: GENERIEKE GEGEVENS | B-1 |
| 1 Inleiding | B-2 |
| 2 Turbineparameters als functie van het nominale vermogen | B-4 |
| 3 Generieke risicocontouren | B-10 |
| 4 Conclusies | B-16 |
| | |
| BIJLAGE C: REKENMETHODIEK WERPAFSTANDEN EN TREFKANSEN | C-1 |
| Bijlage C.1: Bladbreuk | C-5 |
| 1 Inleiding | C-6 |
| 2 Werpmodellen | C-9 |
| 2.1 Ballistisch model zonder luchtkrachten | C-10 |
| 2.2 Ballistisch model met luchtkrachten | C-12 |
| 2.3 Ongevallenscenario's | C-16 |
| 3 Trefkansberekeningen | C-18 |
| 3.1 Personen (Plaatsgebonden Risico) | C-18 |
| 3.2 Wegen | C-19 |

| | | |
|---|---|------------|
| 3.3 | Ruimtelijke objecten | C-21 |
| 3.4 | Gebieden | C-28 |
| 4 | Referenties | C-29 |
| Bijlage C.2: Mastbreuk | | C-30 |
| 5 | Trefkansberekeningen | C-31 |
| 5.1 | Personen (Plaatsgebonden Risico) | C-31 |
| 5.2 | Infrastructuur | C-32 |
| 5.3 | Ruimtelijke objecten | C-34 |
| 5.4 | Gebieden | C-35 |
| Bijlage C.3: Incidenten binnen de rotordiameter | | C-36 |
| 6 | Scenario's | C-37 |
| 6.1 | Afvallen van Gondel en Rotor | C-37 |
| 6.2 | Kleine onderdelen uit de Gondel of de Rotor | C-37 |
| 6.3 | Bladfragmenten na Botsing met Toren | C-37 |
| 6.4 | IJsafwerping | C-38 |
| Bijlage C.4: Incidenten met buisleidingen en elektrische infrastructuur | | C-39 |
| 7 | Bovengrondse leidingen en hoogspanningslijnen | C-40 |
| 7.1 | Bladafworp | C-40 |
| 7.2 | Mastbreuk | C-46 |
| 7.3 | Gondel en rotorafworp | C-46 |
| 8 | Ondergrondse leidingen en kabels | C-48 |
| 8.1 | Bladafworp | C-48 |
| 8.2 | Mastbreuk | C-57 |
| 8.3 | Gondel en/of rotorafworp | C-57 |
| 8.4 | Rekenvoorbeeld ondergrondse leiding | C-59 |
| BIJLAGE D: RISICOCRITERIA | | D-1 |
| 1 | Inleiding | D-3 |
| 1.1 | Directe Risico's | D-4 |
| 1.2 | Indirecte Risico's | D-5 |
| 2 | Criteria externe veiligheid inrichtingen | D-8 |
| 2.1 | Inleiding | D-8 |
| 2.2 | Plaatsgebonden risico (PR) en Groepsrisico (GR) | D-9 |
| 2.3 | Interpretatie voor Windturbines | D-12 |
| 2.4 | Toetsingscriteria voor Windturbines | D-12 |
| 3 | Risiconormering volgens Prorail en Rijkswaterstaat | D-15 |
| 3.1 | Aanleiding | D-15 |
| 3.2 | Veiligheidsfilosofie en Criteria | D-16 |
| 3.3 | Beleidsregel voor het Plaatsen van Windturbines op, in of over Rijkswaterstaatswerken | D-20 |
| 4 | Indirecte risico's | D-29 |
| 4.1 | Niet-categoriale inrichtingen | D-30 |
| 4.2 | Categoriale Inrichtingen | D-31 |
| 4.3 | Vervoer Gevaarlijke Stoffen | D-32 |
| 4.4 | Generieke Databases | D-32 |
| 5 | Referenties | D-34 |

1. INLEIDING

1.1 Windenergie en veiligheidsrisico's

Windenergie is belangrijk voor het halen van de Nederlandse doelen voor klimaat en duurzame energie. Bij de plaatsing van windturbines staat veiligheid voor de omgeving voorop. De kans dat een windturbine een veiligheidsrisico oplevert, is zeer klein (windturbines moeten immers aan strenge veiligheidseisen voldoen) maar niet uitgesloten. Mogelijke risico's rond een windturbine zijn het afbreken van de gondel, mastbreuk of het afbreken van een blad. Voordat de overheid toestemming geeft voor de bouw van een windturbine, kan ze om een kwantitatieve risicoanalyse vragen. De trend in de afgelopen jaren is dat een risicoanalyse standaard onderdeel uitmaakt van de vergunningaanvraag. Dit Handboek Risicozonering Windturbines kan worden gebruikt als een praktijkrichtlijn voor het uitvoeren van een risicoanalyse voor windturbines.

1.2 Actualisatie Handboek 2013

Voor u ligt de derde versie van het Handboek Risicozonering Windturbines (hierna: Handboek). Dit is een actualisatie van het Handboek uit 2005. Het oorspronkelijke Handboek is in 2000 opgesteld.

Het in 2000 verschenen Handboek is door ECN samengesteld in opdracht van Novem (nu: Agentschap NL) met als doel een uniforme methode te bieden voor het uitvoeren van kwantitatieve risicoanalyses en voor het toetsen van de resultaten aan acceptatiecriteria. Dit Handboek bood antwoord op de vraag van zowel projectontwikkelaars als overheden naar een algemeen geldende methode om veiligheidsrisico's van windturbines te berekenen voor diverse omgevingsaspecten waaronder bijvoorbeeld gasinfrastructuur en wegen.

In 2005 is een actualisatie van het Handboek uitgebracht. SenterNovem (nu onderdeel van Agentschap NL) heeft toen aan ECN en KEMA opdracht gegeven om het Handboek te actualiseren door verder in te gaan op turbines met grotere vermogens en het Handboek aan te vullen met rekenvoorbeelden.

Vanwege de verdere ontwikkeling van de windturbintetechnologie, aangepaste wetgeving, het feit dat rekenmodellen verouderd waren en dat diverse infrastructuur steeds vaker gebundeld of geclusterd met windturbines wordt gerealiseerd, is het wenselijk / noodzakelijk de eventuele risico's op een consistente en eenduidige wijze in kaart te brengen. Daarom heeft Agentschap NL in 2012 opdracht gegeven aan DNV KEMA om het Handboek opnieuw te actualiseren. Hierbij zijn de resultaten van het rapport: "Rekenmethodiek zonering windturbines in relatie tot gas- en elektrische infrastructuur" (2012), dat in opdracht van Gasunie en TenneT tot stand is gekomen, overgenomen. In dat rapport zijn nieuwe faalfrequenties voor windturbines afgeleid, is een aanpassing van de rekenmodellen van gasinfrastructuur doorgevoerd en zijn rekenmodellen voor hoogspanningsinfrastructuur toegevoegd.

Deze actualisatie van het Handboek bevat:

- uitbreiding van generieke gegevens met turbines met een vermogen vanaf 3 MW,
- actualisatie van de faalscenario's en faalstatistieken,
- actualisatie van de regelgeving, onder andere het Activiteitenbesluit,
- aanpassing van rekenmodellen voor gasinfrastructuur,
- uitbreiding met rekenmodellen voor hoogspanningsinfrastructuur,
- actualisatie van regelgeving en beleidsuitgangspunten van Ministeries, Rijkswaterstaat, ProRail, Gasunie en TenneT,
- verbetering van de leesbaarheid en toegankelijkheid van het Handboek.

Tijdens deze actualisatie is een aantal overheden en belanghebbende partijen via een klankbordgroep betrokken geweest:

- Ministeries: Infrastructuur & Milieu
 Rijkswaterstaat
 Economische Zaken, Landbouw en Innovatie; Agentschap NL
 Volksgezondheid, Welzijn en Sport; RIVM
- Beheerders infrastructuur: N.V. Nederlandse Gasunie
 ProRail
 TenneT TSO B.V.
- Beheerder havengebied Rotterdam: Havenbedrijf Rotterdam
- Windenergiesector: NWEA

De inhoudelijke wijzigingen hebben vooral betrekking op de hoofdtekst van het Handboek en de bijlagen A (Ongevalsscenario's en faalstatistiek), B (Generieke gegevens) en C (Rekenmethodiek werpafstanden en trefkansen). Bijlage D (Risicocriteria) is op enkele kleine correcties na ongewijzigd gebleven. Omdat de rekenmethodiek voor hoogspanningsinfrastructuur nu is opgenomen in de hoofdtekst van het Handboek en Bijlage C, is Bijlage E (Richtlijnen voor onderlinge afstanden tussen windturbines en hoogspanningslijnen) komen te vervallen.

1.3 Reikwijdte van dit Handboek

Om na te gaan of de risico's van windturbines voor de omgeving aanvaardbaar zijn, kan het bevoegd gezag vragen om een kwantitatieve risicoanalyse. Deze risicoanalyse vormt dan onderdeel van de vergunningaanvraag. Het Handboek biedt een praktijkrichtlijn om een dergelijke risicoanalyse op een eenduidige en consistente wijze te kunnen uitvoeren. Ook kunnen eigenaren van infrastructurele werken het handboek gebruiken om risico's te bepalen bij het uitbreiden van hun infrastructuur in de nabijheid van windturbines.

Advies is om bij het opstellen van ruimtelijke plannen al het Handboek te gebruiken. Het is immers vereist dat het bevoegd gezag een afweging maakt of voldaan wordt aan de geldende wet- en

regelgeving inclusief beleid en richtlijnen. De plaatsting van windturbines kan gevolgen hebben voor andere toekomstige ruimtelijke ontwikkelingen. Omgekeerd kunnen andere ruimtelijke ontwikkelingen ook gevolgen hebben voor de toekomstige vergunningverlening van windturbines. Door vroegtijdig gebruik te maken van het Handboek kan het bevoegd gezag een afweging maken over welke ruimtelijke ontwikkeling zij wenselijk acht.

De reikwijdte van het Handboek is als volgt:

- het Handboek is geen wet, maar een richtlijn de faalfrequenties en risicomethodiek zijn beschreven voor windturbines:
 - met een vermogen vanaf 1 MW,
 - met stalen mast en kunststof bladen,
 - die zijn gecertificeerd volgens IEC normen NEN-EN-IEC 61400-1 editie 3 [7] en IEC-61400-22 [8].

NB: Van windturbines met betonnen of hybride masten ontbreekt faalstatistiek. De generieke waarden van het Handboek zijn daarom van toepassing op windturbines met stalen masten.

Voor situaties die buiten de reikwijdte van dit Handboek vallen, kunnen aanpassingen aan de rekenmethodiek besproken worden met het RIVM. Het RIVM heeft hiervoor het ‘Protocol aanpassing rekenmethodieken externe veiligheid’ opgesteld [16]. Dit protocol schrijft voor hoe faalfrequenties kunnen worden afgeleid uit statistiek of via het analagon principe. Dit protocol richt zich in eerste instantie op externe veiligheid van gevaarlijke stoffen, maar kan ook op windturbines worden toegepast.

Bij een risicoanalyse moet allereerst worden bepaald wat het beïnvloedingsgebied van de windturbine is. De maximale afstand waarop een onderdeel van een windturbine bij falen terecht kan komen is de maximale werpafstanden bij overtoeren. In het Handboek zijn, met conservatieve uitgangspunten, deze maximale werpafstand bepaald. Wanneer objecten zich buiten deze afstanden bevinden, is een verdere risicoanalyse niet nodig. Wanneer objecten zich wel binnen de maximale werpafstand van de geplande windturbines bevinden, moet een kwantitatieve risicoanalyse uitgevoerd worden.

In het handboek zijn faalscenario's, faalkansen en rekenmethodes opgenomen om de risico's te analyseren. Omdat het berekenen van risico's die windturbines met zich meebrengen een ingewikkelde en tijdrovende analyse is, zijn in het Handboek generieke waarden afgeleid om de risico's voor de trefkans van personen te bepalen. Ook zijn in dit Handboek rekenmethodes opgenomen om de risico's te analyseren aan de hand van specifieke windturbinegegevens.

De risico's van windturbines worden door de vergunningverlener afgewogen tegen de normen die in het externe veiligheidsbeleid worden toegepast voor risicovolle inrichtingen [1] of tegen de normen die door de ministeries of uitvoeringsorganen worden gehanteerd [2] [11].

In de meeste gevallen is de gemeente de vergunningverlenende instantie. Daarnaast zijn ProRail en Rijkswaterstaat namens de overheid belast met de vergunningverlening binnen hun beheersgebied.

In aanvulling hierop kan de vergunningverlener de eigenaren of beheerders van infrastructurele werken (zoals Rijkswaterstaat, ProRail, Gasunie en TenneT, hierna: beheerders) om input vragen tijdens een vergunningtraject. Zij spelen een rol als de infrastructuur zich binnen het beïnvloedingsgebied van het windpark bevindt. Beheerders hebben hiervoor criteria opgesteld die in dit handboek zijn opgenomen. Deze criteria zijn geen wetgeving maar vormen een richtlijn waarbij beheerders aangeven dat zij geen onaanvaardbaar additioneel risico verwachten.

Voor de totstandkoming van dit Handboek is samengewerkt met een klankbordgroep met daarin overheden en vertegenwoordigers van de belanghebbende partijen (zie paragraaf 1.2). Dit maakt het Handboek tot een algemeen geaccepteerde methode voor het berekenen van risico's van windturbines. Over een aantal onderwerpen is geen consensus bereikt. Deze onderwerpen worden beschreven in een aparte notitie die AgentschapNL in afstemming met de klankbordgroep bij het Handboek zal uitgeven. In Tabel 3.2 zijn alle risicocriteria opgenomen met daarbij de toetsing, de naam van de betreffende beheerder en de door hem gestelde afstandseis.

Dit Handboek biedt de faalfrequenties en risicomethodiek voor windturbines met een rotoroppervlak van meer dan 40m² en met een vermogen vanaf 1 MW. Het Handboek richt zich op de risico's die ontstaan wanneer windturbines zodanig falen dat onderdelen naar beneden vallen, rotoronderdelen worden weggegooid of dat zelfs de hele turbine omvalt.

Het Handboek beperkt zich tot die risico's die ontstaan nadat de windturbines in bedrijf zijn genomen. Risico's tijdens installatie van een windturbine of tijdens het uitvoeren van onderhoudswerkzaamheden (denk hierbij aan een kraan die het verkeer hindert of een gasleiding die wordt beschadigd tijdens graafwerkzaamheden) worden in dit Handboek niet beschouwd.

Het evalueren van economische gevolgschade valt buiten de reikwijdte van het Handboek. Er bestaan geen wettelijke criteria voor het toetsen van economische schades. Het evalueren van het economisch risico zal de projectontwikkelaar van het windenergieproject moeten doen in overleg met de beheerder of eigenaar van het desbetreffende object.

In bedrijf genomen windturbines kunnen, naast mogelijke risico's voor de omgeving, ook hinder opleveren voor mens en milieu. Te denken valt aan geluidhinder, slagschaduw, visuele hinder en verstoring van straalpaden en vliegroutes. Deze aspecten van hinder maken eveneens geen onderdeel uit van een risicoanalyse en worden veelal in haalbaarheidstudies nader bekeken en onderzocht.

2. VEILIGHEIDSEISEN VOOR WINDTURBINES

Windturbines moeten aan strenge veiligheidseisen voldoen. Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste veiligheidseisen weer. Belangrijk is het om onderscheid te maken tussen:

- eisen, opgelegd door wetgeving;
- eisen, opgelegd door beheerders van infrastructurele werken binnen hun beheersgebied;
- wensen van beheerders van infrastructurele werken buiten hun beheersgebied.

Aan de *eisen*, zowel door wetgeving als door beheerders, moet een windpark voldoen. Een windpark hoeft echter niet te voldoen aan de *wensen* van de beheerders. Om echter bezwaren in de vergunningenprocedure zoveel mogelijk te voorkomen is het wel wenselijk om met deze aspecten rekening te houden in de risicorisico-analyse. In hoofdstuk 4 t/m 12 wordt per object (bebouwing, wegen etc) aangegeven aan welke eisen voldaan moet worden.

Dit hoofdstuk biedt een beknopte beschrijving van de belangrijkste wetgeving en toetsingscriteria. De volledige teksten van wetten en regelgeving zijn te vinden op <http://wetten.overheid.nl>.

2.1 Wetgeving

2.1.1 Activiteitenregeling Milieubeheer

Windturbines die in Nederland geplaatst worden moeten volgens de Activiteitenregeling milieubeheer om risico's te voorkomen of te beperken, voldoen aan de veiligheidseisen opgenomen in:

- a. NEN-EN-IEC 61400-2;
- b. NVN 11400-0.

Vanaf maart 2006 is de combinatie van de Europese veiligheidsnormen “IEC 61400-1, editie 3” en “IEC WT01” de officiële opvolger van de Nederlandse voornorm NVN 11400-0 uit 1999. In de Regeling staat ook nog de 61400-2. De NEN-EN-IEC 61400-2 is de norm voor kleine windturbines. Windturbines met een rotoroppervlak van meer dan 40 m² moeten voldoen aan de NEN-EN-IEC 61400-1 editie 3 [7]. De IEC-61400-22 [8] is de opvolger van de WT01.

Turbines die voldoen aan deze eisen, zijn ontworpen voor een levensduur van tenminste 20 jaar. Ze voldoen aan de eisen die worden gesteld aan de materialen voor wat betreft onder andere vermoeiing, vochtinwerking, corrosie en verbindingstechnieken, om deze levensduur te waarborgen. De veiligheidssystemen zijn zodanig ontworpen dat de turbine onder alle weerscondities veilig bedreven kan worden. Ook in geval van storingen aan de turbine zelf zorgen de veiligheidssystemen ervoor dat de turbine stil wordt gezet. De werking van de veiligheidssystemen wordt periodiek gecontroleerd. Verder worden er eisen gesteld aan het elektrisch systeem, de arbeidsveiligheid en de onderhoudsprocedures om de veiligheid van de turbine gedurende zijn levensduur te waarborgen.

2.1.2 Activiteitenbesluit milieubeheer

Windturbines die op land geplaatst worden vallen onder het Activiteitenbesluit. Over de gevaarsaspecten van windturbines merkt het Activiteitenbesluit het volgende op:

- in artikel 3.14 lid 1: een windturbine wordt tenminste eenmaal per kalenderjaar beoordeeld op de noodzakelijke beveiligingen, onderhoud en reparaties door een deskundige op het gebied van windturbines.
- in artikel 3.14 lid 5: een windturbine voldoet ten behoeve van het voorkomen van risico's voor de omgeving en ongewone voorvallen, dan wel voor zover dat niet mogelijk is het zoveel mogelijk beperken van de risico's voor de omgeving en de kans dat ongewone voorvallen zich voordoen en de gevolgen hiervan aan de bij ministeriële regeling te stellen eisen.

In artikel 3.15a zijn de regels voor risico's van windturbines opgenomen:

- 1 Het plaatsgebonden risico voor een buiten de inrichting gelegen kwetsbaar object, veroorzaakt door een windturbine of een combinatie van windturbines, is niet hoger dan 10^{-6} per jaar.
- 2 Het plaatsgebonden risico voor een buiten de inrichting gelegen beperkt kwetsbaar object, veroorzaakt door een windturbine of een combinatie van windturbines, is niet hoger dan 10^{-5} per jaar.

In dit artikel is ook opgenomen dat bij Ministeriële regeling ook afstandseisen kunnen worden opgenomen; in dat geval komen lid 1 en lid 2 te vervallen. Eveneens kunnen regels worden gesteld over de berekening van het plaatsgebonden risico.

2.1.3 Bevi

In mei 2004 is het “Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen” (Bevi) in werking getreden [1] [3]. Hoewel windturbines in principe niet onder de categorieën van inrichtingen vallen waarop Bevi zich richt, geeft Bevi, in tegenstelling tot het Activiteitenbesluit, wel een oriëntatiewaarde voor het groepsrisico. In Bevi zijn de risiconormen voor externe veiligheid met betrekking tot bedrijven met gevaarlijke stoffen wettelijk vastgelegd. Kenmerk van het besluit is dat het risico dat optreedt in kwetsbare en minder kwetsbare bestemmingen als gevolg van de risicobron, aan de risiconormen wordt getoetst. Een definitie van kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten en voor groepsrisico staat beschreven in artikel 1 van Bevi.

2.1.4 Bevb en Revb

Op 1 januari 2011 zijn het Besluit externe veiligheid buisleidingen (Bevb) en de bijbehorende Regeling externe veiligheid buisleidingen (Revb) in werking getreden. Het Bevb regelt de taken en verantwoordelijkheden van de leidingexploitant en de gemeenten. In de Revb zijn de aanwijzing van buisleidingen, de risicoafstanden en de aanwijzing van de rekenmethodiek opgenomen. Het Bevb geldt

voorlopig alleen voor buisleidingen met een druk vanaf 16 bar voor het transport van aardgas en voor brandbare vloeistoffen van de K1, K2, K3 categorie

2.2 Toetscriteria

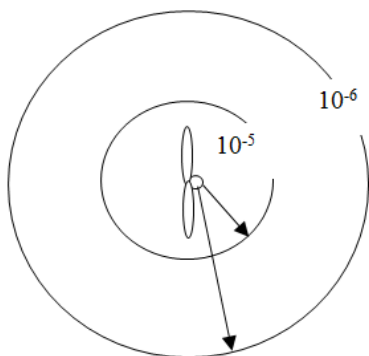
Het uitdrukken van risico's gebeurt door het aangeven van de kans op overlijden ten gevolge van het falen van een windturbine. De volgende risico's worden op deze manier bepaald.

- Plaatsgebonden Risico (PR)¹
- Individueel Passanten Risico (IPR)²
- Maatschappelijk Risico (MR)³.
- Groepsgebonden Risico voor inrichtingen (GR_I) en idem voor transportroutes (GR_T)⁴,

2.2.1 Plaatsgebonden Risico (PR)

Het Plaatsgebonden Risico (PR) is in Bevi [1] gedefinieerd als: “risico op een plaats buiten een inrichting, uitgedrukt als een kans per jaar dat een persoon die onafgebroken en onbeschermd op die plaats zou verblijven, overlijdt als een rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval binnen die inrichting.”

Op een kaart kunnen plaatsen met een gelijke PR waarde door een lijn verbonden worden. Hierdoor ontstaat een risicocontour. Deze PR-contour is geheel onafhankelijk van het al dan niet feitelijk aanwezig zijn van personen rond de inrichting. Binnen de PR-contouren 10^{-5} en 10^{-6} worden voor windturbines in het Activiteitenbesluit eisen gesteld aan de aanwezigheid van bebouwing.



Figuur 1: Schematische weergave van de risicocontouren t.g.v. bladbreuk

Voor kwetsbare objecten geldt een grenswaarde van $PR = 10^{-6}$ en voor beperkt kwetsbare objecten een grenswaarde van $PR = 10^{-5}$. Dit wil zeggen dat kwetsbare objecten buiten de 10^{-6} contour moeten liggen, en beperkt kwetsbare objecten buiten de 10^{-5} contour moeten liggen. In overleg met het

¹ Opgenomen in het Activiteitenbesluit en Bevi

² Opgenomen in beleid RWS en ProRail

³ Opgenomen in beleid RWS en ProRail

⁴ Opgenomen in Bevi

bevoegd gezag mag hiervan worden afgeweken indien hier gewichtige redenen voor zijn. Binnen de 10^{-6} contour is de kans op overlijden 1 op 1 miljoen per jaar. Voor de 10^{-5} contour geldt dat de kans op overlijden 1 op 100.000 per jaar is.

Ook mag een windturbine er niet voor zorgen dat de PR waarden van bijvoorbeeld buisleidingen worden overschreden.

In artikel 11 lid 3 van het Bevb is bepaald dat bij de vaststelling van een bestemmingsplan op grond waarvan de aanleg, bouw of vestiging van een risicoverhogend object wordt toegelaten in de directe omgeving van de buisleiding, bij kwetsbare objecten voldaan moet worden aan de grenswaarde voor het PR van 10^{-6} per jaar en dat bij beperkt kwetsbare objecten rekening gehouden moet worden met een richtwaarde van 10^{-6} per jaar. Dit betekent dat een windturbine alleen in de nabijheid van een bestaande buisleiding kan worden toegelaten als de risicoverhoging van de buisleiding door de windturbine ter hoogte van kwetsbare objecten niet hoger is dan 10^{-6} per jaar; hetzelfde geldt voor beperkt kwetsbare objecten zij het dat de maximale hoogte van het PR van 10^{-6} per jaar dan geen dwingende eis is.

Voor nieuwe leidingen geldt de strengere eis dat de 10^{-6} per jaar contour binnen de belemmeringsstrook van de leiding dient te blijven.

2.2.2 Individueel Passanten Risico (IPR)

Rijkswaterstaat en ProRail hanteren binnen hun werken het IPR als criterium voor het beoordelen van het risico's voor passanten. Binnen de werken van Rijkswaterstaat en ProRail moet op basis van de beleidsregels aan deze toetsingscriteria worden voldaan. Voor het risico voor de passant is een risicomat gekozen die aansluit bij de individuele beleving van de passant, namelijk de overlijdenskans per passant per jaar. Hierbij wordt de passant gevolgd gedurende zijn bezigheden in de nabijheid van het windturbinepark. Zoals beschreven in [2] hanteren Rijkswaterstaat en ProRail een toelaatbare waarde van 10^{-6} per jaar. Voor een infrastructuur waarop wettelijk toelaatbare snelheden boven de honderdzesig kilometer per uur bestaan (bijvoorbeeld de Hoge Snelheidslijn) hanteert ProRail een toelaatbare waarde van 10^{-7} per jaar.

2.2.3 Maatschappelijk Risico (MR)

Rijkswaterstaat en ProRail hanteren binnen hun werken naast het IPR het MR als criterium voor het beoordelen van risico's voor passanten. Binnen de werken van Rijkswaterstaat en ProRail moet op basis van de beleidsregels aan deze toetsingscriteria worden voldaan. Het maatschappelijk risico is een maat voor het verwachte aantal doden per jaar en is een risicomat voor de maatschappelijke beleving. Zoals beschreven in [2] hanteren Rijkswaterstaat en ProRail bij de beoordeling van het maatschappelijk risico het criterium dat er jaarlijks niet meer dan $2 \cdot 10^{-3}$ passanten mogen overlijden.

2.2.4 Groepsrisico (GR)

Het groepsrisico (GR) gaat over de impact van een calamiteit met veel dodelijke slachtoffers tegelijk. Het Groepsrisico is gedefinieerd als: "de cumulatieve kans per jaar dat tenminste 10, 100 of 1.000 personen overlijden als rechtstreeks gevolg van hun aanwezigheid in het invloedsgebied van een inrichting en een ongewoon voorval binnen die inrichting waarbij een gevaarlijke stof of gevaarlijke afvalstof betrokken is".

In het Activiteitenbesluit is het groepsrisico niet opgenomen. In Bevi wel, maar windturbines vallen niet onder Bevi en dus zal de wijze waarop het GR_I voor windturbines berekend moet worden geen onderdeel zijn van wettelijke besluitvorming.

Indien het bevoegd gezag eist dat het GR_I berekend moet worden, zal overeenstemming bereikt moeten worden op welke wijze het GR_I berekend zal worden. Uitgangspunt voor de oriëntatiewaarde voor het GR_I is dat ongeval met tien doden slechts met een kans van één op de honderdduizend per jaar mag voorkomen, een ongeval met honderd doden met een kans van één op de tien miljoen per jaar etc. De berekening van het GR_I gebeurt met behulp van een kwantitatieve risicoanalyse.

De verantwoordingsplicht geldt ook voor bouwplannen in de omgeving van buisleidingen die bijdragen aan de ontwikkeling van het groepsrisico. Er dient dus te worden onderzocht of het groepsrisico als gevolg van de kans op falen van de buisleiding toeneemt als de kans op falen van de buisleiding toeneemt door de plaatsing van de windturbine(s).

Het groepsrisico is geen norm, maar er geldt een verantwoordingsplicht. De onderdelen waar bij de verantwoording aandacht aan moet worden besteed, staan beschreven in Bevi (artikel 12 voor Bevi activiteiten en artikel 13 voor ruimtelijke plannen). Daarbij moet een vergelijking worden gemaakt met de oriëntatiewaarde. Dit is een richtwaarde waar het bevoegd gezag zich zoveel mogelijk aan moet houden, maar men mag hiervan wel goed onderbouwd afwijken.

Er zijn twee normen voor het groepsrisico:

- **groepsrisico voor inrichtingen** (in dit Handboek afgekort als GR_I): De oriëntatiewaarde voor het GR_I is dat een ongeval met 10 doden of meer slechts met een kans van één op de honderdduizend per jaar mag voorkomen (10^{-5} per jaar) en een ongeval met 100 of meer doden slechts met een kans van één op de 10 miljoen jaar (10^{-7} per jaar), et cetera
- **groepsrisico voor transportroutes** (in dit Handboek afgekort als GR_T): De norm voor het GR_T is dat een ongeval met tien doden of meer slechts met een kans van één op de tienduizend per jaar mag voorkomen (10^{-4} per jaar) en een ongeval met 100 of meer doden slechts met een kans van één op de miljoen jaar (10^{-6} per jaar) et cetera, per kilometer transportroute.

2.2.5 Gevaarlijke stoffen

Gevaarlijke stoffen kunnen worden opgeslagen of getransporteerd in tanks of leidingen. Deze tanks of leidingen hebben een intrinsiek faalkans. De plaatsing van een windturbine in de nabijheid mag niet leiden tot een significante verhoging van deze intrinsieke faalkans. Als uitgangspunt wordt een risico toename tot 10% geaccepteerd. Dit is een additioneel risico dat over het algemeen door de markt toelaatbaar wordt geacht.

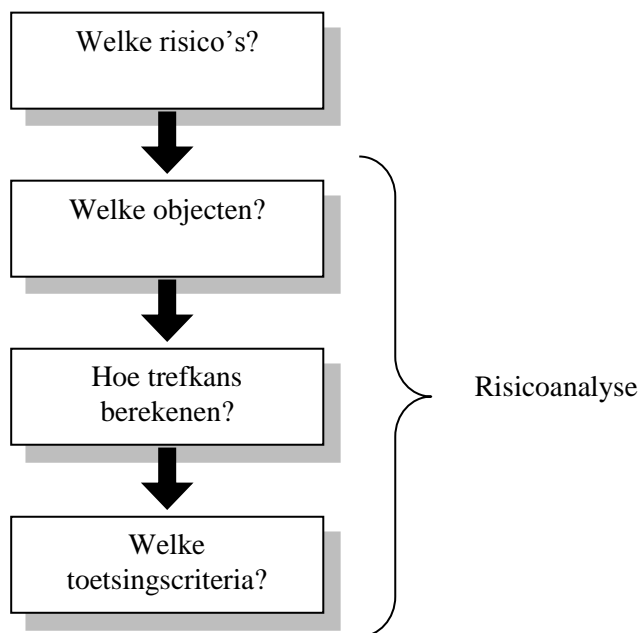
3. GEBRUIK VAN HET HANDBOEK

Projectontwikkelaars moeten kunnen aantonen dat hun (geplande) windpark geen of een toelaatbaar risico voor de omgeving oplevert. Het Handboek biedt uitgangspunten om risico's van windturbines op de omgeving te berekenen.

De tweeledige vraag die in de risicoanalyse beantwoord moet worden, luidt:

- vormen windturbines een significant risico voor nabijgelegen objecten en activiteiten en zo ja,
- is de som van dit risico en het bestaande risico lager dan de geldende criteria?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, wordt hij in de volgende vier vragen opgesplitst, waarbij de eerste vraag te beschouwen is als een risico-inventarisatie en de laatste drie vragen de risicoanalyse vormen. Dit is weergegeven in Figuur 2. Deze stappen worden in de volgende paragrafen nader uitgewerkt.



Figuur2: stappenplan risicoanalyse

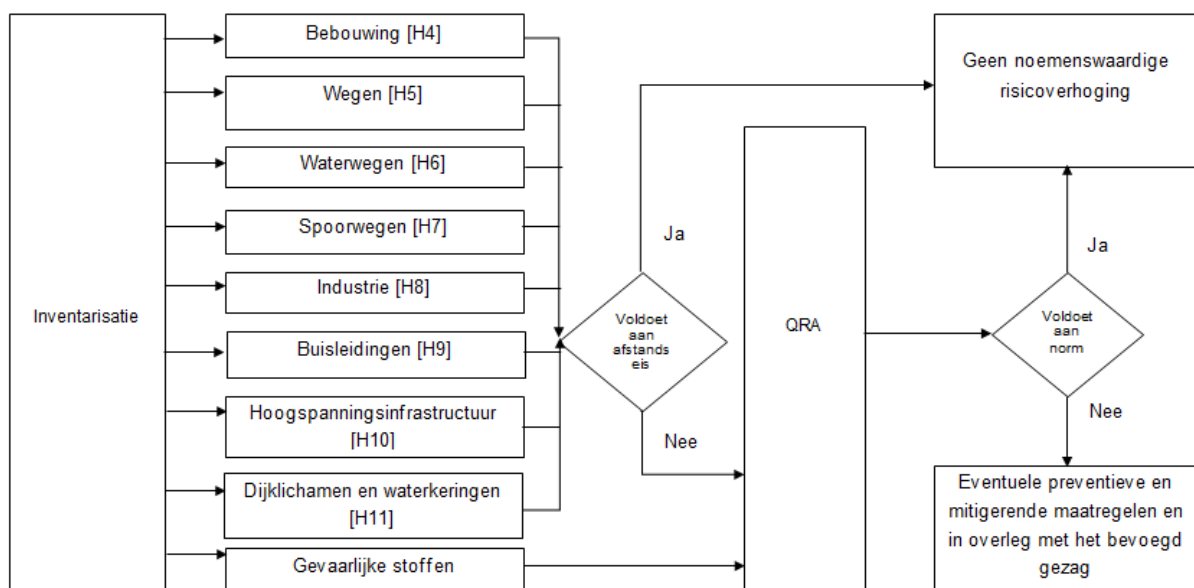
In paragraaf 3.1 is toegelicht hoe een risicoinventarisatie voor windturbines gemaakt kan worden. Na de inventarisatie dient het risico voor verschillende categorieën uitgewerkt te worden. Hoofdstuk 4 t/m 13 geven per categorie weer welke risicomethodiek gebruikt kan worden en welke criteria van toepassing zijn. Voor elk object kan de gebruiker van het Handboek nagaan:

- of het object binnen de afstandseis of maximale werpafstand valt,
- welke rekenmethoden en faalkansen van toepassing zijn om de trefkansen voor het object of activiteit te bepalen,

- welke risicocriteria van toepassing zijn, de juridische status van de risicocriteria en op welke manier de resultaten van de trefkansen aan deze criteria getoetst moet worden,
- welke bijlagen van het handboek, met nadere details over de risicobepaling, relevant zijn.

Wanneer de risico's van windturbines niet voldoen aan de gestelde richtlijnen zoals beschreven in het handboek of aan eisen van beheerders, kan in overleg met het bevoegd gezag of een beheerder gezocht worden naar oplossingen, bijvoorbeeld toepassing van een ander type windturbine of verplaatsing van de windturbine. Ook worden er in dit Handboek een aantal bronmaatregelen en mitigerende maatregelen voorgesteld (hoofdstuk 14).

Figuur 3 geeft een schematisch overzicht weer van het gebruik van het Handboek.



Figuur 3: Schematische weergave van het gebruik van het Handboek

De verschillende categorieën (bebouwing, wegen etc) worden per hoofdstuk beschreven. Omdat gevaarlijke stoffen bij de verschillende categorieën voorkomen, wordt dit onderwerp ook in verschillende hoofdstukken (wegen, industrie etc.) behandeld.

In de volgende paragrafen van dit hoofdstuk wordt de opbouw van een risicoanalyse per stap uitgewerkt en toegelicht.

3.1 Welke risico's vormen windturbines voor hun omgeving?

Voor de beoogde windturbines wordt een inventarisatie gemaakt van de potentiële risicoscenario's, waarbij het Handboek onderscheid maakt in:

- breuk van een windturbineblad
- omvallen van een windturbine door mastbreuk

- naar beneden vallen van de gondel en/of de rotor
- het naar beneden vallen van kleine onderdelen.

De faalfrequentie van het naar beneden vallen van kleine onderdelen (bouten, blad- en tipdelen, ijs) moet niet kwantitatief maar kwalitatief worden bepaald. Het naar beneden vallen van kleine turbineonderdelen of ijs zijn incidenten die met name risico's vormen voor het gebied onder de rotor. Bladdelen kunnen wel ver van de turbine terecht komen.

Niet alleen het falen, maar ook de omstandigheden waaronder dat gebeurt, zijn van invloed op het risico. Zo kan een blad afbreken bij het nominale toerental, maar ook tijdens een overtoerensituatie. In dit laatste geval kan het blad ver weggeslingerd worden.

Onderdeel van de rapportage "Rekenmethodiek zonering windturbines" betreft een analyse van scenario's en faalkansen die zijn bepaald zijn uit historische Deense, Duitse, Engelse en Nederlandse faalgegevens in de periode 2001 tot en met 2010. Hierbij zijn faalgegevens gebruikt die zijn opgenomen in de Caithness Windfarm database, Windkraft journals en uit gegevens van twee windturbinefabrikanten. Deze informatie is te vinden in Bijlage A. Het Ministerie van I&M heeft bepaald dat het 95% betrouwbaarheidspercentiel voor de faalfrequenties gehanteerd moet worden. De resultaten zijn samengevat in Tabel 1.

Tabel 1: Scenario's en faalkansen voor risicoanalyses(P95)

| Scenario | Faalfrequentie per turbine per jaar |
|--|---|
| Bladbreek Breek van geheel blad, onder te verdelen in de volgende scenario's: | $8,4 \cdot 10^{-4}$ |
| <i>Bladbreek bij nominaal bedrijf</i> | $8,4 \cdot 10^{-4}$ |
| <i>Bladbreek bij overtoeren (2 keer nominaal toerental)</i> | $5,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Mastbreek Omvallen van de turbine door mastbreek | $1,3 \cdot 10^{-4}$ |
| Naar beneden vallen van hele gondel en/of rotor | $4,0 \cdot 10^{-5}$ |
| Naar beneden vallen van: kleine onderdelen (bouten, beschermingskappen, anemometer, etc.) blade en tipdelen nadat een blad de toren heeft geraakt stukken ijs tijdens stilstand | kwalitatief beschouwen (Zie Bijlage C.3) |

3.2 Welke personen en objecten lopen risico?

De activiteiten en objecten in de nabijheid van windturbines moeten in kaart worden gebracht. In principe worden alle activiteiten en objecten beschouwd die mogelijk door een afbrekend rotorblad tijdens een overtoerensituatie getroffen kunnen worden. De maximale afstand die door een afbrekend rotorblad tijdens een overtoerensituatie overbrugd kan worden, wordt de maximale werpafstand genoemd. Bevindt een object of activiteit zich buiten de maximale werpafstand, dan is het uitvoeren van een risicoanalyse niet nodig.

Soms hebben beheerders van infrastructurele werken een afstandseis opgenomen. Wanneer turbines worden gebouwd op eigendomsgebied van RWS en ProRail, zijn zij vergunningverlener namens de Minister van Infrastructuur en Milieu. Gasunie, TenneT en andere partijen hebben een afstandseis aangegeven waar buiten geen negatieve invloed van de windturbine te verwachten is.

De maximale werpafstand is afhankelijk van het type turbine en wordt onder andere bepaald door de diameter van de turbine, het roortoerental en de ashoogte. Als richtlijn kunnen de generieke waarden uit onderstaand kader worden gebruikt. Dit is aangegeven voor IEC1 en IEC2 klasse turbines, wat overeenkomt met hoge en gemiddelde windsnelheid. Het windregiem bepaalt welke windturbine geschikt is voor de windcondities van een bepaalde locatie. De IEC klassen zijn gedefinieerd in de IEC 61400 norm (zie ook paragraaf 2.1.1) Hierbij zijn de maximale werpafstanden van afbrekende bladen bij zowel nominaal toerental als bij een overtoeren situatie weergegeven.

Tabel 2: Generieke waarden voor werpafstanden

IEC1

| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|----------------------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| Max Werpafstand [m] | | | | | | | | | | |
| Bij nominaal toerental | 131 | 143 | 158 | 170 | 176 | 193 | 186 | 204 | 202 | 214 |
| Bij overtoeren | 389 | 406 | 457 | 473 | 507 | 531 | 543 | 568 | 585 | 602 |

IEC2

| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|----------------------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| Max Werpafstand [m] | | | | | | | | | | |
| Bij nominaal toerental | 142 | 155 | 175 | 187 | 198 | 216 | 213 | 231 | 233 | 245 |
| Bij overtoeren | 430 | 447 | 519 | 536 | 588 | 613 | 641 | 667 | 699 | 716 |

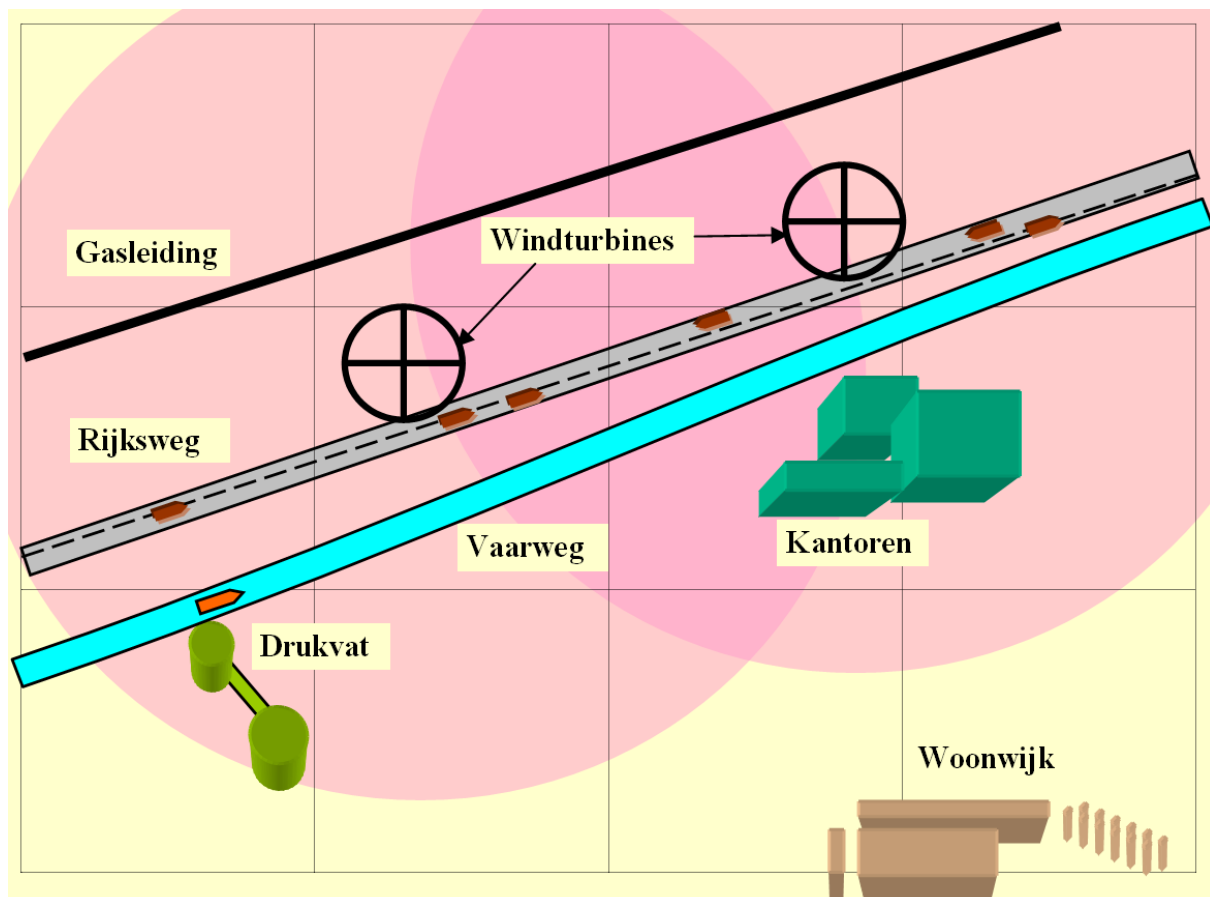
Turbines met tussenliggende ashoogtes kunnen de hoogste ashoogte aannemen of de werpafstand kan berekenen worden volgens de methodiek zoals aangegeven in Bijlage B. Dit geldt ook voor ashoogtes die niet zijn opgenomen in de tabel. De generieke getallen zijn berekend volgens een ballistisch model zonder luchtkrachten. Bijlage C1 beschrijft tevens een methode voor het berekenen van werpafstanden via een ballistisch model mét luchtkrachten.

Wanneer een object of activiteit zich wel binnen de maximale werpafstand bevindt, kan het risico voor personen of objecten worden bepaald. Het uitdrukken van risico's voor personen gebeurt door het aangeven van de kans op overlijden ten gevolge van het falen van een windturbine.

Bij het uitvoeren van een risicoanalyse is het nabijgelegen object in te delen in één van de acht onderstaande hoofdcategorieën:

1. bebouwing
2. wegen
3. vaarwegen
4. spoorwegen
5. industrie
6. buisleidingen
7. hoogspanningsinfrastructuur
8. dijklichamen en waterkeringen.

Het identificeren van deze objecten gebeurt veelal door een bezoek te brengen aan de locatie, topografische kaarten te raadplegen, via de website risicokaart.nl en door contact op te nemen met de gemeente of provincie, of met de beheerder of eigenaar van het object. Per categorie moet vervolgens worden nagegaan wat de activiteiten zijn bij dit object en welke functie het object vervult. Een opslagtank valt bijvoorbeeld onder de hoofdcategorie “5. industrie”. Om te achterhalen welke stof er in de tank wordt opgeslagen is het noodzakelijk om contact op te nemen met de beheerder van de tank.



Figuur 4: Situatieschets inclusief contouren van de maximale werpafstand

3.3 Op welke manier worden trefkansen voor personen en objecten bepaald?

Wanneer bekend is voor welke objecten de risico's bepaald moeten worden, kan de trefkansberekening worden uitgevoerd. Het Handboek maakt onderscheid tussen personen en objecten (zoals gebouwen en infrastructuur). De trefkans voor objecten wordt in de volgende hoofdstukken per hoofdcategory beschreven.

Generieke gegevens

Het uitvoeren van een kwantitatieve risicoanalyse volgens de methode die in de bijlage van dit Handboek is beschreven kan arbeidsintensief zijn. Over het algemeen kan met een eenvoudige aanpak en conservatieve uitgangspunten worden aangetoond dat de veiligheidscriteria niet worden overschreden. Daarom zijn in bijlage B "*Generieke Gegevens*", generieke conclusies afgeleid voor wat betreft trefkansen van personen en objecten. Met deze conclusies kan in veel gevallen het arbeidsintensieve analysewerk worden vermeden.

Rekenmethodiek

In bijlage C: "*Rekenmethode Werpafstanden en Trefkansen*" worden de methodes en procedures beschreven om de werpafstanden van turbineonderdelen te berekenen en de daarbijhorende risico's te bepalen. Hierbij kunnen specifieke turbinegegevens worden gebruikt.

Risicocontouren

Het plaatsgebonden risico (PR) is de kans dat een persoon, die zich gedurende een jaar onafgebroken onbeschermd op een bepaalde plaats bevindt, overlijdt als gevolg van een ongeval door een falende windturbine. Rondom een windturbine kunnen risicocontouren worden getekend voor het plaatsgebonden risico. In het gebied direct rondom de windturbine (op ongeveer een bladlengte afstand) ligt de 10^{-5} per jaar contour. De kans op overlijden is op deze contour gelijk aan één op de honderdduizend per jaar. Binnen deze contour mogen geen kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten staan. Op een grotere afstand van de windturbine (op ongeveer ashoogte + bladlengte afstand) ligt de 10^{-6} per jaar contour, waar de kans op overlijden één op een miljoen per jaar is. Tussen de 10^{-5} en de 10^{-6} per jaar contour mogen zich wel beperkt kwetsbare objecten bevinden (bijvoorbeeld losstaande huizen of bedrijven met een beperkt aantal medewerkers). Kwetsbare objecten, zoals bijeenstaande woningen, scholen en ziekenhuizen mogen alleen buiten de 10^{-6} per jaar contour staan. De definitie van kwetsbare objecten en van beperkt kwetsbare objecten is gegeven in artikel 1 van het "Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen" Bevi.

Voor de risicocontouren met generieke gegevens gelden de volgende vuistregels:

1. De $PR = 10^{-6}$ per jaar contour is gelijk aan het maximum van *ashoogte plus halve rotordiameter* en *maximale werpafstand bij nominaal rotortoerental*.
2. De $PR = 10^{-5}$ per jaar contour is gelijk aan aan de halve rotordiameter.

Hieronder staan generieke waarden voor de 10^{-6} per jaar en de 10^{-5} per jaar contour weergegeven.

Tabel 3: Afstand [m] PR = 10^{-6} en PR = 10^{-5} contouren
IEC 1

| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|----------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| PR = 10^{-6} | 131 | 143 | 158 | 170 | 176 | 193 | 186 | 204 | 202 | 214 |
| PR = 10^{-5} | 32 | 32 | 45 | 45 | 55 | 55 | 63 | 63 | 71 | 71 |

IEC 2

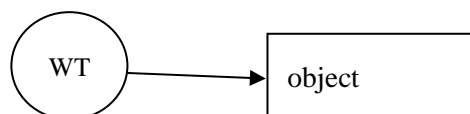
| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|----------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| PR = 10^{-6} | 142 | 155 | 175 | 187 | 198 | 216 | 213 | 231 | 233 | 245 |
| PR = 10^{-5} | 35 | 35 | 49 | 49 | 60 | 60 | 70 | 70 | 78 | 78 |

3.4 Aan welke criteria moet getoetst worden?

Het toe te passen criterium voor het beoordelen van de resultaten van een risicoanalyse is afhankelijk van het object in de nabijheid van de windturbine(s) en de aanwezigheid van personen of infrastructuur. Daarnaast is de aanwezigheid van een risicobron in de directe omgeving, zoals een opslag met gevaarlijke stoffen eveneens van belang bij het vaststellen van de risicocriteria.

Het Handboek onderscheidt vier mogelijke situaties. Twee situaties waarbij sprake is van directe risico's en twee waarbij sprake is van indirecte risico's, ook wel het domino-effect genoemd.

I. Windturbine in de nabijheid van een kwetsbaar object: direct risico voor een object



De windturbine kan in deze situatie een direct risico opleveren voor het object, bijvoorbeeld een woonwijk. De vergunningverlener kan toetsen aan het Activiteitenbesluit waarin risicocontouren voor kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten zijn opgenomen.

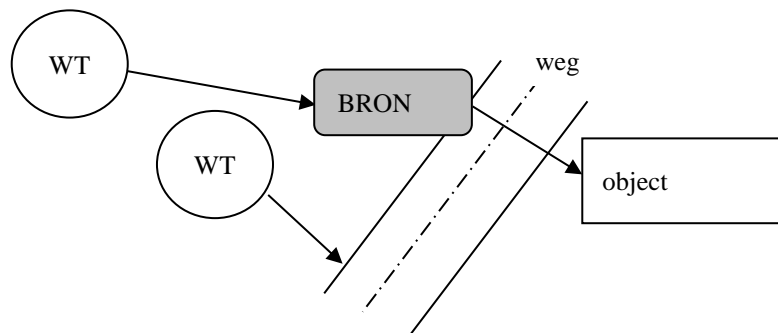
II. Windturbine in de nabijheid van een weg, spoorweg of vaarweg: direct risico voor passanten

Wegen worden niet gecategoriseerd als *kwetsbare* of *beperkt kwetsbare* objecten. Windturbines geplaatst op eigendommen of in het beheersgebied van Rijkswaterstaat vallen

onder de beleidsregel van Rijkswaterstaat en Rijkswaterstaat is zelf ook vergunningverlener. Windturbines geplaatst op eigendommen van ProRail of gebieden waarbinnen vergunningplicht geldt, vallen onder de beleidsregel van ProRail en ProRail is zelf ook vergunningverlener.

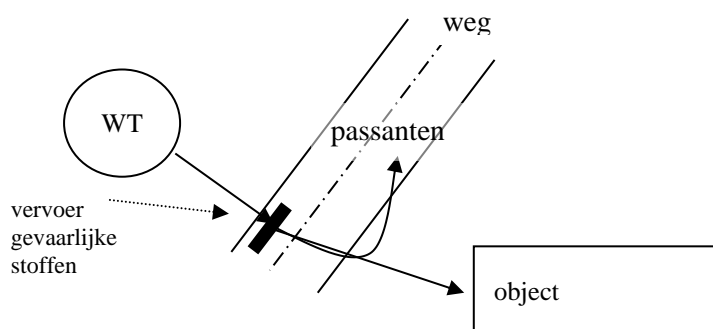
Deze beleidsregels gelden niet voor provinciale (vaar)wegen of gemeentelijke (vaar)wegen. Voor dit soort wegen zijn geen algemene externe veiligheidsnormen van toepassing. Wel kan het bevoegd gezag eisen dat aan de beleidsregel van Rijkswaterstaat voldaan moet worden.

III. Windturbine in de nabijheid van een risicobron (bijvoorbeeld opslag gevaarlijke stof): indirect risico voor een kwetsbaar object



Wanneer een windturbine wordt geplaatst in de nabijheid van een inrichting die onder de werking van Bevi valt, dan bestaat er kans op een domino-effect, waardoor het risico voor het kwetsbare object toeneemt. Het Handboek beveelt aan dat de vergunningverlener in dergelijke situaties toetst aan het Bevi [1], waarbij zowel de inrichting als de windturbine worden beschouwd.

IV. Windturbine in de nabijheid van een weg, spoorweg, vaarweg of buisleiding: indirect risico voor een kwetsbaar object ten gevolge van een ongeluk met vervoer gevaarlijke stoffen



Het Handboek beveelt aan dat de vergunningverlener in gevallen waarop deze situatie van toepassing is, toetst aan de risiconormen, zoals beschreven in de "Circulaire Risiconormering vervoer gevaarlijke stoffen" [12] en de "Nota Vervoer gevaarlijke Stoffen" [16] en het Besluit externe veiligheid buisleidingen [20]. Indien het risico van een transport wordt verhoogd door plaatsing van een windturbine, kunnen aan de plaatsing van deze windturbine, gelet op de

| Onderdeel | Beheerder | Afstandseis | Juridische status afstandseis | Toetsing | Normering |
|--|-----------------------------|---|-------------------------------|---|---|
| Waterweg | Rijkswaterstaat | ½ rotordiameter uit de rand van de vaarweg met een minimum van 50m | Noodzakelijk voor vergunning | IPR MR GR _T | 10 ⁻⁶ per jaar 2 * 10 ⁻³ per jaar Max 10% toevoegen aan catastrofale faalfrequentie [/km/jaar] |
| Spoorweg | ProRail | 7,85 meter + ½ RD uit het rand van het dichtstbijzijnde spoor minimum van 30m | Noodzakelijk voor vergunning | IPR MR GR _T | 10 ⁻⁶ per jaar 2 * 10 ⁻³ per jaar Max 10% toevoegen aan intrinsieke faalfrequentie [/km/jaar] |
| Ondergrondse buisleidingen | Gasunie | Maximale werpafstand bij nominaal toerental | Advies | Additionele bezwijkkans | Max 10% toevoegen aan oorspronkelijke breukkans leiding [/km/jaar] voor deel binnen invloedsgebied |
| Bovengrondse buisleidingen | Gasunie | Maximale werpafstand bij overtoeren | Advies | Additionele bezwijkkans | Max 10% toevoegen aan oorspronkelijke breukkans leiding [/km/jaar] voor deel binnen invloedsgebied |
| Hoogspannings-infrastructuur (zowel ondergronds als bovengronds) | TenneT | Maximale werpafstand bij nominaal toerental | Advies | | |
| Industrie | Beheerder inrichting | Afhankelijk van inrichting | Noodzakelijk voor vergunning | PR van inrichting GR _I van inrichting | PR 10 ⁻⁶ en PR 10 ⁻⁵ contour Ongeval met 10 doden < 10 ⁻⁵ per jaar Ongeval met 100 doden < 10 ⁻⁷ per jaar |
| Waterkeringen | Waterschap, Rijkswaterstaat | Buiten kernzone | Afhankelijk van beheerder | Binnen kernzone | Geen negatieve gevolgen voor de waterkerende functie van de primaire waterkering |

4. BEBOUWING

In de hoofdcategorie *bebouwing* wordt een onderverdeling gemaakt naar twee categorieën zoals vastgelegd in Bevi [1]:

- kwetsbare objecten
(onder andere woningen, ziekenhuizen, scholen, kantoorgebouwen groter dan 1500 m²)
- beperkt kwetsbare objecten
(onder andere restaurants, hotels, winkels en kantoorgebouwen kleiner dan 1500 m², sportcomplex)

Hierop is zowel het Plaatsgebonden Risico (PR) als het Groepsrisico voor Inrichtingen (GR_I) van toepassing (zie bijlage D, hoofdstuk 2).

4.1 Afstandseis

Als wettelijke afstandseis zoals vastgelegd in Bevi geldt dat de windturbine moet voldoen aan de PR 10⁻⁵ contour en 10⁻⁶ contour. Binnen de 10⁻⁵ per jaar contour van de windturbine mogen geen kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten staan. Kwetsbare objecten moeten buiten de 10⁻⁶ per jaar contour blijven. Op basis van de generieke gegevens gelden de volgende afstandseisen voor bebouwing.

Beperkt kwetsbare objecten dienen minimaal een halve rotordiameter van de turbine af te liggen.

Kwetsbare objecten zijn niet toegestaan binnen een afstand van het maximum van:

- ashoogte plus een halve rotordiameter
- de maximale werpafstand bij nominaal toerental.

Als niet aan de afstandseis voldaan wordt, kan het PR berekend worden met turbinespecifieke gegevens.

Wanneer binnen het beïnvloedingsgebied (maximale werpafstand bij overtoeren) van de windturbine gevaarlijke stoffen zijn opgeslagen, dient het groepsrisico berekend te worden. Hiervoor is het Groepsrisico voor Inrichtingen (GR_I) van toepassing.

4.2 Risicomethodiek

De risicocontouren (10⁻⁵ per jaar contour en 10⁻⁶ per jaar contour) kunnen gebruikt worden om het PR te toetsen. Binnen de 10⁻⁵ per jaar contour van de windturbine mogen geen kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten staan. Kort samengevat zijn dit gebouwen waar groepen personen zijn. De kans op overlijden is hier één op de honderdduizend per jaar.

Kwetsbare objecten moeten buiten de 10^{-6} per jaar contour blijven, waar de kans op overlijden één op een miljoen per jaar is. Tussen de 10^{-5} per jaar contour en de 10^{-6} per jaar contour mogen zich in principe wel beperkt kwetsbare objecten bevinden.

Tevens moet worden getoetst of het GR_1 beneden de norm blijft. Er moet worden bepaald of één incident kan resulteren in meer dan tien dodelijke slachtoffers. Een toelichting op het groepsrisico is gegeven in Bijlage D, hoofdstuk 2, paragraaf 2.2.2.

4.3 Risicocriteria

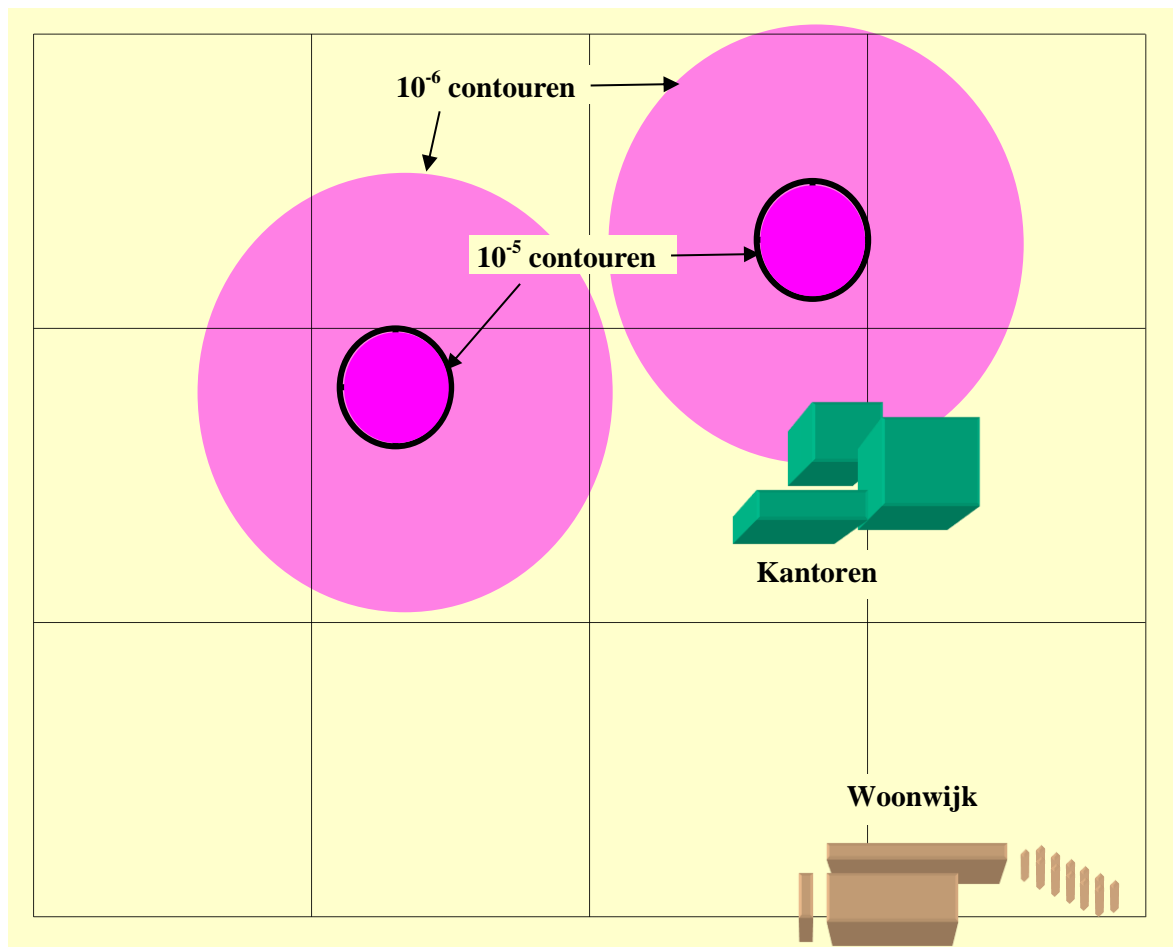
Het Activiteitenbesluit stelt een grenswaarde van $PR = 10^{-6}$ per jaar voor kwetsbare gebouwen en voor beperkt kwetsbare objecten een grenswaarde van $PR = 10^{-5}$ per jaar. Dit wil zeggen dat kwetsbare objecten buiten de 10^{-6} contour moeten liggen, en beperkt kwetsbare objecten buiten de 10^{-5} contour moeten liggen.

De toetsingswaarde voor het groepsrisico is een oriëntatiewaarde. Deze orientatiewaarde stelt dat een ongeval met 10 doden of meer slechts met een kans van één op de honderdduizend per jaar mag voorkomen (10^{-5} per jaar) en een ongeval met 100 of meer doden slechts met een kans van één op de 10 miljoen jaar (10^{-7} per jaar). Dit is een richtwaarde waar het bevoegd gezag zich zoveel mogelijk aan moet houden, maar men mag hiervan wel goed onderbouwd afwijken.

4.4 Rekenvoorbeeld

Voorbeeld

In onderstaande figuur zijn voor het voorbeeld de $PR = 10^{-5}$ contouren op basis van de generieke waarden (WT2000, 100 m) ingetekend op 49 meter en de $PR = 10^{-6}$ contouren op 187 meter. De kantoren dienen beschouwd te worden als “beperkt kwetsbare objecten”. De kantoren staan buiten de $PR = 10^{-5}$ contour maar binnen de $PR = 10^{-6}$ contour. De woonwijk is een “kwetsbaar object” en staat buiten de $PR = 10^{-6}$ contour en levert dus ook geen belemmering voor plaatsing op. Er bevinden zich in dit voorbeeld geen grote groepen personen in de nabijheid van de turbine. De personen in het kantoor zijn zodanig verspreid dat een rotorblad te klein is om bij één incident tenminste 10 slachtoffers te maken. Het GR_1 voldoet daarmee aan de norm voor GR_1 .



5. WEGEN

Wegen waar turbines naast geplaatst worden, kunnen worden ingedeeld in rijkswegen, provinciale wegen, gemeentelijke wegen en private wegen. Voor ieder soort weg geldt een ander bevoegd gezag (Rijkswaterstaat, Provincie, Gemeente, Waterschap of private eigenaar). Bij het bevoegd gezag kan de projectontwikkelaar informatie inwinnen over de aard van het transport, het aantal passages van weggebruikers en de geldende criteria. Wegen worden niet gecategoriseerd als kwetsbare of beperkt kwetsbare objecten. Voor de risicoanalyses wordt in de hoofdcategorie “wegen” onderscheid gemaakt in:

1. *Personenvervoer*. Hieronder vallen alle personen die zich verplaatsen over de weg zoals fietsers, voetgangers, auto's met inzittenden, touringcars en bestuurders van vrachtauto's met ongevaarlijke goederen.
2. *Vervoer van gevaarlijke stoffen*. Dit betreft bijvoorbeeld tankauto's met gevaarlijke stoffen.

5.1 Afstandseis

Rijkswaterstaat verleent namens de Minister van Infrastructuur en Milieu vergunning wanneer een windturbine op het gronden van Rijkswaterstaat wordt geplaatst. Dit geldt ook wanneer een windturbine over het eigendom van Rijkswaterstaat draait. Rijkswaterstaat hanteert in artikel 3 van de “*Beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken*” een afstandseis:

- voor turbines met een rotordiameter van 60 meter of kleiner: 30 meter uit de rand van de verharding
- voor turbines met een rotordiameter groter dan 60 meter: een halve rotordiameter.

Deze afstandseis hanteert RWS voor het verlenen van de vergunning. De afstandseis is niet van toepassing wanneer windturbines worden geplaatst op parkeerplaatsen en tankstations of wanneer binnen het beïnvloedingsgebied van de windturbine gevaarlijke stoffen worden getransporteerd.

Ongeacht deze afstandseis, moet het IPR en MR en het GR_T berekend worden.

5.2 Risicomethodiek

5.2.1 Personenvervoer

Rijkswaterstaat hanteert het begrip Individueel passantenrisico (IPR) en Maatschappelijk Risico (MR) binnen haar werken. Het heeft geen algemene toepassing. Het IPR sluit aan bij de beleving van de passant, namelijk de overlijdenskans per passant per jaar. Hierbij wordt de passant gevolgd gedurende zijn bezigheden in de nabijheid van het windturbinepark. Het maatschappelijk risico is een maat voor het verwachte aantal doden per jaar en is een risicomaat voor de maatschappelijke beleving.

Wanneer de weg zich binnen het invloedsgebied van de windturbine bevindt (maximale werpafstand), moet in een aanvullende risicoanalyse het individueel passanten risico (IPR) en het maatschappelijk risico (MR) worden berekend (zie bijlage D, en [11]).

Voor het IPR wordt een passant beschouwd die jaarlijks het meest in de nabijheid van de windturbine(s) verkeert. Dit kan bijvoorbeeld een ouder zijn die zijn kind te voet of per fiets naar school brengt. Ongeveer 200 dagen per jaar passeert deze ouder dagelijks de windturbine acht keer met een lage snelheid.

Voor het MR moet het totaal aantal personen worden bepaald dat jaarlijks door een windturbine(onderdeel) getroffen kan worden.

5.2.2 Vervoer van gevaarlijke stoffen

Wanneer gevaarlijke stoffen over de weg vervoerd worden, moet worden nagegaan of plaatsing van de windturbines niet leidt tot een onaanvaardbaar verhoogd risico.

De catastrofale trefkans van een tankwagen met gevaarlijke stoffen moet worden bepaald. Dit is de kans dat een windturbineonderdeel de tankwagen treft en kapot maakt. Vervolgens dient de trefkans te worden vergeleken met de risicocriteria. De trefkansen van objecten met gevaarlijke stoffen zoals tankwagens dienen berekend te worden conform de methoden in bijlage C.

Voor het in rekening brengen van de verblijfstijd moet speciale aandacht worden gegeven aan auto's, bussen, fietsers enzovoort die zich langere tijd op één en dezelfde plek kunnen bevinden. Bijvoorbeeld veel voorkomende files op het stuk weg bij de windturbines, laad- en losplaatsen en parkeerplaatsen.

5.3 Risicocriteria

Windturbines geplaatst op eigendommen van Rijkswaterstaat vallen onder de beleidsregel van Rijkswaterstaat [14] en Rijkswaterstaat is zelf ook de vergunningverlener. Voor alle wegen die geen eigendom zijn van Rijkswaterstaat maar bijvoorbeeld van de provincie of de gemeente, zijn geen algemene externe veiligheidsnormen van toepassing. In die situaties waarin de windturbine(s) niet op het eigendom van Rijkswaterstaat worden geplaatst, maar wel in de nabijheid van een rijksweg, verzoekt Rijkswaterstaat het bevoegde gezag rekening te houden met de afstanden zoals in de beleidsregel zijn vermeld.

5.3.1 Personenvervoer

De normen voor het Individueel Passanten Risico en het Maatschappelijk Risico mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden.

Als maximaal toelaatbare waarde hanteert Rijkswaterstaat een IPR van 10^{-6} per jaar. Voor MR geldt dat niet meer dan $2 \cdot 10^{-3}$ passanten per jaar mogen overlijden.

5.3.2 Vervoer van gevaarlijke stoffen

De normen voor PR en GR_T mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden. Het Handboek beveelt aan dat de vergunningverlener in gevallen waarop deze situatie van toepassing is, toetst aan de risiconormen zoals beschreven in de “*Circulaire Risiconormering Vervoer Gevaarlijke Stoffen*” [10].

De tankwagen waar de gevaarlijke stoffen in worden vervoerd, heeft een eigen intrinsieke faalkans. Dit is de kans op bezwijken per jaar per eenheid trajectlengte van de tankwagen. De intrinsieke faalkans van tankwagens is over het algemeen te vinden in generieke databases. In de Handleiding Risicoberekeningen Bevi 3.2 [17] en SAFETI-NL [18] zijn standaard faalfrequenties opgenomen voor inrichtingen die onder Bevi vallen. De windturbine mag niet leiden tot een significant verhoogd risico op de intrinsieke faalkans van de tankwagen. Als uitgangspunt kan een richtwaarde van 10% risicotoename worden gehanteerd.

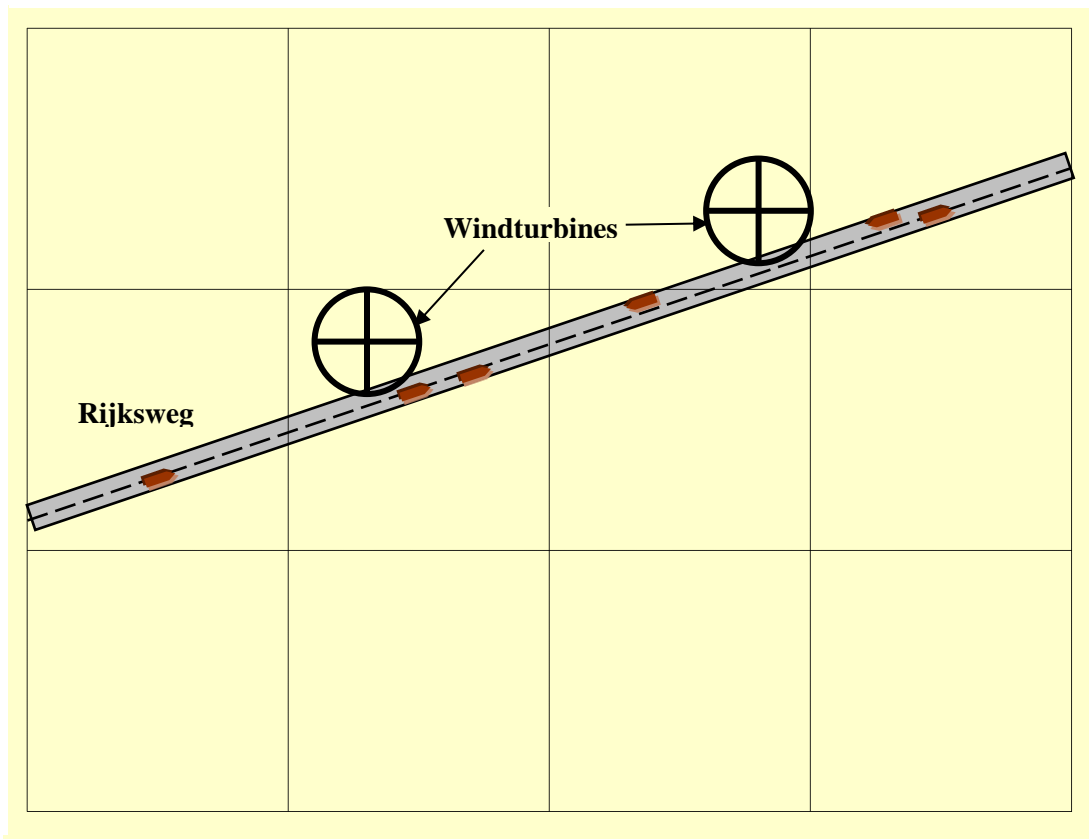
Indien de trefkans de 10% risicotoename op de intrinsieke faalkans overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet direct uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde transportroute ook na plaatsing van de windturbine nog voldoet aan de normen voor PR en GR_T .

5.4 Rekenvoorbeeld

Voorbeeld

In ons voorbeeld bevindt de rand van de weg (eigendom van Rijkswaterstaat) zich op een afstand van meer dan een halve rotordiameter. Het personenvervoer moet getoetst worden aan het IPR en MR [14]. De trefkans neemt relatief weinig af met het toenemen van de afstand tot de weg. Het aantal passages is een belangrijke factor.

Verder moet worden nagegaan of over de weg gevaarlijke stoffen worden getransporteerd. De trefkans van een auto met gevaarlijke stoffen moet getoetst worden aan het PR en het GR_T . In het voorbeeld hieronder staan 2 windturbines.



5.5 Contact

Bij eigenaar van de weg kan de projectontwikkelaar informatie inwinnen over de aard van het transport, het aantal passages van personen en goederentreinen en de geldende risicocriteria. Voor rijkswegen is dit Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat; T: 0800-8002; www.rijkswaterstaat.nl

6. WATERWEGEN

Net als voor wegen geldt dat vaarwegen ingedeeld kunnen worden naar hun beheerder op rijksniveau, provinciaal niveau, gemeentelijk niveau of private beheerder. Bij de eigenaar of beheerder van de waterweg kan informatie worden ingewonnen over de aard van het transport, het aantal passages van schepen en passanten en de geldende risicocriteria.

Voor de risicoanalyses wordt in de hoofdcategorie “waterwegen” onderscheid gemaakt in:

1. *Personenvervoer*. Hieronder vallen alle personen die zich verplaatsen over de waterweg in bijvoorbeeld plezierboten, jachten, roeiboten en vrachtboten.
2. *Vervoer van gevaarlijke stoffen*. Dit betreft bijvoorbeeld tankers met gevaarlijke stoffen.

6.1 Afstandseis

Rijkswaterstaat verleent namens de Minister van Infrastructuur en Milieu vergunning wanneer een windturbine op gronden van Rijkswaterstaat wordt geplaatst. Dit geldt ook wanneer een blad(deel) over het eigendom van Rijkswaterstaat draait. Rijkswaterstaat hanteert in artikel 4 van de “*Beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken*” de volgende afstandseis:

- windturbines dienen minimaal 50 meter uit de rand van de vaarweg te worden geplaatst.

Deze minimale afstand is gebaseerd op hinder voor wal- en scheepsradarapparatuur en op visuele hinder voor schippers en bedieningspersoneel. Binnen 50 meter uit de rand van de vaarweg wordt plaatsing slechts toegestaan indien uit aanvullend onderzoek blijkt dat er geen hinder voor wal- en scheepsradar optreedt en er geen visuele hinder optreedt.

Deze afstandseis hanteert RWS voor het verlenen van de vergunning. De afstandseis is niet van toepassing wanneer binnen het beïnvloedingsgebied van de windturbine gevaarlijke stoffen worden getransporteerd.

Ongeacht deze afstandseis, moet het IPR en MR en het GR_T berekend worden.

6.2 Risicomethodiek

6.2.1 Personenvervoer

Rijkswaterstaat hanteert het begrip Individueel passantenrisico (IPR) en Maatschappelijk Risico (MR) binnen haar werken. Het heeft geen algemene toepassing. Het IPR sluit aan bij de beleving van de passant, namelijk de overlijdenskans per passant per jaar. Hierbij wordt de passant gevolgd gedurende zijn bezigheden in de nabijheid van het windturbinepark. Het maatschappelijk risico is een maat voor

het verwachte aantal dode passanten per jaar en is een risicomaat voor de maatschappelijke beleving.

Wanneer de windturbines niet voldoen aan de afstandseis, moet in een aanvullende risicoanalyse het individueel passanten risico (IPR) en het maatschappelijk risico (MR) worden berekend (zie bijlage D, hoofdstuk 3 en [11]).

Voor het IPR wordt een passant beschouwd die jaarlijks het meest in de nabijheid van de windturbine(s) verkeert. Dit kan bijvoorbeeld een schipper van een vrachtboot zijn die dagelijks 2 keer het windpark passeert.

Voor het MR moet het totaal aantal personen worden bepaald dat jaarlijks door een turbineonderdeel getroffen kan worden.

6.2.2 Vervoer van gevaarlijke stoffen

Wanneer er gevaarlijke stoffen over het water vervoerd worden, moet worden nagegaan of plaatsing van de windturbines niet leidt tot een onaanvaardbaar verhoogd risico.

De catastrofale trefkans van een tanker met gevaarlijke stoffen moet worden bepaald. Dit is de kans dat een windturbineonderdeel de tanker treft en kapot maakt. Vervolgens dient de catastrofale trefkans te worden vergeleken met de risicocriteria. De trefkansen van objecten met gevaarlijke stoffen dienen berekend te worden conform de methoden in bijlage C.

Voor het in rekening brengen van de verblijfstijd moet speciale aandacht worden gegeven aan boten en schepen die zich langere tijd op één en dezelfde plek kunnen bevinden, bijvoorbeeld jachthavens, laad- en losplaatsen, of plaatsen waar goederen worden overgeslagen.

6.3 Risicocriteria

Windturbines geplaatst op gronden van Rijkswaterstaat vallen onder de beleidsregel van Rijkswaterstaat [14] en Rijkswaterstaat is zelf ook de vergunningverlener. Dit geldt ook wanneer een blad(deel) over het eigendom van Rijkswaterstaat draait. Voor alle waterwegen die geen eigendom zijn van Rijkswaterstaat maar bijvoorbeeld van de provincie of de gemeente, zijn geen algemene externe veiligheidsnormen van toepassing. In die situaties waarin de windturbine(s) niet op het eigendom van Rijkswaterstaat worden geplaatst, maar wel in de nabijheid van een rijkswaterweg, verzoekt Rijkswaterstaat het bevoegde gezag rekening te houden met de afstanden zoals in de beleidsregel zijn vermeld.

6.3.1 Personenvervoer

De normen voor het Individueel Passanten Risico en het Maatschappelijk Risico mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden.

Als maximaal toelaatbare waarde hanteert Rijkswaterstaat een IPR van 10^{-6} per jaar. Voor MR geldt dat niet meer dan $2 \cdot 10^{-3}$ passanten per jaar mogen overlijden.

6.3.2 Vervoer van gevaarlijke stoffen

De normen voor PR en GR_T mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden. Het Handboek beveelt aan dat de vergunningverlener in gevallen waarop deze situatie van toepassing is, toetst aan de risiconormen zoals beschreven in de “*Circulaire Risiconormering Vervoer Gevaarlijke Stoffen*” [12].

De tanker waar de gevaarlijke stoffen in worden vervoerd, heeft een eigen intrinsieke faalkans. Dit is de kans op bezwijken per jaar per eenheid trajectlengte van de tanker. De intrinsieke faalkans van tanker is over het algemeen te vinden in generieke databases. In de Handleiding Risicoberekeningen Bevi 3.2 [17] en SAFETI-NL [18] zijn standaard faalfrequenties opgenomen voor inrichtingen die onder Bevi vallen.

De windturbine mag niet leiden tot een significant verhoogd risico op de intrinsieke faalkans van de tanker. Als uitgangspunt kan een richtwaarde van 10% risicotoename worden gehanteerd.

Indien de trefkans de 10% risicotoename op de intrinsieke faalkans overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet direct uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde transportroute ook na plaatsing van de windturbine nog voldoet aan de normen voor PR en GR_T .

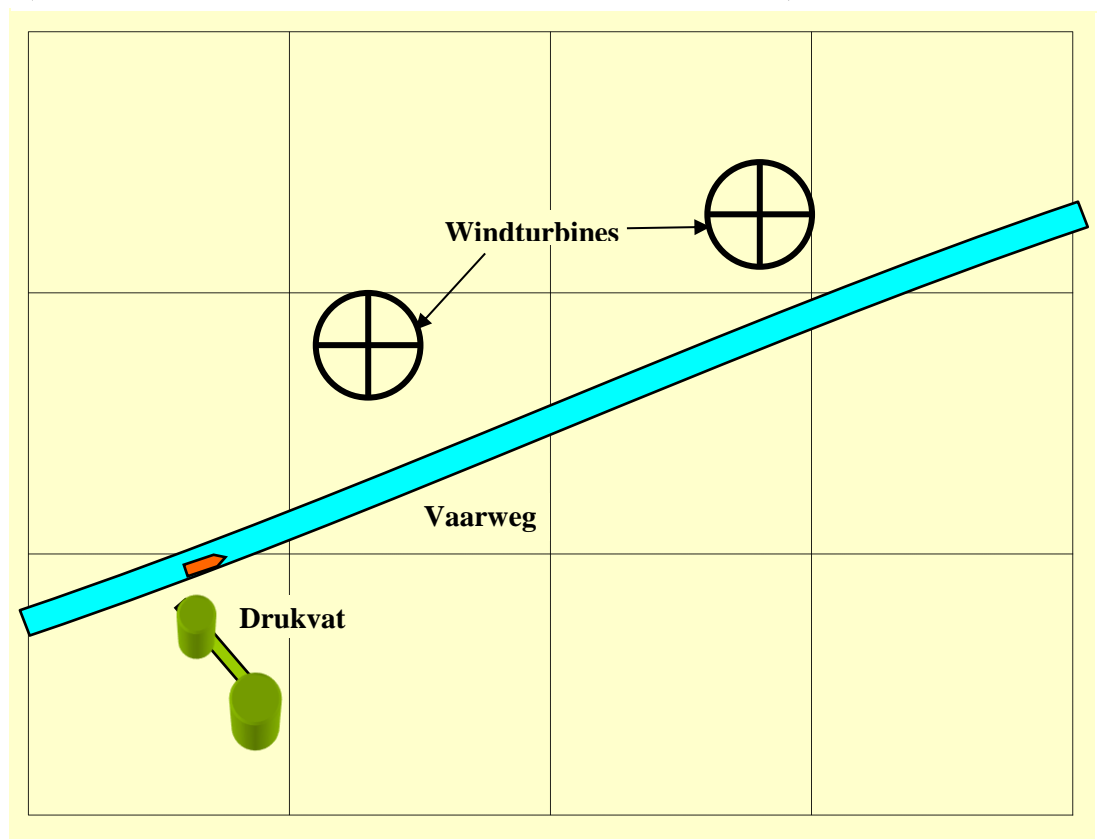
6.4 Rekenvoorbeeld

Voorbeeld

In ons voorbeeld is de vaarweg eigendom van de gemeente. Voor deze vaarweg zijn geen algemene veiligheidsnormen van toepassing. Wanneer de gemeente toch een risicoanalyse wil laten uitvoeren en toetsen kan ze gebruik maken van de beleidsrichtlijn van Rijkswaterstaat.

De vaarweg bevindt zich op meer dan een halve rotordiameter en meer dan 50 meter van de turbines. Voor passerende schepen hoeft geen risicoanalyse te worden uitgevoerd. Wel moet er gekeken worden naar de invloed van de windturbine op opslag van gevaarlijke stoffen.

Bij navraag blijkt dat bij het drukvat drie keer per maand explosief gas onder hoge druk wordt overgepompt van een schip naar het drukvat. De trefkans van het schip met de explosieve lading is kleiner dan 1% van de generieke bezwijkkans van gastankers zoals die in het “paarse boek” [7] gegeven zijn. Het bevoegd gezag besluit dat de toename van het risico verwaarloosbaar klein is. (De risico's voor het drukvat worden in Hoofdstuk 8 beschouwd.)



6.5 Contact

Bij eigenaar van de waterweg kan de projectontwikkelaar informatie inwinnen over de aard van het transport, het aantal passages van personen en goederentreinen en de geldende risicocriteria. Voor rijkswaterwegen is dit Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat; T: 0800-8002; www.rijkswaterstaat.nl

7. SPOORWEGEN

Alle hoofdspoorwegen⁵ in Nederland vallen onder de verantwoordelijkheid van ProRail⁶. ProRail verleent namens de Minister van Infrastructuur en Milieu vergunning⁷. Dit geldt ook wanneer (delen van) de turbinebladen over de gebieden waarbinnen vergunningplicht geldt draaien. Daarbuiten adviseert ProRail contact met hen op te nemen wanneer windturbines in de nabijheid van het spoor worden geplaatst.

Voor de risicoanalyses wordt de hoofdcategorie “spoorwegen” onderverdeeld in:

1. *personenvervoer*. Hieronder vallen alle personen die zich per trein verplaatsen: passagiers en personeel van personen- en goederentreinen
2. *vervoer van gevaarlijke stoffen*. Ook per trein worden gevaarlijke stoffen vervoerd, bijvoorbeeld in tankwagens.

In verband met de spoorwegveiligheid hanteert ProRail een afstandseis tussen windturbines en de spoorweg en dient het veiligheidsrisico voor personen en gevaarlijke stoffen te worden bepaald.

Op grond van artikel 19 van de Spoorwegwet dient bij ProRail een vergunning te worden aangevraagd voor plaatsing van windturbines wanneer een (deel van een) rotorblad binnen de vergunninggrenzen komt. De vergunningaanvraag wordt getoetst aan de eisen van de betrouwbaarheid, de beschikbaarheid, de onderhoudbaarheid en de veiligheid van de hoofdspoorweginfrastructuur. Een vergunning kan en mag alleen worden verleend als het veilig en ongestoord gebruik van de hoofdspoorweginfrastructuur niet in het geding komt.

7.1 Afstandseis

In het kader van de Ruimtelijke Ordening (bijv. bij de vaststelling van bestemmingsplannen) geeft ProRail het volgende plaatsingsadvies:

De minimale afstand tussen de windturbine en het dichtstbij gelegen spoor is:

- windturbines dienen minimaal 7,85 meter + halve rotordiameter, gemeten vanuit het hart van het dichtstbijzijnde spoor af te staan, met een minimum van 30 meter.

Deze afstandseis geldt ook ten aanzien van emplacementen en raccordementen.

Ongeacht deze afstandseis, moet het IPR en MR en het GR_T berekend worden.

⁵ Spoorwegen als zodanig aangewezen in het Besluit aanwijzing hoofdspoorwegen.

⁶ ProRail is houder van de beheerconcessie als bedoeld in artikel 16 van de Spoorwegwet.

⁷ Zie artikel 20 van de Spoorwegwet

7.2 Risicomethodiek

7.2.1 Personenvervoer

ProRail hanteert net als Rijkswaterstaat het begrip Individueel passantennisico (IPR) en Maatschappelijk Risico (MR) binnen zijn werken. Het heeft geen algemene toepassing. Het IPR sluit aan bij de beleving van de passant, namelijk de overlijdenskans per passant per jaar. Hierbij wordt de passant gevolgd gedurende zijn bezigheden in de nabijheid van het windturbinepark. Het maatschappelijk risico is een maat voor het verwachte aantal doden per jaar en is een risicomaat voor de maatschappelijke beleving.

Voor het berekenen van het IPR wordt een passant beschouwd die jaarlijks de langste tijd in de nabijheid van de windturbine(s) verkeert. Dit kan bijvoorbeeld een forens zijn die 200 dagen per jaar, 2 keer per dag met de trein een windpark passeert.

Voor het MR moet het totaal aantal personen worden bepaald dat jaarlijks door een windturbine(onderdeel) fataal getroffen kan worden.

7.2.2 Vervoer gevaarlijke stoffen

Wanneer er gevaarlijke stoffen over het spoor vervoerd worden, moet worden nagegaan of plaatsing van de windturbines niet leidt tot een onaanvaardbaar verhoogd risico.

De catastrofale trefkans van een tankwagon met gevaarlijke stoffen moet worden bepaald. Dit is de kans dat een windturbine onderdeel de tankwagon treft en kapot maakt. Vervolgens dient de trefkans te worden vergeleken met de risicocriteria. De trefkansen van objecten met gevaarlijke stoffen zoals tankwagens dienen berekend te worden conform de methoden in bijlage C.

Bij het in rekening brengen van de verblijfstijd moet speciale aandacht worden gegeven aan treinen die zich langere tijd op één en dezelfde plek kunnen bevinden, bijvoorbeeld op stations en emplacementen en raccordementen.

7.3 Risicocriteria

7.3.1 Personenvervoer

De normen voor het Individueel Passanten Risico en het Maatschappelijk Risico mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden.

Als maximaal toelaatbare waarde hanteert ProRail een IPR van 10^{-6} per jaar. Voor een infrastructuur waarop wettelijk toelaatbare snelheden boven de honderdzig kilometer per uur bestaan (bijvoorbeeld de Hoge Snelheidslijn) hanteert ProRail een toelaatbare IPR-waarde van 10^{-7} per jaar.

ProRail hanteert het MR criterium dat er jaarlijks niet meer dan $2 \cdot 10^{-3}$ passanten mogen overlijden.

7.3.2 Vervoer gevaarlijke stoffen

De normen voor PR en GR_T mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden. Het Handboek beveelt aan dat de vergunningverlener in gevallen waarop deze situatie van toepassing is, toetst aan de risiconormen zoals beschreven in de “Circulaire Risiconormering Vervoer Gevaarlijke Stoffen” [12].

De tankwagon waar de gevaarlijke stoffen in worden vervoerd, heeft een eigen intrinsieke faalkans. Dit is de kans op bezwijken per jaar per eenheid trajectlengte, meestal [kilometer/jaar] (bijvoorbeeld ten gevolge van aanrijdingen of andere ongelukken). De intrinsieke faalkans van een tanker is over het algemeen te vinden in generieke databases, zoals de Handleiding nRisicoberekeningen Bevi [17].

Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van de transportroute, zullen de voor de transportroute geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen kan in eerste instantie naar de toename van de faalfrequentie van het transport gekeken worden. ProRail accepteert een additioneel risico van maximaal 10% per kilometer per jaar.

7.4 Contact

Bij ProRail kan de projectontwikkelaar informatie inwinnen over de aard van het transport, het aantal passages van personen en goederentreinen en de geldende risicocriteria.

ProRail; T:088-2317104; www.prorail.nl

8. INDUSTRIE

Voor het verkrijgen van een vergunning voor windturbines is het noodzakelijk dat wordt voldaan aan de normen die voor Bevi-inrichtingen gelden. Voor industriegebieden wordt onderscheid gemaakt naar de volgende typen inrichtingen [1].

1. *Niet-categoriale inrichtingen.* Voor deze inrichtingen kan uitsluitend via een berekening worden bepaald welke afstand tot gevoelige objecten moet worden aangehouden om aan de geldende normen te voldoen.
2. *Categoriale inrichtingen.* Voor deze inrichtingen is een systematiek ontwikkeld waarbij per type inrichting uit een tabel kan worden afgelezen bij welke afstand wordt voldaan aan de norm (bijvoorbeeld LPG-tankstations). Plaatsing van windturbines kan echter betekenen dat de risicocontour van de categoriale inrichting groter wordt. Het wordt aangeraden om in het kader van "een goede ruimtelijke ordening" hierover in overleg te treden met het bevoegd gezag.

Daarnaast is er nog de categorie "*lichte industrie*" zoals werkplaatsen en kantoren, waar niet in continudienst gewerkt wordt en waar geen of slechts kleine hoeveelheden gevaarlijke stoffen worden gebruikt. Vanuit het oogpunt van risicoanalyses is deze categorie verder als "beperkt kwetsbare objecten" te beschouwen en te behandelen volgens de richtlijnen in hoofdstuk 4 "Bebouwing".

De projectontwikkelaar dient na te gaan welke activiteiten plaatsvinden op het nabijgelegen bedrijventerrein. Bij de eigenaar of beheerder van het bedrijventerrein of bij de gemeente of provincie kan hij navragen welke type inrichtingen zich op het terrein.

Inrichtingen worden niet gecategoriseerd als *kwetsbare* of *beperkt kwetsbare* objecten. De inrichtingen zelf moeten voldoen aan het plaatsgebonden risico, PR, en het groepsrisico voor inrichtingen, GR_I.

8.1 Risicomethodiek

8.1.1 Niet-categoriale Inrichtingen

De normen voor PR en GR_I mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden.

Voor deze inrichtingen kan uitsluitend via een berekening (QRA) worden bepaald welke afstand tot gevoelige objecten moet worden aangehouden om aan de geldende normen te voldoen. Om na te gaan of na plaatsing van een windturbine nog steeds wordt voldaan aan de normen voor PR en GR_I zal in de QRA rekening moeten worden gehouden met het treffen van de inrichting door een blad, mast of gondel.

De trefkans van nabijgelegen inrichtingen moet worden bepaald. Vervolgens dient de trefkans te worden vergeleken met de risicocriteria. De trefkansen van objecten op industriegebieden zoals opslagtanks dienen berekend te worden conform de methoden in bijlage C.

8.1.2 Categoriele Inrichtingen

De normen voor PR en GR_I mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden.

Voor de categoriele inrichtingen waarvoor geen QRA is uitgevoerd kan, als rekening moet worden gehouden met treffen door een blad, mast of gondel, een veel zwaarder Most Credible Accident gaan gelden dan in de reeds beschreven ongevalsscenario's en de daarbijbehorende preventieve maatregelen. Dit soort inrichtingen kan dus kwetsbaar blijken voor windturbines. In deze gevallen kan een QRA van de inrichting alsnog noodzakelijk zijn.

Voor faalmechanismen die in de ongevalsscenario's van de inrichting wél zijn beschouwd, zijn de faalfrequenties per jaar vaak bekend uit generieke databases. Met de beheerder van de inrichting moet worden afgestemd of de uit de databases bekende generieke faalfrequenties voor de specifieke situatie van toepassing zijn.

8.2 Risicocriteria

Het Handboek beveelt aan dat de vergunningverlener toetst op het Plaatsgebonden Risico (van de inrichtingen) en het Groepsrisico voor inrichtingen (GR_I). Het PR en GR_I zijn van toepassing op kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten buiten de inrichting of buiten het industrieterrein. Ook na plaatsing van de windturbines moet aan deze normen worden voldaan.

Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van de inrichting zullen de voor de inrichting geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen, kan in eerste instantie naar de toename van de catastrofale faalfrequentie van risicovolle installaties behorende tot de inrichting gekeken worden. Indien deze toename een bepaalde richtwaarde niet overschrijdt dan is plaatsing van de windturbine uit oogpunt van risicobeoordeling toegestaan. Als uitgangspunt voor deze richtwaarde kan 10% worden gehanteerd.

Indien de toename in de catastrofale faalfrequentie deze richtwaarde overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde installatie ook na plaatsing van de windturbine(s) nog voldoet aan de normen voor PR en GR_I. Toename van het risico van een inrichting kan echter leiden tot een vergroting van de risicoruimte van de inrichting, waardoor toekomstige uitbreiding kan worden bemoeilijkt. Dit kan een reden zijn voor de eigenaar van een inrichting om bezwaar te maken tegen plaatsing van de windturbine(s).

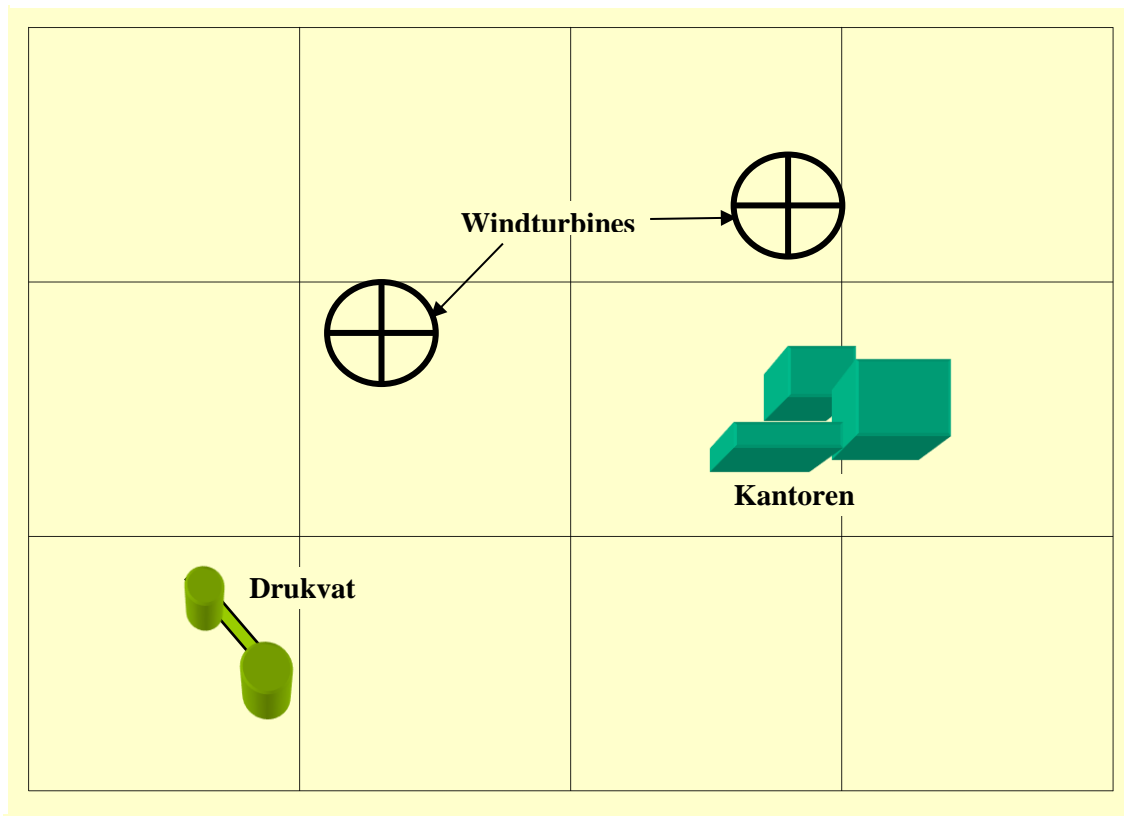
8.3 Rekenvoorbeeld

Stel dat een tank een intrinsieke faalfrequentie heeft van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar waarbij een gevaarlijke stof vrijkomt. De kans dat een windturbineonderdeel de tank treft en lek slaat is bepaald op $2 \cdot 10^{-5}$ per jaar. In dit geval neemt de kans op falen van de tank met maximaal 7% toe en de bijdrage van de windturbine aan het risico van de opslagtank is verwaarloosbaar. Wel kan het bevoegd gezag om gewichtige redenen besluiten om van de genoemde richtwaarde van 10% af te wijken. Indien de richtwaarde in dit voorbeeld lager dan 7% gesteld zou worden, dan kan worden besloten om alsnog een volledige kwantitatieve risicoanalyse uit te voeren voor de risicogevoelige inrichting.

Voorbeeld

In ons voorbeeld blijkt bij navraag dat het drukvat een categoriale inrichting is waarvoor geen QRA is uitgevoerd. In bijlage B worden gegevens verstrekt om de kans te berekenen dat een afbrekend blad het drukvat treft en lek slaat. Is deze kans kleiner dan 10% van de generieke bezwijkkans van drukvaten zoals die in het “paarse boek” [7] gegeven zijn, dan kan het bevoegd gezag besluiten dat het toegenomen risico verwaarloosbaar klein is.

De kantoren zijn te beschouwen als “niet kwetsbare objecten” en zijn reeds behandeld in hoofdstuk 3 “Bebouwing”. Het drukvat levert voor de kantoren geen verhoogd indirect risico op.



9. BUISLEIDINGEN

Voor buisleidingeigenaren als Gasunie geldt dat het van groot belang is de veiligheid en leveringszekerheid te kunnen garanderen. Voor Gasunie is de leveringsplicht wettelijk vastgelegd. Windturbines kunnen deze veiligheid en leveringszekerheid in gevaar brengen doordat er een kans bestaat dat een falende windturbine (of onderdelen daarvan) de buisleiding (deels) beschadigt. Wanneer er gevaarlijke stoffen door de leiding worden getransporteerd, kunnen er bij beschadiging ook slachtoffers vallen.

Buisleidingen worden in dit Handboek onderverdeeld in:

1. leidingen waardoor *ongevaarlijke stoffen* worden getransporteerd, zoals drinkwaterleidingen, rioleringen, en stadsverwarming
2. leidingen waardoor *gevaarlijke stoffen* worden getransporteerd, zoals aardgasleidingen of petrochemische leidingen.

Voor leidingen waardoor ongevaarlijke stoffen worden getransporteerd, bestaan geen risicocriteria. Deze hoeven in een risicoanalyse dan ook niet te worden beschouwd. De hierna volgende paragrafen hebben dus alleen betrekking op leidingen waardoor gevaarlijke stoffen worden getransporteerd.

9.1 Afstandseis

Voor zowel bovengrondse als ondergrondse buisleidingen adviseert Gasunie een afstand aan te houden waarbuiten geen significante negatieve invloed van een windturbine te verwachten is. Deze afstand hangt samen met de gevolgen voor de omgeving wanneer de windturbine omvalt of een blad afbreekt.

Voor ondergrondse buisleidingen adviseert Gasunie een afstand van:

- maximale werpafstand bij nominaal toerental

Voor bovengrondse buisleidingen adviseert Gasunie een afstand van:

- maximale werpafstand bij overtoeren

Voor bovengrondse buisleidingen is het Bevb van toepassing en moet de windturbine getoetst worden aan de Bevb

9.2 Rekenmethodiek

Voor ondergrondse buisleidingen is het Bevb van toepassing en moet zowel het Plaatsgebonden Risico (PR) en het Groepsrisico voor transportroutes (GR_T) berekend worden. Tevens moet worden getoetst of het GR_T voor het bevoegd gezag acceptabel blijft.

Voor bovengrondse buisleidingen is het Bevb van toepassing en moet de windturbine getoetst worden aan de Bevb. Bovengrondse transportleidingen binnen een inrichting vallen onder de categorie “Industrie” zoals behandeld in hoofdstuk 8.

De catastrofale trefkans voor ondergrondse en bovengrondse buisleidingen wordt berekend conform bijlage C.

9.3 Risicocriteria en toetsing

Voor leidingbreuk van leidingen met gevaarlijke stoffen zijn faalfrequenties vastgesteld waarmee in het kader van het Bevb gerekend dient te worden. Met de beheerder van de buisleiding moet worden afgestemd welke faalfrequentie voor de specifieke situatie van toepassing is.

Ondergrondse buisleidingen

Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van ondergrondse buisleidingen, zullen de voor de leiding geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen kan in eerste instantie naar de toename van de faalfrequentie van de leiding gekeken worden. Indien deze toename verwaarloosbaar is, dan is plaatsing van de windturbine uit oogpunt van risicobeoordeling toegestaan. Gasunie hanteert als beleid dat leidingen buiten de maximale worpafstand bij nominaal toerental moeten blijven.

Bovengrondse buisleidingen

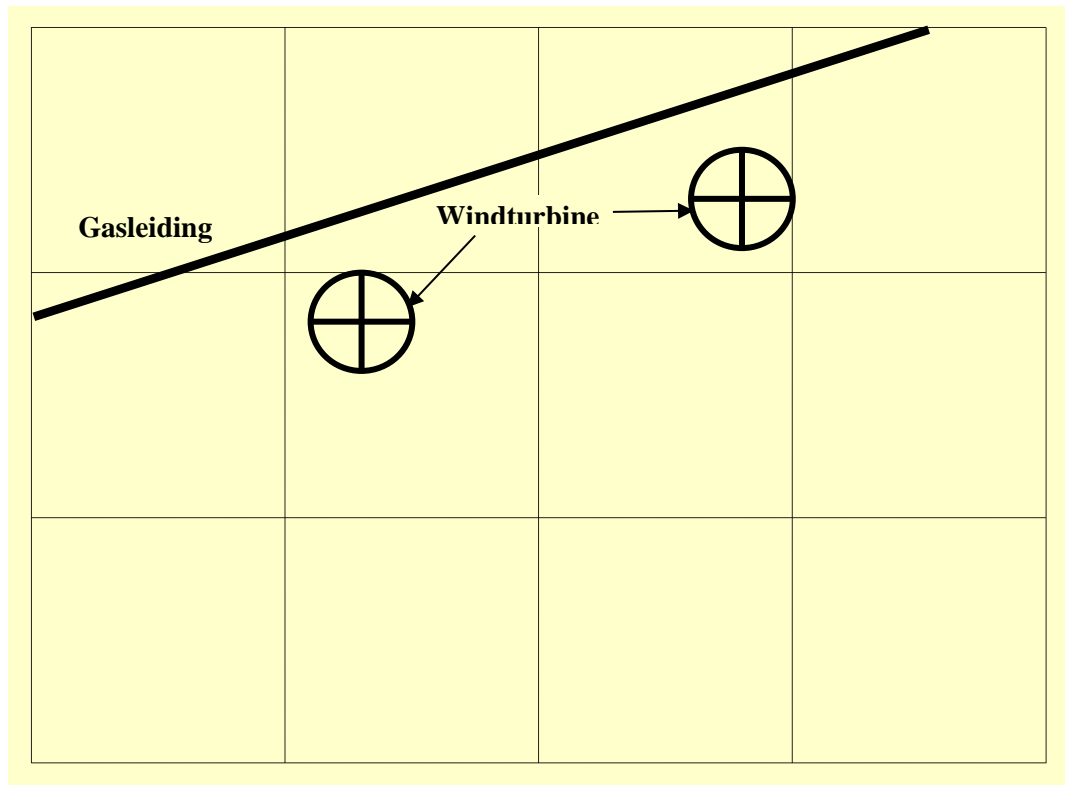
Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van bovengrondse buisleidingen, zullen de voor de leiding geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen kan in eerste instantie naar de toename van de faalfrequentie van de leiding gekeken worden. Indien deze toename een bepaalde richtwaarde niet overschrijdt, dan is plaatsing van de windturbine uit oogpunt van risicobeoordeling toegestaan. Als uitgangspunt voor deze richtwaarde kan 10% worden gehanteerd.

Indien de toename in de catastrofale faalfrequentie deze richtwaarde overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde leiding ook na plaatsing van de windturbine nog voldoet aan de normen voor PR en GR_T . Toename van het risico van een transportleiding kan echter leiden tot een vergroting van de risicoruimte van de leiding, waardoor toekomstige uitbreiding kan worden bemoeilijkt.

9.4 Rekenvoorbeeld

Voorbeeld

In dit voorbeeld worden windturbines binnen de maximale bladworpafstand gepositioneerd, maar buiten het effectgebied van een vallende mast of gondel. Met behulp van bijlage C is een analyse uitgevoerd, waarbij ook de diepte van de leiding, de leidingparameters, de rotatie van het blad, en de kinetische energie in het blad zijn beschouwd. Hieruit blijkt dat de kans op bezwijken van de leiding als gevolg van bladbreuk een factor 1000 lager is dan de basis faalfrequentie van de leiding. De eigenaar beoordeelt dat het toegenomen risico verwaarloosbaar klein is. Ook na plaatsing van de windturbines voldoet de gasleiding nog steeds aan de geldende risicocriteria uit de BEVB.



9.5 Contact

Bij de betreffende tracébeheerder van Gasunie kan de projectontwikkelaar informatie inwinnen over de breukkans van Gasunie leidingen.

Gasunie; T: 050 521 91 11; www.gasunie.nl.

10. HOOGSPANNINGS INFRASTRUCTUUR

Dit Handboek neemt zowel bovengrondse als ondergrondse hoogspannings infrastructuur op.

De reden hiervoor is dat het bezwijken van deze infrastructuur tot grote maatschappelijke ontwrichting kan leiden. Voor eigenaren van hoogspanningsinfrastructuur, zoals TenneT, is het van groot belang om de leveringszekerheid van elektriciteit te kunnen garanderen. TenneT (TenneT TSO BV) heeft op grond van de Elektriciteitswet 1998 de plicht te zorgen voor voldoende capaciteit voor het transport van elektriciteit en daarmee te voorzien in de (inter)nationale elektriciteitsbehoefte. Om aan deze verplichtingen te voldoen beheert TenneT het transportnetwerk van 110kV tot en met 380kV. Naast het beheer van bestaande assets heeft TenneT tevens als taak - waar dat noodzakelijk is voor een robuust netwerk - voorbereiden en realiseren van nieuwe assets. De assets betreffen lijnen (110, 150, 220, 380 kV), kabels (110, 150, 380), masten (vakwerk en wintrack inclusief opstijgpunten) en stations (met of zonder transformator) en bijbehorende hulpmiddelen.

Windturbines kunnen de leveringszekerheid in gevaar brengen doordat er een kans bestaat dat een falende windturbine (of onderdelen daarvan) de hoogspanningsinfrastructuur van TenneT (deels) beschadigt. TenneT heeft een leveringsplicht waaraan ze moet voldoen. TenneT zal bezwaar maken tegen plaatsing van een windturbine in de nabijheid van hun hoogspanningsinfrastructuur als naar het oordeel van TenneT de leveringszekerheid in gevaar wordt gebracht.

Voor andere boven- of ondergrondse lijnen of kabels zoals kabels voor telecom en centrale antenne en midden- of laagspannings infrastructuur, bestaan geen risicocriteria waaraan getoetst hoeft te worden. Wanneer afbrekende windturbineonderdelen ondergrondse kabels treffen is het onwaarschijnlijk dat er direct of indirect slachtoffers vallen.

10.1 Afstandseis

TenneT acht het risico van windturbines op hun infrastructuur aanvaardbaar wanneer wordt voldaan aan de volgende afstandseis. TenneT adviseert daarom deze afstandseis aan te houden.

Er dient een vrije ruimte aangehouden te worden die minimaal gelijk of groter is dan de maximale werpafstand bij nominaal toerental van de betreffende windturbine, zoals beschreven en aangeduid in tabel 2 van dit handboek (generieke waarden voor werpafstanden, zie ook bijlage B).

Staat het type windturbine niet in deze tabel dan wordt uitgegaan van de maximale werpafstand van het type (bijv. turbine type met ashoogte 80 m en vermogen 1500kW, dan is de aan te houden afstand die van windturbintype 2000kW en 80 meter).

Indien (nog) niet bekend is welke windturbine geplaatst gaat worden dan wordt uitgegaan van de maximale werpafstand bij nominaal toerental te weten 245 meter.

10.2 Risicoanalyse en -criteria

Wanneer niet wordt voldaan aan de afstandseis, vraagt TenneT om met hen in overleg te treden. TenneT kijkt op basis van het concrete geval welk risico voor de betreffende asset op dat moment kan worden aanvaard. Dit kan niet generiek worden bepaald, omdat het onder andere afhankelijk is van het soort asset, de locatie van de windturbine, type windturbine etc. Daartoe is het doorgaans vereist een risicoanalyse uit te voeren zoals beschreven in Bijlage C.

10.3 Contact

Bij TenneT kan de projectontwikkelaar informatie inwinnen.

TenneT; T: 026 373 11 11; www.tennet.eu

12. DIJKLICHAMEN EN WATERKERINGEN

Waterkeringen kunnen worden ingedeeld naar hun functie in:

- primaire dijken (water-land)
- secundaire dijken (land-land)
- dammen (water-water).

Waterkeringen zijn in beheer bij Rijkswaterstaat of de waterschappen.

Naast calamiteiten met de windturbine bestaan er nog vijf mogelijke faalmechanismen (lokale en interne erosie, zetting, afschuiven, en zettingsvloeiing). Deze worden in dit Handboek verder niet behandeld. Het belang van de verschillende veiligheidsaspecten is afhankelijk van de plaats van een windturbine in het dwarsprofiel.

12.1 Afstandseis

Rijkswaterstaat verleent namens de Minister van Infrastructuur en Milieu vergunning wanneer een windturbine op het gronden van Rijkswaterstaat wordt geplaatst. Dit geldt ook wanneer een blad(deel) over het eigendom van Rijkswaterstaat draait. Rijkswaterstaat hanteert in artikel 7 van de “Beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken” de volgende eis:

- Plaatsing van windturbines wordt niet toegestaan in de kernzone van de primaire waterkering. Onder kernzone wordt verstaan het eigenlijke dijk-, duin- of damlichaam zijnde de primaire waterkering als bedoeld in de Wet op de waterkering.
- Plaatsing van windturbines buiten de kernzone van de primaire waterkering, wordt slechts toegestaan mits dit geen negatieve gevolgen heeft voor de waterkerende functie van de primaire waterkering conform de veiligheidsnorm van de Waterwet [19].

Indien RWS vergunningverlener is, wordt deze eis gesteld voor het verlenen van de vergunning.

12.2 Risicocriteria en Toetsing

De dijkbeheerders in Nederland moeten ervoor zorgen dat hun primaire waterkeringen voldoen aan de veiligheidseisen die de Wet op de waterkeringen stelt. De toetsing dient te worden uitgevoerd aan de hand van de Leidraad toetsen op veiligheid (Leidraad) [4], uitgebracht door de Technisch Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). Echter, er is geen specifieke op windturbines toegespitst beoordelingsschema opgenomen in de Leidraad.

In het algemeen kan gesteld worden dat de risico's als gevolg van het plaatsen van windturbines niet mogen leiden tot een verhoogde bezwijkkans van de dijklichamen. Generieke bezwijkkansen van dijklichamen zijn niet voorhanden.

Elke dijkring in Nederland is ontworpen en getoetst aan een Maatgevende Hoogwaterstand (MHW). De kans dat deze waterstand niet gekeerd kan worden, is afhankelijk van de economische functies in het achterland. Veel voorkomende waarden zijn één keer in de 1.250, 2.000 of 10.000 jaar; voor een dijk bij Rotterdam gelden strengere eisen dan voor bijvoorbeeld een dijk bij het IJsselmeer.

De resultaten van een risicoanalyse van een windturbine kunnen getoetst worden aan de ontwerpwaarden die zijn gebruikt voor de kans van voorkomen van een MHW.

Het bepalen van de gevolgschade aan het dijklichaam wordt in de bijlage niet behandeld. De gevolgschade is namelijk erg afhankelijk van onder andere de grondsoort van de dijk en zijn functie. Het vaststellen van de gevolgschade dient in overleg met de beheerder van het dijklichaam te gebeuren.

12.3 Contact

Bij plaatsing van windturbines nabij waterkeringen is een vergunning of ontheffing noodzakelijk op grond van de Wet Beheer Rijkswaterstaatswerken (WBR) of de geldende provinciale dijkverordening. De vergunningverlenende instantie is de dienstkring van Rijkswaterstaat of het waterschap.

- Rijkswaterstaat, www.rijkswaterstaat.nl, telefoon 0800-8002
- Waterschappen, lokale contactorgaan te vinden op www.waterschappen.nl

13. BRONMAATREGELLEN EN MITIGERENDE MAATREGELLEN

Wanneer een windturbine niet aan de risicocriteria voldoet, kan gekeken worden naar maatregelen om het risico dat de windturbine veroorzaakt te beperken.

Maatregelen ter beperking van het risico zijn te verdelen in bronmaatregelen en mitigerende maatregelen. Bronmaatregelen zijn op de windturbine zelf van toepassing en hebben het doel de kans van falen van de windturbine te verlagen en/of de gevolgen van falen te verkleinen. Mitigerende maatregelen zijn juist van toepassing op het te beschermen object en bedoeld om, gegeven een ongeval, het gevolg te verkleinen.

13.1 Bronmaatregelen

Vanuit de windturbine of het windpark kunnen de volgende bronmaatregelen gehanteerd worden:

- ashoogteverlaging,
- toerentalverlaging in combinatie met vermogensbeperking,
- sectormanagement,
- verhoging IEC klasse voor mast en fundering.

Wanneer blijkt dat voor een bepaalde locatie het additionele risico van de windturbine te hoog is, is het in een aantal gevallen mogelijk om bronmaatregelen toe te passen. Wanneer deze bronmaatregelen leiden tot een acceptabel additioneel risiconiveau kan de windturbine of het windpark alsnog voldoen aan de risico-eisen.

13.1.1 Ashoogteverlaging

Indien uit de risicoanalyse volgt dat het additionele risico van een object te hoog is en dit object op de rand, of net aan de binnenzijde, van het gebied met verhoogd risico ligt kan ashoogteverlaging een optie zijn om het risico binnen aanvaardbare grenzen te krijgen.

Door de ashoogte van de windturbine te verlagen, worden de effectafstanden van mastbreuk en bladafworp verkleind. Indien de betreffende infrastructuur binnen of op de rand van de maximale effectafstand ligt, kan door ashoogteverlaging worden bereikt dat deze buiten het gebied van de trefkans komt te liggen.

Ondermeer afhankelijk van de geplande ashoogte, is het mogelijk om de ashoogte met 10 tot 20% te verlagen zonder dat dit technische consequenties voor het windturbineontwerp heeft. Het merendeel van de windturbineleveranciers kunnen hun windturbines met verschillende ashoogtes leveren. Ter

illustratie, windturbines met 90 tot 100 meter rotordiameter worden grotendeels met 100 tot 110 meter ashoogte uitgevoerd, maar 80 meter ashoogte is eveneens mogelijk.

Ashoogteverlaging verkleint eveneens het risicogebied bij mastfalen en afworp van de rotor en gondel.

13.1.2 Toerentalverlaging in combinatie met vermogensbeperking

Toerenverlaging als preventieve maatregel heeft als resultaat dat de afworpafstand van de rotorbladen afneemt.

Toerenverlaging kan enkel worden gerealiseerd in combinatie met verlaging van het nominaal vermogen. De bijbehorende verlaging in vermogen dient met de leverancier afgestemd te worden. Als vuistregel kan gehanteerd worden dat de afname in nominaal vermogen evenredig is met de toerentalverlaging. Ter illustratie, 10% toerentalverlaging leidt tot 10% verlaging van het vermogen.

Ten gevolge van de toerentalverlaging is het niet mogelijk om de generieke afstanden, als functie van geïnstalleerd vermogen, toe te passen. De gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd op het nominale toerental behorende bij het overeenkomstige vermogen.

Met behulp van de formules voor kogelbaanberekeningen dienen voor het verlaagde toerental opnieuw de afworpafstanden van het rotorblad bepaald te worden.

Door toerentalverlaging neemt naar alle waarschijnlijkheid ook de faalfrequentie van de windturbines af voor een deel van de scenario's. Dit kan echter niet gekwantificeerd worden en om deze reden wordt hiermee geen rekening gehouden.

13.1.3 Sectormanagement

In windparken wordt regelmatig sectormanagement toegepast. Dit houdt in dat indien de wind uit vooraf gedefinieerde windrichtingen komt het vermogen van het windpark, of van enkele windturbines, wordt beperkt. De meest voorkomende reden om sectormanagement toe te passen is het verlagen van de turbulentie-intensiteit bij windturbines die in zog van andere windturbines worden aangestroomd.

Sectormanagement kan eveneens toegepast worden als bronmaatregel om het additionele risico, ten gevolge van de windturbines, op een object te verlagen. Sectormanagement biedt geen oplossing bij mast- en gondelfalen, maar wel bij bladafworp. Bij bladafworp is de richting veelal in het vlak van de rotor terwijl de richting van vallen bij mast- en gondelfalen meer willekeurig is. Om deze reden is sectormanagement enkel voor het bladafworpsценario zinvol. Indien een object slechts getroffen kan

worden door een afgebroken rotorblad bij een beperkt aantal gondelposities, kan sectormanagement voor een verlaagd risiconiveau zorgen.

Als preventieve maatregel kan het volgende toegepast worden:

- stilzetten van één of meerdere windturbines in vooraf bepaalde gondelposities, het risico door bladafworp wordt in deze gondelposities daarmee gelijk aan nul
- verlagen van het toerental/vermogen van één of meerdere windturbines in vooraf bepaalde gondelposities, het risico door bladafworp wordt in deze gondelposities verlaagd.

13.1.4 IEC-klasse verhoging

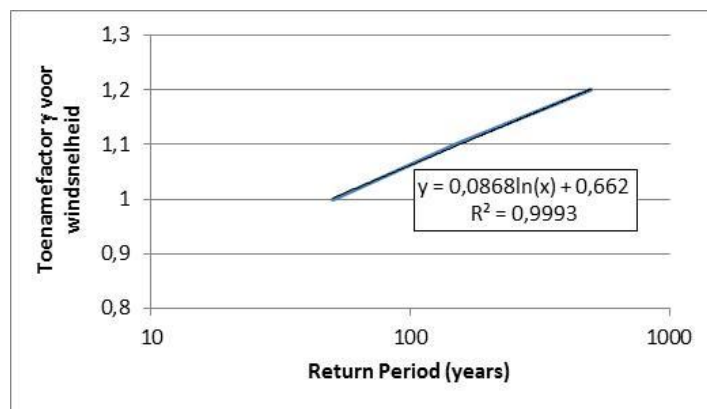
De windklasse van een gebied is bepalend voor welk type windturbine geschikt is om op deze locatie te plaatsen. De IEC heeft drie turbineklassen ingedeeld voor hoge, gemiddelde en lage wind.

Wanneer een turbine wordt geplaatst met een hogere IEC klasse dan dat voor die locatie noodzakelijk is, kun je stellen dat de turbine ‘overgedimensioneerd’ is. Hierdoor kan een reductiefactor van 1,6 op de faalkans voor mastbreuk worden toegepast. De reductiefactor is alléén van toepassing op mastbreuk. De afleiding voor deze reductiefactor is hieronder weergegeven.

De IEC 61400-1 beschrijft de eigenschappen van de drie klasse als volgt:

| Turbine Class | IEC I High Wind | IEC II Medium Wind | IEC III Low Wind |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Annual average wind speed | 10 m/s | 8.5 m/s | 7.5 m/s |
| Extreme 50-year gust | 70 m/s | 59.5 m/s | 52.5 m/s |
| Turbulence classes | A 18% B 16% | A 18% B 16% | A 18% B 16% |

Wanneer een turbine klasse I wordt geplaatst op een klasse IEC II locatie, kun je stellen dat de turbine ‘overgedimensioneerd’ is. De verwachting is dat de faalkans van de turbine gereduceerd wordt. Om hier een reductiefactor voor te bepalen is gebruik gemaakt van de norm IEC 60826 ‘Design criteria of overhead transmission lines’ waarin aangegeven wordt met welke factor de maximale windsnelheid wordt verhoogd wanneer de zgn. terugkeerperiode toeneemt. In grafiekvorm ziet dit er als volgt uit:



De toenamefactor γ is gerelateerd aan de windsnelheidstoename en niet aan de belasting door de wind. Het is een klimatologische factor en daarmee algemeen toepasbaar, onafhankelijk van het type bouwwerk. De grafiek geeft aan dat een grotere windvlaag (grotere γ) zeldzamer is en dus een grotere terugkeer-periode kent. Ter verduidelijking het volgende voorbeeld. Stel dat bij een terugkeerperiode van 50 jaar de overleefwindsnelheid gelijk is aan 52,5 m/s. Dan wordt bij een terugkeerperiode van 150 jaar de bijbehorende overleefwindsnelheid gelijk aan $52,5 \cdot 1,1$ (57,8 m/s).

Voor de verschillende IEC klasse geldt een verschillende 'extreme 50-year gust'. De tolerantie toename is als volgt:

Van IEC 2 naar IEC 1: $70 / 59,5 = 1,17$

Van IEC 3 naar IEC 2: $59,5 / 52,5 = 1,13$

Deze tolerantietoename van de extreme windsnelheid kan vergeleken worden met de toenamefactor γ als weergegeven in Figuur x. Wanneer conservatief een toename van 1,13 wordt aangehouden, gaat de terugkeerperiode van 50 jaar naar 220 jaar, een toename van een factor 4,4 en dit is gelijk te stellen aan een reductiefactor van 4,4 voor het falen van de mast ten gevolge van overbelasting door wind.

Falen van de windturbine wordt ook veroorzaakt door andere oorzaken dan overbelasting van wind., zoals ontwerp-, materiaal- en onderhoudsfouten. Er wordt conservatief aangenomen dat de kans van het falen van een windturbine slechts in de helft van de gevallen wordt veroorzaakt door overbelasting door wind. De reductiefactor van 4,4 voor verhoging van een IEC-klasse grijpt daardoor in op de helft van de faalkans voor mastbreuk. De nieuwe faalkans wordt daarmee $(0,5/4,4) + 0,50 = 0,61$ * oude faalkans, een reductie van een factor 1,63. Voorgesteld wordt om conservatief te rekenen met een factor 1,6.

13.2 Mitigerende maatregelen

Mitigerende maatregelen zijn van toepassing op het te beschermen object. Vanwege de grote massa's van de verschillende windturbine onderdelen, zijn mitigerende maatregelen niet altijd praktisch haalbaar. Het beveiligen van een bovengronds object (gasleiding, hoogspanningsmast, kabel etc.) door

het aanbrengen van een beschermende omhulling (door middel van bijvoorbeeld gewapend beton of een stalen constructie) is slechts zeer beperkt toepasbaar, en wanneer het al toepasbaar is, zal het de kans op falen in beperkte mate beïnvloeden. Alleen wanneer de constructie zodanig stevig is, dat de impact van de tip kan worden weerstaan kan de in de voorgestelde rekenmethodiek ten aanzien van bladafworp de term $2/3$ bladlengte worden vervangen door $1/3$ bladlengte. Hierbij zal moeten worden aangetoond dat de constructie van het object bestand is tegen de impact die de buitenste $1/3$ deel van het blad kan veroorzaken. Aan beide zijden van het massamiddelpunt telt $1/3$ deel van de bladlengte mee, wat het overgrote deel van de massa van het blad vertegenwoordigt.

Afgezien van een beschermende constructie bestaan slechts enkele maatregelen die niet uitsluitend betrekking hebben op de faalkansen van windturbines. Zo zijn afstand (tussen windturbine en infrastructuur/object), diepteligging (voor ondergrondse objecten) en sterkte van objecten mogelijkheden om de kans op schade door windturbines te beperken.

Ondergrondse infrastructuur kan bijvoorbeeld worden afgedekt met beschermende stalen of betonnen platen. Deze zullen echter een grote dikte moeten hebben om een deel van de energie op te vangen. De schokgolf zal deels door de platen heen worden doorgegeven, waardoor de ondergrondse infrastructuur blootgesteld blijft aan de schokgolf. Om deze reden worden afdekplaten niet gezien als een doeltreffende mitigerende maatregel. Indien platen wel als maatregel worden toegepast, zal moeten worden aangetoond voor welke scenario's de platen doeltreffend zijn. Een randvoorwaarde is dat de functionaliteit van het beschermde object niet in geding komt en dat er voldoende afstand bestaat tussen de plaat en de kabel of leiding, waardoor de plaat niet met de kabel of leiding in kan aanraking komen.

REFERENTIES

- [1] Besluit van 27 mei 2004, houdende milieukwaliteitseisen voor externe veiligheid van inrichtingen milieubeheer (*Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen*), Staatsblad 2004, 250.
- [2] *Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen; Beoordeling van veiligheidsrisico's*, Rijkswaterstaat en NS Railinfrabeheer, Doc. Nr. VRWP-99004, 15 april 1999.
- [3] *Activiteitenbesluit milieubeheer, Besluit algemene regels voor inrichtingen*. Besluit van 19 oktober 2007.
- [4] *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen*, Stowa, Utrecht 2007.
- [5] *Windturbines op of langs waterkeringen, een kennisinventarisatie*, STOWA 2011-W-04. Utrecht, 2007.
- [6] *PGS 3, Guidelines for quantitative risk assessment*, Ministerie van Buitenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, SZW en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, december 2005.
- [7] IEC 61400-1, 3rd edition 2005, “*Wind turbine generator systems – Part 1: Design Requirements*”
- [8] IEC 61400-22 first edition 2010: “*Part 22: Conformity testing and certification*”, 2010.
- [9] Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Directoraat-generaal Rijkswaterstaat, “*Beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken*”, Staatscourant 2 juli 2002, nr. 123 / pag. 13.
- [10] *Circulaire Risiconormering vervoer gevaarlijke stoffen*; Ministeries Verkeer en Waterstaat, Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties en VROM, Staatscourant 4 augustus 2004, nr 147/pagina 16
- [11] Besluit van 7 oktober 2004, houdende vaststelling van het tijdstip van inwerkingtreding van het Besluit externe veiligheid inrichtingen, Staatsblad 2004, 521.
- [12] *Veilig vervoeren, veilig werken, veilig leven met spoor, Derde Kadernota Railveiligheid*. Ministerie van Verkeer & Waterstaat, 2010.
- [13] *Wet algemene bepalingen omgevingsrecht*, wet van 6 november 2008.
- [14] Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2006) *Nota Vervoer Gevaarlijke stoffen*, beleidsnota.
- [15] DNV KEMA (2012) *Rekenmethodiek zonering windturbines*, in opdracht van NV Nederlandse Gasunie en Tennet TSO B.V., 18 december 2012, 74101452 GCS 12.R.53190

- [16] RIVM (2012) *Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid*, RIVM rapport 620550009/2012 DORA 11-04. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/620550009.pdf>
- [17] Handleiding Risicoberekeningen Bevi, RIVM, juli 2009.
- [18] SAFETI-NL, Rekenmethodiek Bevi, DNV.
- [19] Waterwet, 29 januari 2009.
- [20] Besluit van 24 juli 2010, houdende milieukwaliteitseisen externe veiligheid voor het vervoer van gevaarlijke stoffen door buisleidingen (Besluit externe veiligheid buisleidingen)

DEFINITIES EN AFKORTINGEN

Risicoanalyse

| | |
|------------------------|--|
| Bevi: | Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen |
| Bevb: | Besluit Externe Veiligheid Buisleidingen |
| GR: | Groepsrisico |
| GR_I: | Groepsrisico voor inrichtingen |
| GR_T: | Groepsrisico voor transportroutes |
| I&M: | Ministerie van Infrastructuur en Milieu |
| IPR: | Individueel passantenrisico |
| PR: | Plaatsgebonden risico |
| MHW: | Maatgevende Hoogwaterstand |
| MR: | Maatschappelijk risico |
| NWEA: | Nederlandse Windenergie Associatie |
| QRA: | Quantitative Risk Assessment - kwantitatieve risicoanalyse |
| Revb: | Regeling Externe Veiligheid Buisleidingen |
| RWS: | Rijkswaterstaat |
| Wabo: | Wet algemene bepalingen omgevingsrecht |

Bevoegd gezag: Bestuursorgaan dat bevoegd is een vergunning te verlenen voor plaatsing van een windturbine of een windpark.

Direct risico: Kans op het direct tot slachtoffers leiden door falen van de windturbine.

Faalkans: Kans op bladbreuk of de kans op een ander scenario, meestal uitgedrukt in [per jaar].

Groepsrisico (GR): Cumulatieve kans per jaar dat een aantal personen overlijdt als rechtstreeks gevolg van hun aanwezigheid in het invloedsgebied van een inrichting leiding met gevaarlijke stof of transportroute en een ongewoon voorval binnen die inrichting, leiding of route.

Er zijn twee normen voor het groepsrisico:

- **groepsrisico voor inrichtingen** (in dit Handboek afgekort als **GR_I**): De norm voor het GR_I is dat een ongeval met 10 doden of meer slechts met een kans van één op de honderdduizend per jaar mag voorkomen (10^{-5} per jaar) en een ongeval met 100 of meer doden slechts met een kans van één op de 10 miljoen jaar (10^{-7} per jaar), et cetera

- **groepsrisico voor transportroutes en leidingen** (in dit Handboek afgekort als **GR_T**): De norm voor het GR_T is dat een ongeval met tien doden of meer slechts met een kans van één op de tienduizend per jaar mag voorkomen (10^{-4} per jaar) en een ongeval met 100 of meer doden slechts met een kans van één op de miljoen jaar (10^{-6} per jaar) et cetera, per kilometer transportroute.

Indirect risico: Kans op het indirect tot slachtoffers leiden door falen van de windturbine (voorbeeld: een nabijgelegen object wordt getroffen door falen van de windturbine, en vormt vervolgens een risico voor de omgeving).

Individueel passantenrisico (IPR): Dit begrip wordt gebruikt door Rijkswaterstaat en ProRail binnen hun werken. Het heeft geen algemene toepassing. Voor het risico voor de passant is een risicomat gekozen die aansluit bij de individuele beleving van de passant, namelijk de overlidenskans per passant per jaar. Hierbij wordt de passant gevolgd gedurende zijn bezigheden in de nabijheid van het windturbinepark. Als toelaatbare waarde hanteren Rijkswaterstaat en ProRail 10^{-6} per jaar. Voor een infrastructuur waarop wettelijk toelaatbare snelheden boven de honderdzesig kilometer per uur bestaan (bijvoorbeeld de Hoge Snelheidslijn) hanteert ProRail een toelaatbare waarde van 10^{-7} per jaar.

Beperkt kwetsbaar object:

- a. 1°. verspreid liggende woningen van derden met een dichtheid van maximaal twee woningen per hectare, en 2°. dienst- en bedrijfswoningen van derden;
- b. kantoorgebouwen, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen;
- c. hotels en restaurants, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen;
- d. winkels, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen;
- e. sporthallen, zwembaden en speeltuinen
- f. sport- en kampeerterreinen en terreinen bestemd voor recreatieve doeleinden, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder d, vallen;
- g. bedrijfsgebouwen, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen;
- h. objecten die met de onder a tot en met e en g genoemde gelijkgesteld kunnen worden uit hoofde van de gemiddelde tijd per dag gedurende welke personen daar verblijven, het aantal personen dat daarin doorgaans aanwezig is en de mogelijkheden voor zelfredzaamheid bij een ongeval, voorzover die objecten geen kwetsbare objecten zijn, en
- i. objecten met een hoge infrastructurele waarde, zoals een telefoon- of elektriciteitscentrale of een gebouw met vluchtleidingsapparatuur, voorzover die objecten wegens de aard van de gevaarlijke stoffen die bij een ongeval kunnen vrijkomen, bescherming verdienen tegen de gevolgen van dat ongeval;

Kwetsbaar object:

- a. woningen, niet zijnde woningen als bedoeld in onderdeel a, onder “beperkt kwetsbaar object”.
- b. gebouwen bestemd voor het verblijf, al dan niet gedurende een gedeelte van de dag, van minderjarigen, ouderen, zieken of gehandicapten, zoals:

- i. ziekenhuizen, bejaardenhuizen en verpleeghuizen;
 - ii. scholen, of
 - iii. gebouwen of gedeelten daarvan, bestemd voor dagopvang van minderjarigen;
- c. gebouwen waarin doorgaans grote aantallen personen gedurende een groot gedeelte van de dag aanwezig zijn, zoals:
 - i. kantoorgebouwen en hotels met een bruto vloeroppervlak van meer dan 1500 m² per object, of
 - ii. complexen waarin meer dan 5 winkels zijn gevestigd en waarvan het gezamenlijk bruto vloeroppervlak meer dan 1000 m² bedraagt en winkels met een totaal bruto vloeroppervlak van meer dan 2000 m² per winkel, voorzover in die complexen of in die winkels een supermarkt, hypermarkt of warenhuis is gevestigd, en
- d. kampeer- en andere recreatieterrainen bestemd voor het verblijf van meer dan 50 personen gedurende meerdere aaneengesloten dagen;

Maatschappelijk risico (MR): Dit begrip wordt gebruikt door Rijkswaterstaat en de ProRail binnen hun werken. Het heeft geen algemene toepassing. Het maatschappelijk risico is een maat voor het verwachte aantal passanten dat dodelijk getroffen wordt per jaar en is een risicomaat voor de maatschappelijke beleving. Bij de beoordeling van het maatschappelijk risico hanteren Rijkswaterstaat en ProRail het criterium dat er jaarlijks niet meer dan $2 \cdot 10^{-3}$ passanten mogen overlijden.

Plaatsgebonden risico (PR): Risico op een plaats buiten een inrichting, leiding met gevaarlijke stof of transportroute, uitgedrukt als een kans per jaar dat een persoon die onafgebroken en onbeschermd op die plaats zou verblijven, overlijdt als een rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval binnen die inrichting, leiding of route. Voor kwetsbare objecten geldt een grenswaarde van $PR = 10^{-6}$ per jaar en voor beperkt kwetsbare objecten geldt $PR = 10^{-5}$ per jaar als richtwaarde.

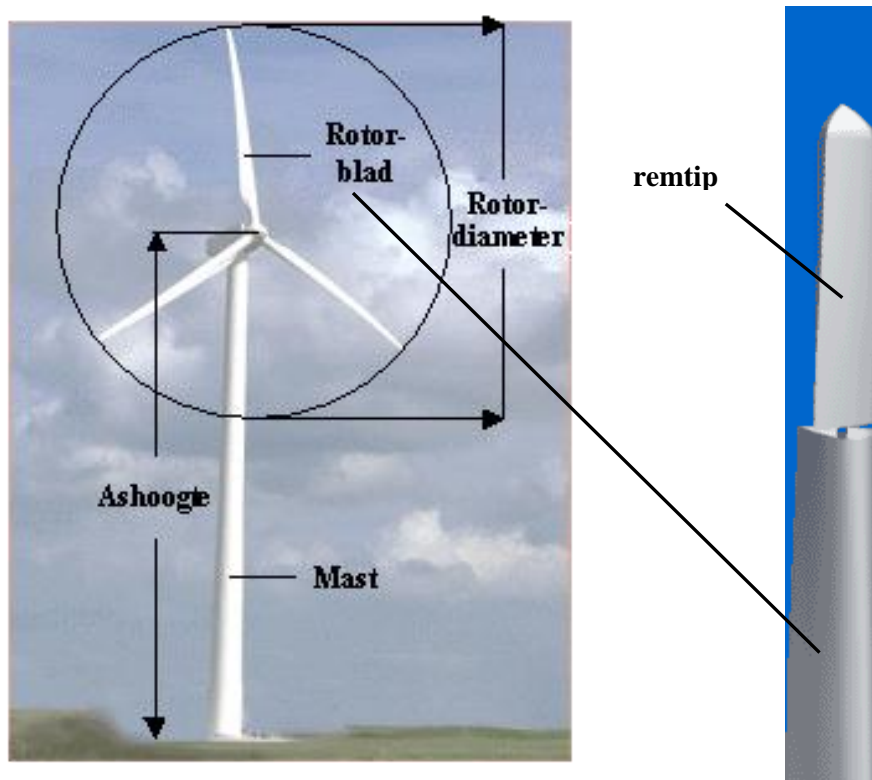
Risico: De kans op een incident in combinatie met de gevolgen van dat incident. In de context van risicoanalyses worden de gevolgen uitgedrukt in het aantal dodelijke slachtoffers gecombineerd met de kans op één of meer slachtoffers, hetzij per punt rond de inrichting (plaatsgebonden risico) hetzij op enige plaats rond de inrichting (groepsrisico).

Scenario: beschrijving van een manier waarop een windturbine een potentieel gevaar kan opleveren voor de omgeving.

Trefkans: Kans dat een object getroffen wordt door een (onderdeel) van een falende windturbine, waarbij een dodelijk slachtoffer het gevolg is.

Technologie

De specifieke terminologie voor windenergie en windturbines wordt toegelicht mede aan de hand van onderstaand beeld.



Ashoogte: hoogte van het rotorcentrum boven het terrein.

Bladbreek: het afbreken van een heel blad bij de bladwortel of de naaf.

Maximale werpafstand: De maximale afstand die door een afbrekend rotorblad tijdens een overtoeren-situatie overbrugd kan worden.

Remmen: het tot stilstand brengen van de rotor.

- Normaal gesproken zijn turbines uitgerust met een aerodynamische rem (bijvoorbeeld het verstellen van het hele blad of het verstellen van de remtip, zie figuur 1) en een mechanische rem. De mechanische rem, vaak een schijfrem op de generatoras of de rotoras, wordt meestal pas gebruikt wanneer de aerodynamische rem niet functioneert. Het toerental waarbij de mechanische rem wordt geactiveerd is ongeveer 10 tot 25 % hoger dan het nominale toerental.

Tipbreuk: het afbreken van de remtip (zie figuur 1).

Toerental: Omwentelingssnelheid van de rotor.

- Nominaal: omwentelingsnelheid waarbij het nominale vermogen wordt geleverd
- Overtoeren: omwentelingsnelheid die hoger ligt dan het nominale toerental.

Vermogen: het elektrisch vermogen dat door de windturbine aan het elektriciteitsnet wordt geleverd.

- nominaal: een door de fabrikant gespecificeerde maximale waarde voor het elektrisch vermogen dat de turbine langdurig aan het net kan leveren. (Het nominaal vermogen wordt geleverd bij windsnelheden van ongeveer 12 m/s en hoger)
- maximaal: hoeveelheid vermogen die kortstondig aan het elektriciteitsnet geleverd kan worden.

Bijlage A

Ongeval scenario's en faalstatistiek

Analyse van Risicovolle Incidenten van Windturbines

DNV KEMA, 2013

INHOUDSOPGAVE BIJLAGE A

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Faalscenario's | 4 |
| 2 | Faalstatistiek | 5 |
| 2.1 | Update faalstatistiek..... | 5 |
| 2.2 | Bladbreuk..... | 13 |
| 2.3 | Mastbreuk | 14 |
| 2.4 | Gondel- en/of rotorafworp | 15 |
| 2.5 | Resultaat | 16 |
| 3 | Ruimtelijke Trefkansdichtheidsverdelingen | 18 |
| 3.1 | Bladafworp | 18 |
| 3.2 | Mastbreuk | 22 |
| 3.3 | Gondel en/of rotorafworp | 22 |

BIJLAGE A: ONGEVALSCENARIO'S EN FAALSTATISTIEK

In opdracht van Gasunie en TenneT heeft DNV KEMA in 2011 onderzoek verricht naar risicovolle incidenten van windturbines. Doel van dit onderzoek was onder andere het actualiseren van de faalfrequenties van windturbines op basis van actuele statistiek. Deze bijlage geeft de resultaten weer van dit onderzoek en is overgenomen uit hoofdstuk 2 van het rapport “Rekenmethodiek zonering windturbines” (2012)¹.

Deze bijlage geeft de scenario's en faalkansen weer zoals bepaald uit historische Deense, Duitse, Engelse en Nederlandse faalgegevens in de periode 2001-2010. De hier gepresenteerde faalscenario's en bijbehorende faalfrequenties zijn van toepassing op moderne windturbines van 1 tot 5 MW. Volgens het analagon principe dat beschreven staat in het “Protocol voor aanpassing van de rekenmethodieken risicoanalyse” van RIVM, zijn de faalfrequenties ook toepasbaar op windturbines met een hoger geïnstalleerd vermogen.

Van windturbines met betonnen of hybride masten ontbreekt faalstatistiek. De generieke waarden van het Handboek zijn alleen van toepassing op windturbines met stalen masten.

¹ DNV KEMA (2012) *Rekenmethodiek zonering windturbines*, in opdracht van NV Nederlandse Gasunie en Tennet TSO B.V.; 18 december 2012, 74101452 GCS 12.R.53190

1 FAALSCENARIO'S

Bij het falen van een windturbine zijn vier faalscenario's te onderscheiden: het naar beneden vallen van kleine onderdelen (bouten, blad- en tipdelen, ijs), bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafworp.

De faalfrequentie van het naar beneden vallen van kleine onderdelen (bouten, blad- en tipdelen, ijs) mag kwalitatief bepaald worden. Het naar beneden vallen van kleine turbineonderdelen of ijs zijn incidenten die vooral risico's vormen voor het gebied onder de rotor (er van uitgaande dat een windturbine wordt stilgezet bij ijsvorming aan de bladen). De frequenties van ijsafwerpen zijn zeer locatieafhankelijk en hiervoor is ook geen generieke waarde te bepalen. Bij kans op ijsvorming worden de turbines automatisch stilgezet (beveiliging). In het Activiteitenbesluit is opgenomen dat indien een windturbine als gevolg van het in werking treden van een beveiliging buiten bedrijf is gesteld, deze pas weer in werking wordt gesteld nadat de oorzaak van het buiten werking stellen is opgeheven.

Bladdelen kunnen wel ver van de turbine terecht komen. De relatief kleine onderdelen hebben een kleine massa. De kans op schade aan een object is veel kleiner dan van een heel blad. De risico's voor de infrastructuur worden volledig gedomineerd door bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafworp.

De volgende faalscenario's worden in dit rapport geadresseerd:

a. **Bladbreuk**

Het blad breekt in de wortel af en wordt als geheel weggeworpen. Breuk van een bladtip of gedeelte van een blad wordt niet beschouwd.

b. **Mastbreuk**

Mastbreuk vindt plaats doordat de mast bij de voetflens afbreekt of dat de mast knikt op een hoger gedeelte. In het Handboek 2005 is geen onderscheid gemaakt tussen deze twee faalscenario's. De impact van de twee faalscenario's verschilt dusdanig dat er bij deze versie is gekozen om onderscheid te maken tussen deze faalscenario's. Volledig falen van de mast waarbij de mast loskomt van het fundament of waarbij de mast breekt in de onderste helft. Een ander mogelijk scenario is knikken van de mast in de bovenste helft. Bij knikken van de bovenste masthelft is er sprake van een geringere neerwaartse snelheid van masttop en gondel. De rotor/gondel kan aan de mast blijven hangen of met geringe impact alsnog op de bodem terechtkomen.

c. **Gondel/rotorafworp**

Gondel en/of rotor komen als geheel naar beneden. De mast blijft staan.

2 FAALSTATISTIEK

Voor de drie faalscenario's wordt een update gegeven van de faalstatistiek voor windturbines vanaf 1 MW tot 5 MW. De faalfrequenties worden gedefinieerd als kans op falen per windturbine per jaar.

2.1 Update faalstatistiek

De faalcijfers voor windturbines in het Handboek (2005) zijn gebaseerd op gegevens van 30.000 bedrijfsjaren van windturbines tussen 0 en 1300 kW in de periode 1984 - 2000. Van de 30.000 bedrijfsjaren hadden ruim 24.000 bedrijfsjaren betrekking op de vermogensklasse tussen 51 en 300 kW. Deze vermogensklasse ligt ver onder de tegenwoordig gebruikelijke windturbinevermogens van één tot enkele MW. De faalcijfers zijn hierdoor gedateerd en liggen buiten het toepassingsbereik. Bovendien zijn hierin veel gegevens van prototypen verwerkt.

Momenteel worden juist veel windturbines met een vermogen van minimaal 2 MW geplaatst. Bij het bouwen van moderne windturbines wordt steeds meer aandacht besteed aan veiligheid. In de studie naar faalfrequenties is onderzocht of de faalfrequenties van moderne windturbines afwijken van de faalfrequenties die in het Handboek van 2005 zijn gehanteerd. Nieuwe faalstatistieken van moderne windturbines moeten uitwijzen of - en zo ja, hoeveel - de faalkansen daadwerkelijk kleiner zijn.

2.1.1 Dataverzameling

Opvallend is dat faalgegevens van windturbines niet centraal worden bijgehouden: er bestaan geen (openbare) wetenschappelijke databases die incidenten met windturbines of windturbineonderdelen registreren. In het Handboek (2005) hebben zowel ISET (Institut für Solare Energiesystemen) uit Duitsland en EMD (Energie- og Miljødata) uit Denemarken data aangeleverd voor het bepalen van de faalfrequenties van bladen, masten, rotors en gondels. Van deze databases kon geen gebruik gemaakt worden bij het opstellen van nieuwe faalfrequenties, aangezien zowel EMD als ISET (nu IWES van Fraunhofer) geen database met incidenten van windturbines meer hebben. Voorheen werd deze database bijgehouden in het kader van een onderzoeksprogramma vanuit de Duitse overheid. Dit onderzoeksprogramma is gestopt en daarmee ook het bijhouden van faalincidenten. Ook veel van de kennisinstituten, windturbinefabrikanten, onderhoudsbedrijven en verzekeringsmaatschappijen die DNV KEMA heeft benaderd konden of wilden geen faalgegevens van moderne windturbines leveren. Deze informatie wordt als vertrouwelijk en concurrentiegevoelig beschouwd.

Een database die wel openbaar beschikbaar is, is de Caithness Windfarm database². Deze uitgebreide database wordt bijgehouden door tegenstanders van windenergie. Hoewel niet alle referenties die de database gebruikt te achterhalen zijn, wordt deze database ook aangewend door andere partijen die de

² <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/>

risico's van windturbines in kaart willen brengen³. De database wordt beschouwd als bron van waardevolle data waar zoveel mogelijk wereldwijde incidenten zijn genoemd.

Via NWEA (Nederlandse Wind Energie Associatie) heeft DNV KEMA van een fabrikant faalgegevens ontvangen van hun windturbines. Een andere grote fabrikant heeft ook gegevens bekend gemaakt. Beiden geven de faalgegevens weer van moderne windturbines.

Als laatste bron is gebruik gemaakt van de Windkraft-journals, die een (niet volledig) overzicht geven van incidenten binnen de windindustrie.

In landen die van oudsher al bezig zijn met windenergie zijn meer gegevens bekend over faalstatistieken van windturbines. Dit zijn Duitsland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk. Om zoveel mogelijk recente gegevens te verkrijgen van moderne windturbines, is DNV KEMA bij de Caithness Windfarm database en de Windkraft journals uitgegaan van de faalgegevens uit deze drie landen gedurende de periode 2001 – 2010. Ook is er gekeken naar de Nederlandse casuïstiek voor windturbines. Nederland heeft echter een relatief beperkte omvang van het aantal geplaatste MW-turbines. De nieuw geplaatste windturbintypes in Nederland wijken niet af van de in Duitsland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk nieuw geplaatste turbines. Hiervoor gelden dan ook dezelfde faalfrequenties.

De faalfrequenties zijn berekend aan de hand van faalincidenten die zijn vermeld in de drie genoemde bronnen in combinatie met het aantal geïnstalleerde turbines per jaar per land. Voor het geïnstalleerde vermogen per jaar in Duitsland is IWES Fraunhofer als bron gebruikt⁴. Voor het jaarlijkse windvermogen in Denemarken is gebruik gemaakt van de Deense Stamdateregister for vindkraftanlæg beheerd door de Danish Energy Agency⁵. Het aantal windturbines in Groot-Brittannië is weergegeven door Renewable UK, de Britse windenergie associatie⁶. Voor het aantal windturbines in Nederland is gebruikt gemaakt van de database van Windenergie-nieuws.nl⁷.

2.1.2 Casuïstiek Nederland

DNV KEMA heeft onderzoek gedaan naar faalincidenten van windturbines in Nederland. Hierbij is gebruik gemaakt van de Caithness database voor de periode van 2001 tot 2010. De Windkraft Journals maakten geen melding van ongevallen in Nederland. Informatie over het aantal windturbines in Nederland is afkomstig van Windenergie Nieuws. Bij DNV KEMA zijn geen andere incidenten bekend dan vermeld in de Caithness database. Tabel 1 geeft het aantal faalincidenten weer per jaar in Nederland voor bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafworp.

³ e.g. Sharples, M.; Sharples, B.J.M. (2010) Damage and Critical analysis of accidents to assist in avoiding accidents on offshore wind farms on the OCS.

⁴ Fraunhofer Iwes (2011) <http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/>

⁵ Energi Styrelsen (2011) <http://www.ens.dk/>

⁶ Renewable UK (2011) <http://www.renewableuk.com/>

⁷ Windenergienieuws.nl (2011) <http://www.windenergie-nieuws.nl/>

| Faalincidenten Caithness Windfarm Database | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
| Nederland | | | | | | | | | | | |
| | totaal 2001-2010 | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | 14954 | 812 | 966 | 1165 | 1330 | 1444 | 1601 | 1730 | 1939 | 1970 | 1997 |
| blad | 7 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| mast | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| gondel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabel 1: Aantal faalincidenten per jaar van windturbines in Nederland

Tabel 2 geeft weer waar en wanneer de faalincidenten plaatsvonden.

| Datum | Plaats | Incident | Turbinevermogen |
|------------|------------------------------|---------------------|-----------------|
| 15/01/2004 | Windpark Sas, Wilhelminadorp | bladbreuk | 80kW |
| 22/12/2004 | Friese Pingjum | bladbreuk | 80kW |
| 08/01/2005 | Visafslag Lauwersoog | bladbreuk | 75kW |
| 22/01/2005 | Wijnaldum | bladbreuk | 75kW |
| 12/02/2005 | Hornhuizen | mastbreuk | 225kW |
| 15/02/2005 | Maasvlakte | mastbreuk | 1MW |
| 31/10/2005 | Kreekraksluizen | mastbreuk | 500kW |
| 10/01/2006 | Eemmeerdiijk, Zeewolde | mastbreuk (knikken) | 1MW |
| 28/03/2006 | Den Haag | mastbreuk | 80 kW |
| 06/07/2006 | Flevoland | mastbreuk | 1MW |
| 07/02/2008 | Texel | bladbreuk | <1MW |
| 03/03/2008 | Biddinghuizen | mastbreuk | 80kW |
| 14/05/2008 | Schagen | bladbreuk | <1MW |
| 27/05/2009 | Lelystad | bladbreuk | 750kW |

Tabel 2: Overzicht van de faalincidenten in Nederland

Bron: gebaseerd op Caithness database, 2011

Uit de gevonden faalstatistiek voor Nederland over de periode 2001-2010 volgt dat de faalfrequenties in de orde van grootte of zelfs hoger zijn dan de waarden uit het Handboek (2005): uitgaande van Tabel 1 volgt dat het aantal ervaringsjaren (turbine jaren) vanaf 2001 bijna $1.5 \cdot 10^4$ betreft. De verwachtingswaardes voor de verschillende scenario's worden op basis van deze tabel circa $5 \cdot 10^{-4}$ per jaar voor zowel blad als mastbreuk en ordegrrootte $7 \cdot 10^{-5}$ per jaar (aannme dat er 1 ongeval heeft plaatsgevonden) voor het falen van de gondel.

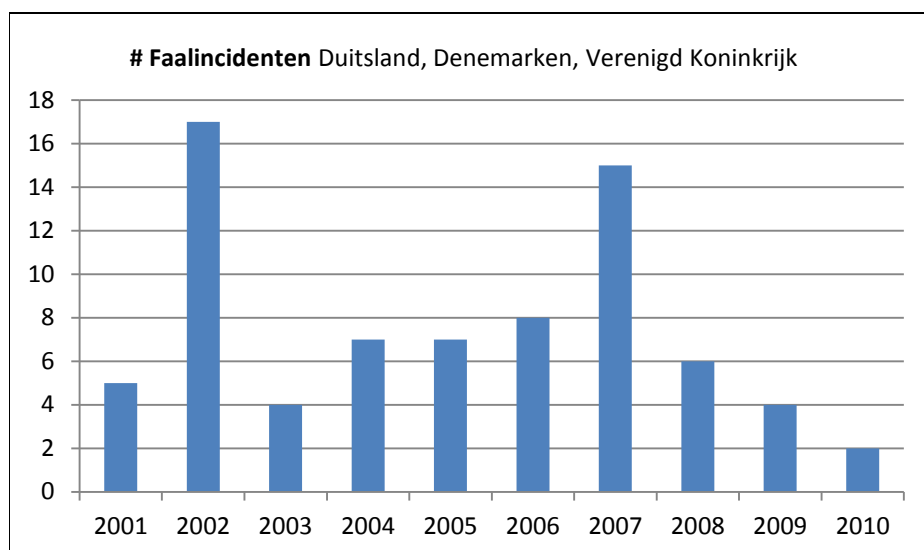
Opvallend is dat de gefaalde windturbines zonder uitzondering oudere windturbines zijn. De gefaalde windturbines zijn geplaatst in de jaren '90 met vermogens kleiner of gelijk aan 1 MW. Er zijn geen faalincidenten met turbines groter dan 1 MW gevonden, maar er zijn ook maar een beperkt aantal van deze categorie geplaatst. Met betrekking tot de vorige alinea volgt mede dat met dezelfde methode faalfrequenties voor windturbines van > 1 MW zullen resulteren van minimaal $5 \cdot 10^{-5}$ per jaar. Hierbij is dan de voltallige hoeveelheid turbine-ervaringsjaren van $1.5 \cdot 10^4$ toegepast. De werkelijke

hoeveelheid is ervaringsjaren van turbines >1 MW is hiervan slechts een fractie, waardoor veel hogere verwachtingswaarden zullen resulteren (en nog veel grotere waarden voor eventuele 95% betrouwbaarheidspercentielen).

Omdat de afleiding van faalfrequenties voor windturbines boven 1 MW op basis van de getoonde Nederlandse casuïstiek niet goed mogelijk is, wordt gekeken naar andere landen. Denemarken, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk beschikken over een groot aantal turbine-ervaringsjaren. Bovendien wijken de geplaatste windturbintypes niet af van andere Europese landen, waardoor de resulterende faalfrequenties ook voor Nederland toepasbaar zijn.

2.1.3 Caithness Windfarm

Caithness Windfarm Information Forum (CWIF) wordt beheerd door een groep mensen die zich zorgen maken over de toename van windturbines in de Schotse Hooglanden. The Caithness Windfarm Accident database is de meest uitgebreide database met ongevallen die publiekelijk beschikbaar is. Deze organisatie verzamelt incidenten van windturbines. Wanneer deze bevestigd zijn door persberichten of andere media worden deze in de database opgenomen. Veel van de opgegeven referenties zijn echter niet meer te controleren omdat de links naar de nieuwsartikelen of opgegeven websites niet meer werken. De faalincidenten die Caithness voor Nederland weergeeft zijn door DNV KEMA gecontroleerd. Op basis van DNV KEMA's expertise blijkt dat het merendeel van de incidenten in de Caithness database zijn opgenomen. De verwachting is dat die ook geldt voor de landen om ons heen. Het gemiste aantal incidenten acht DNV KEMA niet groter dan 10 tot 20%. Dit wordt gedekt door bovenwaardes te gebruiken en conservatieve cijfers te hanteren.



Figuur 1: Aantal faalincidenten per jaar voor de landen Duitsland, Denemarken en Verenigd Koninkrijk

De database geeft slechts in een enkel geval aan om welk turbinetype het gaat. In deze database zijn dan ook incidenten van oude turbinetypes meegenomen, zonder dat een splitsing kan worden gemaakt tussen oude en moderne windturbines. Figuur 1 geeft het totaal aantal bij Caithness bekende faalincidenten per jaar voor de landen Duitsland, Denemarken en Verenigd Koninkrijk.

DNV KEMA heeft de gegevens uit de Caithness Windfarm Accident database vanaf 2001 tot en met 2010 geanalyseerd voor de landen Denemarken, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk. In deze drie landen is het aantal windturbines, en dus het aantal turbinejaren, het grootst. Dit vergroot de betrouwbaarheid van de gegevens.

In Tabel 3 staan de faalincidenten die de Caithness Windfarm database rapporteert. De faalfrequentie van een component is gedefinieerd per windturbine per jaar. Van deze incidenten wordt verreweg het grootste deel toegeschreven aan bladbreuk.

| Faalfrequenties Caithness Windfarm Database | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
| Totaal Duitsland, Denemarken, UK | | | | | | | | | | | |
| totaal 2001-2010 | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | 227264 | 12948 | 16385 | 18884 | 20499 | 22098 | 24139 | 25359 | 27041 | 29029 | 30882 |
| blad | 63 | 5 | 11 | 3 | 7 | 6 | 8 | 12 | 5 | 4 | 2 |
| mast | 8 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| gondel | 4 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| faalfrequentie | gemid. 2001-2010 | | | | | | | | | | |
| blad | 2,77E-04 | 3,86E-04 | 6,71E-04 | 1,59E-04 | 3,41E-04 | 2,72E-04 | 3,31E-04 | 4,73E-04 | 1,85E-04 | 1,38E-04 | 6,48E-05 |
| mast | 3,52E-05 | 0,00E+00 | 1,83E-04 | 5,30E-05 | 0,00E+00 | 4,53E-05 | 0,00E+00 | 1,18E-04 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| gondel | 1,76E-05 | 0,00E+00 | 1,83E-04 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,70E-05 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| Duitsland | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | | 9647 | 12681 | 14952 | 16405 | 17588 | 19042 | 19891 | 20626 | 21531 | 22016 |
| blad | | 4 | 10 | 3 | 7 | 2 | 4 | 8 | 1 | 1 | |
| mast | | | 3 | 1 | | 1 | | 2 | | | |
| gondel | | | 3 | | | | | | | | |
| Denemarken | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | | 2774 | 3091 | 3212 | 3107 | 3007 | 2916 | 2814 | 2762 | 2951 | 3088 |
| blad | | | 1 | | | 3 | | | 1 | 1 | 1 |
| mast | | | | | | | | | | | |
| gondel | | | | | | | | | 1 | | |
| UK | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | | 527 | 613 | 720 | 987 | 1503 | 2181 | 2654 | 3653 | 4547 | 5778 |
| blad | | 1 | | | | 1 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| mast | | | | | | | | 1 | | | |
| gondel | | | | | | | | | | | |

Tabel 3: Faalincidenten voor windturbines in Duitsland, Denemarken en Verenigd Koninkrijk zoals beschreven in de Caithness Windfarm database

De resultaten van de faalfrequenties uit de Caithness Windfarm database zijn vergeleken met de verwachtingswaardes uit het Handboek (2005) en weergegeven in Tabel 4. Het blijkt dat de

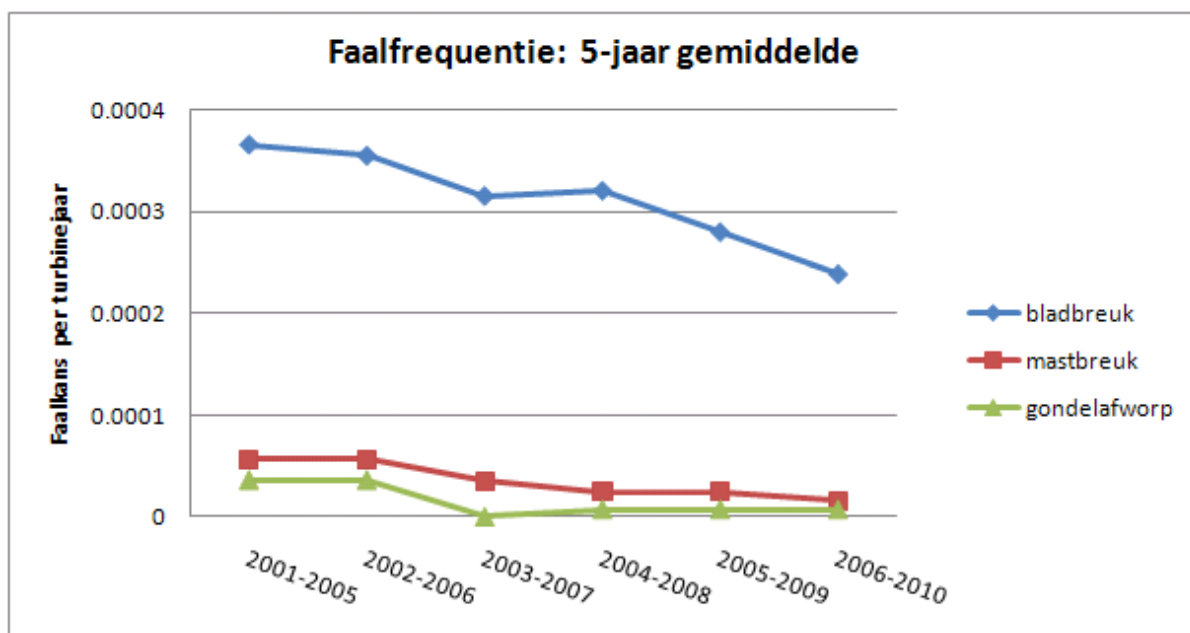
faalfrequenties voor bladafworp en mastbreuk volgens de Caithness Windfarm database iets lager zijn dan waar het Handboek (2005) vanuit gaat, maar dat ze in dezelfde range liggen. De Caithness Windfarm database bevat weinig incidenten waarbij de gondel is afgebroken. De faalfrequentie voor gondel/rotorafworp is dan ook lager dan waar het Handboek (2005) vanuit gaat; bijna een factor 10 kleiner.

In Tabel 4 worden de faalfrequenties uit het Handboek (2005) en de Caithness database vergeleken. Van de Caithness database zijn de verwachtingswaarde en de 95% betrouwbaarheidswaarde opgenomen. De 95% waarden zijn gebaseerd op de Poisson verdeling. Omdat de Caithness database alle windturbintypes weergeeft (groter en kleiner dan 1 MW) worden deze faalfrequenties als conservatief beschouwd voor moderne windturbines.

| Faalfrequentie per turbine 2001-2011 | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| | Handboek (2005) verwachtingswaarde | Caithness database verwachtingswaarde | Caithness database 95% betrouwbaarheid |
| blad | 6,3E-04 | 2,8E-04 | 3,4E-04 |
| mast | 5,8E-05 | 3,5E-05 | 5,8E-05 |
| gondel | 2,0E-04 | 1,8E-05 | 4,0E-05 |

Tabel 4: Vergelijking van de faalfrequenties (per turbinejaar) uit het Handboek (2005) en de Caithness database

Figuur 2 laat de vijf jaar gemiddelde cijfers zien van de faalfrequentie voor bladbreuk, mastbreuk en gondelafworp. De grafiek toont een neerwaartse trend voor de vijf jaar gemiddelde faalfrequentie voor de faalscenario's.



Figuur 2: Vijf jaar gemiddelde faalfrequentie van bladbreuk, mastbreuk en gondelafworp

Moderne windturbines hebben een substantieel aandeel in het opgestelde windvermogen vanaf ongeveer 2005. Het effect van moderne windturbines op de statistieken is vooral na die tijd zichtbaar. Dit betekent dat de faalfrequenties bovenwaardes zijn. Hierdoor is de genoemde verwachtingswaarde conservatief te noemen.

Uit Figuur 2 volgt een dalende trend in bladbreuk en mogelijk ook in mastbreuk. Voor gondelafwerp is een dalende trend niet duidelijk. Echter, doordat de bijdrage van de MW-klasse windturbines hierin niet duidelijk gefilterd kan worden, is dit spoor van het vaststellen van faalfrequenties voor moderne windturbines niet verder gevolgd.

2.1.4 Faalstatistieken fabrikanten

DNV KEMA heeft verschillende windturbinefabrikanten benaderd om mee te werken aan de update van de faalfrequenties. Belangrijke fabrikanten voor de Nederlandse markt zijn benaderd via het Ministerie van I&M, via NWEA en zijn uiteindelijk ook allemaal rechtstreeks door DNV KEMA benaderd. Van twee fabrikanten zijn faalgegevens verkregen. Dit zijn representatieve fabrikanten in Nederland met windturbines in de MW-klasse van het type dat momenteel veelvuldig in Nederland wordt geplaatst. Opgemerkt wordt dat DNV KEMA de fabrikantendata heeft verkregen onder de voorwaarde van vertrouwelijkheid, de gegevens mogen niet rechtstreeks gepubliceerd worden.

De fabrikanten hebben voor bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafworp opgegeven hoe vaak falen is voorgekomen en in hoeveel turbinejaren. De faalcijfers voor windturbines die DNV KEMA van fabrikanten heeft gekregen zijn gebaseerd op gegevens van ongeveer 47.000 bedrijfsjaren tussen 2001 en 2010 voor windturbines van 1,5 MW tot 3 MW.

Beide fabrikanten hebben geen faalincidenten van gondel/rotorafworp of mastbreuk. Volgens inschatting van de fabrikanten zijn daardoor de faalfrequenties voor mastbreuk en gondel/rotorafworp lager dan waar het Handboek (2005) vanuit gaat.

Eén van de fabrikanten gaf aan dat bladbreuk bij de wortel van het blad nauwelijks meer voorkomt en dat vooral tippen afbreken. Deze fabrikant heeft daarom tipafworp als aparte categorie gedefinieerd. Onder "tippen" werden ook grotere bladdelen verstaan, i.e. als het blad niet in zijn geheel afbreekt heeft de fabrikant dat onder tipafworp gedefinieerd. Het is niet mogelijk om in te schatten welk deel van tipafworp onder bladafworp verstaan zou kunnen worden en welk deel daadwerkelijk tipafworp betreft. Wanneer alle getallen van tipafworp als bladafworp worden gerekend, komt de faalkans significant hoger uit dan de waarde die in het Handboek (2005) genoemd wordt. In het Handboek (2005) wordt bij het scenario bladafworp geen faalfrequentie van afworp van tippen meegenomen. In deze update is bij de berekeningen daarom alleen bladafworp meegenomen, zoals de fabrikant dat heeft gedefinieerd. Bij een andere fabrikant is de faalfrequentie van bladbreuk in dezelfde range als waar het Handboek (2005) vanuit gaat.

De faalfrequenties op basis van de data van de twee fabrikanten kunnen als volgt kwalitatief worden samengevat:

- Gondelbreuk : nihil
- Mastbreuk : nihil
- Bladbreuk : in de orde van grootte van het Handboek (2005).

Voor zowel de frequentie van mastbreuk als gondelbreuk kan gesteld worden dat deze met 95% betrouwbaarheid lager is (op basis van een Poisson verdeling) dan $6,4 \cdot 10^{-5}$ per turbinejaar. Hieruit kan (met 95% zekerheid) geconcludeerd worden dat de waarde voor gondelbreuk in het Handboek (2005) meer dan een factor 3 te hoog is voor moderne turbines.

2.1.5 Windkraft Journals

In de "Windkraft Journals" zijn wereldwijde incidenten met windturbines vermeld. Uit de analyse is gebleken dat in Windkraft Journals aanzienlijk minder faalincidenten worden weergegeven dan in de Caithness database. De Windkraft Journals geven aan, geen allesomvattende database te hebben, maar vermelden incidenteel falen van windturbines. **Error! Reference source not found.** Tabel 15 geeft het aantal incidenten weer die vermeld zijn in de Windkraft Journals. De faalfrequentie van een component is gedefinieerd per windturbinejaar.

| Faalfrequenties Windkraft journal | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
| Totaal Duitsland, Denemarken, UK | | | | | | | | | | | |
| totaal 2001-2010 | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | 227265 | 12948 | 16386 | 18884 | 20499 | 22099 | 24139 | 25360 | 27042 | 29028 | 30881 |
| blad | 15 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| mast | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 |
| gondel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| statistics gemid. 2001-2010 | | | | | | | | | | | |
| blad | 6,60E-05 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,88E-05 | 0,00E+00 | 8,29E-05 | 1,18E-04 | 1,11E-04 | 1,03E-04 | 9,71E-05 |
| mast | 1,32E-05 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,89E-05 | 0,00E+00 | 3,44E-05 | 0,00E+00 |
| gondel | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| Duitsland | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | 9647 | 12681 | 14952 | 16405 | 17588 | 19042 | 19891 | 20626 | 21531 | 22016 | |
| blad | | | | 1 | | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | |
| mast | | | | | | | 1 | | | | |
| gondel | | | | | | | | | | | |
| Denemarken | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | 2774 | 3091 | 3212 | 3107 | 3007 | 2916 | 2814 | 2762 | 2951 | 3088 | |
| blad | | | | | | | | | 1 | 1 | |
| mast | | | | | | | | | | | |
| gondel | | | | | | | | | | | |
| UK | | | | | | | | | | | |
| aantal turbines | 527 | 613 | 720 | 987 | 1503 | 2181 | 2654 | 3653 | 4547 | 5778 | |
| blad | | | | | | | | 2 | 1 | 1 | |
| mast | | | | | | | 1 | | 1 | | |
| gondel | | | | | | | | | | | |

Tabel 5: Faalincidenten voor windturbines in Duitsland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk zoals beschreven in Windkraft Journals

De faalincidenten uit de Windkraft Journals leiden tot behoorlijk lagere faalfrequenties dan de huidige faalfrequenties in het Handboek (2005).

Tabel 6 geeft de faalstatistieken weer volgens het Handboek (2005) en op basis van de Windkraft Journals. In de Journals worden geen incidenten van afgebroken gondels gemeld. Ook is de faalfrequentie voor bladafworp meer dan een factor 10 lager dan in het Handboek (2005). Voor mastbreuk is dit een factor van ruim 4. Hierbij moet in ogenschouw worden genomen dat de onvolledigheid van de geregistreerde faalincidenten bijdraagt aan een mogelijk positiever beeld van de faalfrequenties dan de werkelijkheid. Daarnaast volgt uit deze tabel een relatief hoog faalcijfer voor de UK ten opzichte van Denemarken en Duitsland. Het is speculeren wat de oorzaak is. Mogelijk speelt de weersituatie (grotere extremen) hierin een rol. Mede doordat de populatie van de UK niet heel groot is, volgen uit de voorvallen relatief hoge gemiddelden.

In Tabel 6 worden de faalfrequenties uit het Handboek (2005) en de Windkraft journals vergeleken. Van de Windkraft journals zijn de verwachtingswaarde en de 95% betrouwbaarheidswaarde opgenomen.

| Faalfrequentie per turbine 2001-2011 | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| | Handboek (2005) verwachtingswaarde | Windkraft journal verwachtingswaarde | Windkraft journal 95% betrouwbaarheid |
| blad | 6,3E-04 | 6,6E-05 | 1,0E-04 |
| mast | 5,8E-05 | 1,3E-05 | 3,4E-05 |
| gondel | 2,0E-04 | 0 | 1,3E-05 |

Tabel 6: Vergelijking van de faalfrequenties (per turbinejaar) uit het Handboek (2005) en de Windkraft journals

2.2 Bladbreuk

Uit zowel de gegevens van de fabrikanten als uit de Caithness Windfarm database en bekende incidenten, komt naar voren dat bladbreuk het incident is dat het meest frequent voorkomt. In het Handboek (2005) wordt onderscheid gemaakt naar bladbreuk bij normaal bedrijf, bladbreuk bij mechanisch remmen en bladbreuk bij overtoeren. Mechanisch remmen komt bij moderne windturbines niet meer voor. Er is hierdoor geen onderscheid meer te maken voor bladbreuk bij normaal bedrijf of tijdens mechanisch remmen. DNV KEMA onderscheidt daarom slechts twee categorieën: bladbreuk bij normaal bedrijf en bladbreuk tijdens overtoeren. De faalfrequentie van bladbreuk door overtoeren is volgens het Handboek (2005) zeer klein.

Zoals Tabel 7 laat zien, verschilt de faalfrequentie van bladbreuk niet veel met de faalfrequentie voor bladbreuk uit de andere onderzochte bronnen, waarbij rekening gehouden moet worden met het feit dat Windkraftjournal geen volledig overzicht houdt van falen. De faalkansen van de fabrikanten zijn

onder geheimhouding aan DNV KEMA verstrekt. De gevonden faalfrequenties komen overeen met de verwachtingswaarde voor bladbreuk uit het Handboek (2005).

| Faalfrequenties windturbines | | | |
|------------------------------|-----------------|--|---|
| | Handboek (2005) | Windkraftjournal (Duitsland, Denemarken, Verenigd Koninkrijk) | Caithness (Duitsland, Denemarken, Verenigd Koninkrijk) |
| Bladbreuk | 6,3E-04 | 6,60E-05 | 2,77E-04 |
| <i>normaal bedrijf</i> | 3,1E-04 | | |
| <i>Tijdens remactie</i> | 3,1E-04 | | |
| <i>tijdens overtoeren</i> | 8,5E-06 | | |

Tabel 7: Faalfrequentie (per turbine per jaar) voor bladbreuk uit verschillende bronnen

Uit de gegevens van zowel de database als uit de gegevens van de fabrikanten blijkt dat er geen aanleiding is de faalfrequentie voor bladbreuk aan te passen. Ook voor moderne windturbines kan dus gerekend worden met een faalfrequentie van $6,3 \cdot 10^{-4}$ per jaar voor bladbreuk.

In Tabel 8 wordt het voorstel weergegeven voor de faalfrequentie van bladbreuk.

| Faalfrequenties Bladbreuk per turbine per jaar | | |
|--|---------------------------|------------------------------------|
| | Handboek (2005) | DNV KEMA |
| | <i>Verwachtingswaarde</i> | <i>voorstel verwachtingswaarde</i> |
| Bladbreuk | 6,3E-04 | 6,3E-04 |
| <i>normaal bedrijf</i> | 3,1E-04 | 6,2E-04 |
| <i>Tijdens remactie</i> | 3,1E-04 | Nvt |
| <i>tijdens overtoeren</i> | 8,5E-06 | 8,5E-06 |

Tabel 8: Faalfrequenties bladbreuk

De gegevens doen vermoeden dat de faalfrequentie van bladbreuk bij normaal bedrijf bijna is verdubbeld. Dit is zeker niet het geval, in de DNV KEMA gegevens wordt geen onderscheid meer gemaakt tussen normaal bedrijf en remmen.

2.3 Mastbreuk

Mastbreuk vindt plaats doordat de mast in het onderste deel afbreekt dan wel bezwijkt. Bij bezwijken van de bovenste helft van de mast is sprake van knikken. Uit een kwalitatieve analyse van de

Caithness Windfarm database blijkt dat in het merendeel van de gevallen (85%) volledig falen van de mast optreedt. In 15% van de gevallen is er sprake van knikken van het bovenste mastdeel. Door de sterkte van de mast, die gedimensioneerd is op basis van verwachte weersomstandigheden, blijkt dat bij knikken van de mast de rotor/gondel niet (direct) op de bodem zullen vallen. Dit scenario is daarmee niet relevant voor falen van gas- en elektriciteitsinfrastructuur.

| Faalfrequenties windturbines | | | |
|------------------------------|--|--|--------------------------|
| | Handboek | Windkrachtjournal | Caithness |
| | <i>verwachtings-waarde (=50% betrouwbaarheidspercentiel)</i> | <i>beperkte gegevens, totaal van DU, DK en UK:</i> | <i>totaal DU, DK, UK</i> |
| Mastbreuk | 5,8E-05 | 1,32E-05 | 3,52E-05 |

Tabel 9: Faalfrequenties mastbreuk per jaar uit verschillende bronnen

De statistiek is gebaseerd op stalen masten. Er is te weinig betrouwbare faalinformatie bekend over windturbines met betonnen masten om enige statistiek op toe te passen.

De gevonden faalfrequenties zijn in lijn met de verwachtingswaarde voor mastbreuk uit het Handboek (2005). Ook voor moderne windturbines kan dus een faalkans van $5,8 \cdot 10^{-5}$ per jaar als verwachtingswaarde voor mastbreuk toegepast worden. Op basis van de verhouding in de Caithness Windfarm database, worden faalfrequenties voor respectievelijk volledig falen en knikken van het bovenste mastdeel afgeleid van $5,0 \cdot 10^{-5}$ per jaar en $8,3 \cdot 10^{-6}$ per jaar, zie Tabel 10.

| Faalfrequenties windturbines per turbine per jaar | | |
|---|---------------------------|------------------------------------|
| | Handboek (2005) | DNV KEMA |
| | <i>verwachtingswaarde</i> | <i>voorstel verwachtingswaarde</i> |
| Mastbreuk | 5.8E-05 | 5.8E-05 |
| <i>knikken van de mast</i> | | 8.3E-06 |
| <i>volledig falen</i> | | 5.0E-05 |

Tabel 10: Faalfrequenties mastbreuk

2.4 Gondel- en/of rotorafworp

De verwachtingswaarde die in het Handboek (2005) wordt weergegeven voor gondel- en rotorafworp betreft $2,0 \cdot 10^{-4}$ per turbine per jaar. Uit de faalgegevens van fabrikanten en uit de databases volgt een aanzienlijke lagere verwachtingswaarde. Tabel 11 biedt een overzicht van de faalfrequenties uit verschillende bronnen.

| Faalfrequenties windturbines | | | |
|---------------------------------|---|--|---------------------------------------|
| | Handboek <i>verwachtings-waarde</i> (=50% betrouwbaarheidspercentiel) | Windkraftjournal <i>beperkte gegevens, totaal van DU, DK en UK:</i> | Caithness <i>totaal DU, DK, UK</i> |
| Afvallen van gondel en/of rotor | 2,0E-04 | 0,00E+00 | 1,76E-05 |

Tabel 11: Faalfrequenties gondel- en rotorafworp uit verschillende bronnen per turbinejaar

De faalfrequenties voor gondel/rotorbreek, zoals blijkt uit Caithness database, is 10 keer lager dan in het Handboek (2005). Uit de gegevens van de fabrikanten en uit de Windkraft journals blijkt dat de verwachtingswaarde zelfs nihil is. De faalfrequentie kan worden vervangen door de (conservatieve) verwachtingswaarde van $1,8 \cdot 10^{-5}$ per jaar (zie Tabel 12).

| Faalfrequenties windturbines per turbine per jaar | | |
|---|--|--|
| | Handboek (2005) <i>verwachtingswaarde</i> | DNV KEMA <i>voorstel verwachtingswaarde</i> |
| Val gondel en/of rotor | 2.0E-04 | 1.8E-05 |

Tabel 12: Faalfrequenties gondel en rotorbreek

2.5 Resultaat

Tabel 13 geeft concluderend de actuele faalfrequenties voor de drie faalscenario's, bladbreuk, mastbreuk en afworp gondel/rotor voor windturbines vanaf 1 MW tot en met 5 MW. In het rapport van Gasunie/Tennet meent DNV KEMA dat de faalstatistieken voldoende conservatisme bevatten om niet de 95% betrouwbaarheidspercentielen te hanteren, maar de verwachtingswaarde. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu heeft echter besloten dat ook voor de faalfrequenties van windturbines het 95% betrouwbaarheidspercentiel moet worden gehanteerd. Tabel 13 geeft de geactualiseerde faalfrequentie aan voor windturbines. De nieuwe rekenwaarde is gebaseerd op de 95% bovengrens.

Voor bladbreuk wijzigen de faalfrequenties niet ten aanzien van het Handboek (2005), enkel de kans op bladbreuk bij verhoogd toerental tijdens remmen wordt niet meer beschouwd. Ook de faalfrequentie van mastbreuk blijft ongewijzigd. Hierbij is wel onderscheid gemaakt tussen volledig falen en knikken van het bovenste mastdeel. Uit de gegevens blijkt de kans op gondel- en/of rotorafworp beduidend lager te zijn, te weten een factor tien.

| Faalfrequenties windturbines | | |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| | <i>verwachtingswaarde</i> | <i>95% betrouwbaarheidspercentiel</i> |
| Bladbreek | 6,3E-04 | 8,4E-04 |
| <i>normaal bedrijf</i> | 6,2E-04 | 8,4E-04 |
| <i>tijdens overtoeren</i> | 8,5E-06 | 5,0E-06 |
| Mastbreek | 5,8E-05 | 1,3E-04 |
| <i>falen gedeelte van de mast</i> | 8,3E-06 | |
| <i>volledig falen</i> | 5,0E-05 | |
| Afvallen van gondel en/of rotor | 1,8E-05 | 4,0E-05 |

Tabel 13: Overzicht van scenario's en faalfrequenties (per turbine per jaar)

* Het ministerie van Infrastructuur en Milieu (directie Water en Bodem en directie Veiligheid en Risico's) heeft de keuze overwogen van het vaststellen van faalkansen van (delen van) windturbines op basis van de verwachtingswaarde of op basis van de 95-percentielwaarde. Gekozen is voor de 95-percentielwaarde. Hierbij hebben de volgende inhoudelijke en beleidsmatige argumenten meegewogen:

- Gezien het beperkte aantal data over het falen van windturbines, is het raadzaam een conservatieve keuze te maken. Wanneer in de toekomst dan onverhoopt incidenten plaatsvinden, zal dit niet direct tot het aanpassen van de faalkansen leiden.
- De verschillen tussen faalkansen op basis van de verwachtingswaarde en de 95-percentielwaarde bedragen niet meer dan een factor 2,2. Het directe belang van een keuze voor de verwachtingswaarde lijkt daarmee beperkt te zijn. De keuze voor de 95-percentielwaarde sluit aan bij de huidige tendens in het externe veiligheid-beleid –zeker in nieuwe situaties- uit te gaan van de 95-percentielwaarde.
- Omdat windturbines onder het Activiteitenbesluit vallen, heeft het Handboek alleen betrekking op nieuwe situaties. De keuze voor de 95-percentielwaarde heeft geen gevolgen voor bestaande situaties omdat er geen saneringsplicht bestaat.
- De keuze voor de 95-percentielwaarde leidt tot een iets grotere risicocontour. Het ruimtegebruik dat dit met zich meebrengt voorkomt dat andere functies te dicht op een windturbine komen te staan, waardoor de mogelijkheid voor opschaling van de windturbine in de toekomst gereserveerd blijft.
- De 95-percentielwaarde werd al in het “vorige” Handboek aanbevolen. Vanuit continuïteit van beleid en regelgeving is het niet goed daar zonder zwaarwegende redenen van af te wijken.

3 **RUIMTELIJKE TREFKANSDICHTHEIDSVERDELINGEN**

In het vorige hoofdstuk zijn de faalscenario's en de bijbehorende frequenties van windturbines afgeleid. Deze scenario's hebben allen betrekking op vallende delen van de windturbine. De kans dat een nabijgelegen object wordt geraakt, is niet gelijk aan de corresponderende frequentie, maar een fractie hiervan. Om uit te rekenen welke fractie dit is, dient een ruimtelijke kansverdeling van deze frequentie te worden toegepast. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe deze frequenties van de vallende delen over de ruimte zijn verdeeld: dit zijn de ruimtelijke trefkansdichtheidsverdelingen.

De kans dat een object wordt geraakt is afhankelijk van deze kansdichtheidsverdeling en de locatie en grootte van het object. In hoofdstuk 3 zal de uiteindelijke kans van raken worden bepaald als functie van de kansdichtheidsverdeling, de grootte en positie van het object.

3.1 **Bladafworp**

3.1.1 **Generieke turbine gegevens**

Voor de update van de trefkans als gevolg van bladbreuk zijn specificaties (rotordiameter, ashoogte en nominaal toerental) verzameld van verschillende commercieel verkrijgbare windturbines. Voor de update van de trefkansen zijn windturbines gebruikt met een groter vermogen vanaf 1MW. Deze gegevens zijn weergegeven in Tabel 14.

Een ander criterium dat gehanteerd is bij de verzameling van gegevens is dat windturbines met rotorbladen waarvan de bladwortel uit staal is vervaardigd, zijn uitgesloten. Door de aanwezigheid van grote hoeveelheden staal in de bladwortel is de zwaartepuntligging beduidend anders en is afworp verschillend ten opzichte van kunststofbladen. Hierdoor kan het in deze paragraaf beschreven bladafworpmodel wel gebruikt worden, maar dienen de resultaten opnieuw berekend te worden. De gegeven voorbeelden betreffen echter volledig kunststof rotorbladen.

Naast de parameters die beschreven staan in Tabel 14 is voor de berekening van de werpafstand ook de zwaartepuntligging van het blad nodig. De exacte zwaartepuntligging wordt vastgesteld nadat de productie van het blad heeft plaatsgevonden. Bij de meeste turbines ligt het zwaartepunt van een volledig kunststofblad tussen 30 en 40% vanaf het rotorcentrum. Voor de berekeningen van de werpafstand wordt daarom een generieke zwaartepuntligging van 35% vanaf het rotorcentrum toegepast.

| Fabrikant | Type | Vermogen [MW] | Rotordiameter [m] | Masthoogte [m] | Toerental [rpm] |
|--------------|-------------|------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| Siemens | SWT-3.0-101 | 3 | 101 | 80 | |
| Alstom Power | 100 | 3 | 100,8 | 75 | 14,2 |
| Acciona | AW3000-100 | 3 | 100 | 100 | 14,2 |
| Vestas | V90-3MW | 3 | 90 | 65 | 16,1 |
| Enercon | E82 -3MW | 3 | 82 | 78 | 18,5 |
| Vestas | V112 -3MW | 3 | 112 | 84 | 12,8 |
| Enercon | E101-3MW | 3 | 101 | 99 | 14,5 |
| Leitwind | LTW101-3000 | 3 | 101 | 97 | 14,5 |
| Acciona | AW3000-109 | 3 | 109 | 100 | 13,2 |
| Alstom Power | 110 | 3 | 109,8 | 75 | 13,6 |
| Fuhrlander | FL 3000/120 | 3 | 120 | 90 | 14,8 |
| Acciona | AW3000-116 | 3 | 116 | 100 | 12,3 |
| Siemens | SWT-3.6-120 | 3,6 | 120 | 120 | 13 |
| Repower | 5M | 5 | 126 | 117 | 12,1 |

Tabel 14: Generieke turbine gegevens

3.1.2 Kansdichtheidsfunctie

Voor het berekenen van de werpafstanden van windturbinebladen wordt aangenomen dat het blad afbreekt bij de bladwortel, met als gevolg dat het model niets zegt over het afbreken van bladdelen zoals de tip. Uitgangspunt bij het berekenen van de werpafstand is de plaats waar het zwaartepunt van het blad op het maaiveld terecht komt.

Er wordt uitgegaan van het klassieke kogelbaanmodel. Dit model beschrijft de horizontale en verticale verplaatsing van een voorwerp waarbij de invloed van eventuele op-/neerwaartse kracht (lift) en luchtweerstand verwaarloosd wordt.

De relevante parameters voor berekenen van de werpafstand zijn:

- H: hoogte rotor-as [m]
- Ω : toerental van de rotor [rad/s]
- α : hoek met het horizontale vlak [rad]
- R_z : afstand tot het rotor centrum gemeten vanaf het rotorblad zwaartepunt

Indien de bladtip op de hoogste positie in het rotorvlak staat is de hoek 90° ($\frac{\pi}{2}$ rad), horizontaal (uitgangspositie) op 0 en op de laagste positie 270° ($-\frac{\pi}{2}$ rad).

Om de positie van het wegvliegende deel op tijdstip t te berekenen, worden de volgende twee formules⁸ toegepast:

$$x(t) = |R_z \cos \alpha - \Omega R_z t \sin \alpha| \quad (1)$$

$$z(t) = H + R_z \sin \alpha + \Omega R_z t \cos \alpha - \frac{gt^2}{2} \quad (2)$$

In deze formules is x de horizontale afstand ten opzichte de windturbine en z de hoogte ten opzichte van het maaiveld.

Om te bepalen waar het zwaartepunt van het wegvliegend deel de grond raakt, wordt eerst berekend op welk tijdstip het zwaartepunt de grond raakt. Hiervoor geldt $z(t) = 0$ en het tijdstip wordt bepaald door:

$$t_i = \frac{\Omega R_z \cos \alpha}{g} + \sqrt{\frac{2}{g} \left(H + R_z \sin \alpha + \frac{\Omega^2 R_z^2 \cos^2 \alpha}{2g} \right)} \quad (3)$$

Door tijdstip t_i uit formule 3 in te vullen in formule 1 kan bepaald worden waar het wegvliegend deel de grond raakt.

De werpafstand x wordt voor een zeer groot aantal azimuthhoeken van het rotorvlak (equidistant verdeeld) berekend. Vervolgens wordt het aantal gebeurtenissen waarbij het zwaartepunt binnen dezelfde eenheid van een meter afstand van de windturbine, bijvoorbeeld tussen 50 en 51 meter, terechtkomt opgeteld, het zogenaamde “binnen”. Verder wordt verondersteld dat de positie van de windturbine, ten opzichte van het noorden, bij het optreden van bladbreuk indifferent is. Door vervolgens het aantal gebeurtenissen van bladbreuk in een “bin” van één meter te delen door het oppervlak van de bin, wordt de trefkans per m^2 bepaald. Het oppervlak van een “bin” van één meter op afstand R van de windturbine is gelijk aan:

$$\text{Oppervlak bin (R)} = \pi[(R+1)^2 - R^2]$$

De kansdichtheidsfunctie $f(x)$ geeft de kans per m^2 dat het zwaartepunt van het wegvliegend deel op een bepaalde plek terechtkomt bij de gebeurtenis bladbreuk. Om de kansdichtheidsfunctie vast te stellen worden de werpafstanden berekend voor iedere azimuth positie van het rotorblad. Verondersteld wordt dat de kans op bladbreuk voor elke azimuth positie gelijk is. Berekeningen worden gemaakt voor een toerental gelijk aan nominaal en in overtoeren, waarbij overtoeren zijn gelijkgesteld aan tweemaal nominaal.

⁸ Zoals beschreven in Bijlage C1 van dit Handboek.

3.1.3 Resultaten

Met behulp van de generieke turbinegegevens en de rekenmethodiek die in deze paragraaf is beschreven, zijn een drietal kansdichtheidsfuncties uitgewerkt. De kansdichtheidsfuncties zijn opgesteld voor de volgende drie vermogensklassen:

- 3 MW
- 3,6 MW
- 5 MW.

In de 3 MW klasse zijn verschillende turbines commercieel verkrijgbaar. Daarom is voor deze klasse een gemiddelde waarde berekend voor de ashoogte, rotordiameter en toerental. Voor de 3,6 MW en 5 MW klasse zijn respectievelijk de gegevens van de Siemens SWT 3.6-120 en Repower 5M gebruikt voor het bepalen van de kansdichtheidsfunctie. De gegevens zijn weergegeven in Tabel 15.

| Vermogen [MW] | Rotordiameter [m] | Masthoogte [m] | Toerental [rpm] |
|---------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 3 | 103,6 | 86,9 | 14,4 |
| 3,6 | 120 | 120 | 13 |
| 5 | 126 | 117 | 12,1 |

Tabel 15: Turbine gegevens

3.1.4 Aanname toerental

Bij het bepalen van de trefkans wordt er aangenomen dat bij de huidige generatie windturbines er zich twee situaties voor kunnen doen. Bladafbreuk bij nominaal toerental of bij overtoeren (2x nominaal). In de het Handboek wordt ook het toerental bij mechanisch remmen (1,25x nominaal) gebruikt. Het mechanisch remmen komt echter bij de huidige generatie windturbines niet meer voor, dat was een eigenschap van de oude netgekoppelde windturbines tot ongeveer 1 MW die ontwikkeld zijn tot en met tweede helft jaren '90. Dit type turbine wordt niet meer gemaakt, en windturbines draaien niet meer bij 1,25 maal het nominaal toerental. Wat wel nog voorkomt in de huidige generatie windturbines is dat het toerental kortstondig (enkele seconden) kan oplopen tot 1,05 tot 1,10 nominaal tijdens het afregelen. Doordat dit verhoogde toerental maar kortstondig optreedt, zal deze niet worden meegenomen in de bepaling van de trefkans.

Kansdichtheids-functies geven de kans per m² dat het zwaartepunt van het wegvliegend blad op die bepaalde m² terechtkomt. Vanwege het feit dat de kansdichtheid conditioneel is met betrekking tot bladbreuk, tellen deze kansen op tot 1 voor een cirkelvormig gebied met een straal van de maximale werpafstand. Dit is weergegeven in de formules 4 en 5.

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{x_{\max}} f(x) x dx d\varphi = 1 \quad (4)$$

$$2\pi \int_0^{x_{\max}} f(x) x dx = 1 \quad (5)$$

Om de trefkans van een object te bepalen, dient de uitkomst van de kansdichtheidsfunctie [per m²] vermenigvuldigd te worden met de frequentie van bladbreuk [per jaar] om tot een trefkans per m² per jaar te komen.

3.2 Mastbreuk

Bij mastbreuk wordt in hoofdstuk 2 onderscheid gemaakt tussen volledig falen en knikken in het bovenste deel. Hierbij komt de gondel niet op de grond. Daardoor is het effect van gedeeltelijk falen in de berekening van gevolgschade niet van belang en zal alleen voor volledig falen een kansdichtheidsverdeling worden afgeleid.

De kansdichtheidsverdeling voor het volledig falen van de mast hangt af van de hoogte waarop de mast knikt en van de richting waarin de mast zal vallen. Deze richting is aangenomen uniform verdeeld te zijn (geen voorkeursrichting).

Voor de hoogte van de knik van de mast wordt, evenals in het Handboek, conservatief uitgegaan van het knikken bij de voet. Dit betekent dat de gondel/rotor bij mastbreuk altijd op een mastlengte van de voet valt. De kansdichtheidsverdeling betreft nu een universele hoekverdeling over de richtingen in het horizontale vlak.

Een belangrijk verschil in rekenmethodiek voor mastbreuk ten opzichte van blad- en gondel/rotorafworp, is dat bij het mastbreukscenario met zowel impact van de mast als van de gondel/rotor wordt gerekend.

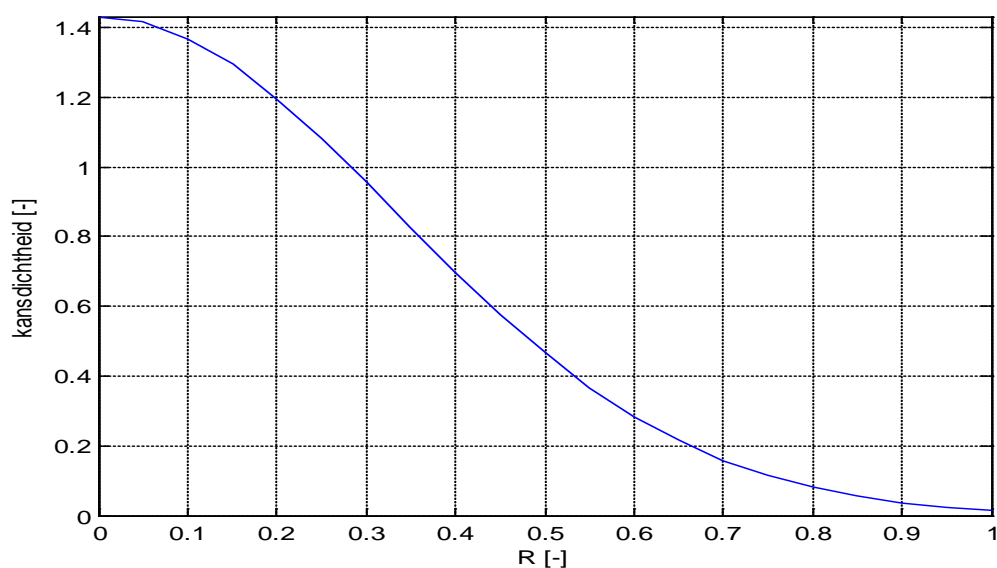
3.3 Gondel en/of rotorafworp

Om het scenario van gondel en/of rotorafworp in een risicoanalyse mee te kunnen nemen, dient een kansdichtheidsverdeling van de trefkanslocatie bekend te zijn. Er is echter onvoldoende casuïstiek

bekend om een verdeling af te kunnen leiden van incidenten. Wel kunnen er foto's van dergelijke incidenten gevonden worden, waarop te zien is dat de gondel of rotor direct naast de mast is neergekomen. Vanwege de massa van de gondel en rotor is het ook zeer aannemelijk dat deze niet ver van de voet van de windturbine valt. In het Handboek komt naar voren dat het effectgebied van het vallen van de gondel/rotor gelijk is aan de bladlengte (halve rotordiameter). In het voorliggende rapport wordt eveneens van dit effectgebied uitgegaan.

De meest voor de hand liggende keuze voor de verdeling is de normaalverdeling. Hiervan is de eigenschap dat de kans dat de gondel/rotor op een bepaalde afstand terecht komt groter wordt naarmate men dichterbij de voet van de windturbine komt (nog zonder rekening te houden met het bijbehorende oppervlak). Voor deze verdeling dient de parameter σ gekozen te worden die aangeeft hoe snel de kans afneemt als functie van de afstand tot de mast. Een kleinere σ betekent een lagere kans dat de gondel/rotor ver van de mast neerkomt. Om de kans geleidelijk tot aan de effectafstand te laten afnemen tot ongeveer nul, wordt voorgesteld uit te gaan dat 3σ gelijk is aan de bladlengte. Hierdoor neemt enerzijds de kans niet te snel af voor locaties die verder van de voet van de windturbine verwijderd zijn en anderzijds is de kans dat de gondel/rotor, op basis van deze verdeling, buiten de effectafstand terecht komt voldoende klein (minder dan 1%) zodat deze verwaarloosd kan worden. Buiten de effectafstand van een bladlengte wordt voortaan dan ook de kans afgekapt op nul.

De normaalverdeling is toegepast op de ruimtelijke situatie. De kans dat de gondel/rotor op een bepaalde afstand van de voet van de windturbine terechtkomt, is in de volgende figuur weergegeven. Hierbij is de afstand geschaald naar de bladlengte. Op de y-as staat nu een kansdichtheid die dimensieloos is (het oppervlak van het effectgebied is in de geschaalde grafiek eveneens 1, zonder eenheid). Om de kans per vierkante meter te vinden dient de gevonden kansdichtheid nog gedeeld te worden door de bladlengte in het kwadraat.



Figuur 3: Kansdichtheidsverdeling van de val van de gondel/rotor

Ter verduidelijking volgt een voorbeeld. Een windturbine heeft een bladlengte van 40m. De kansdichtheid op 16 meter afstand kan uit de grafiek worden afgelezen bij $R = 16/40 = 0,4$ en betreft ca. 0,7. Om de kans per vierkante meter te vinden dient dit getal nog gedeeld te worden door de bladlengte in het kwadraat, zijnde de straal van de cirkel waarbinnen de gondel of rotor terecht kan komen. Hieruit volgt dat de kans dat het massamiddelpunt van de gondel/rotor op een bepaalde plek op een afstand van 16 meter van de voet van de windturbine valt, gelijk is aan $0,7 / (40 \text{ m})^2 = 4,4 \cdot 10^{-4}$ per m^2 .

Voor toepassing in een kwantitatieve risicoanalyse dient bovenstaande nog vermenigvuldigd te worden met de frequentie van het afvallen van de gondel/rotor, om tot een frequentie per vierkante meter per jaar te komen.

Bijlage B:
Generieke Gegevens

DNV KEMA, januari 2013

INHOUDSOPGAVE BIJLAGE B

| | | |
|---|---|----|
| 1 | INLEIDING | 3 |
| 2 | TURBINEPARAMETERS ALS FUNCTIE VAN HET NOMINALE VERMOGEN | 4 |
| 3 | GENERIEKE RISICOCONTOUREN | 10 |
| 4 | CONCLUSIES | 16 |

1 INLEIDING

Vaak komt het voor dat projectontwikkelaars in de beginfase van een project waarin de vergunningen aangevraagd worden, nog geen definitief besluit hebben genomen over het type turbine dat ze willen toepassen. Soms is alleen de maximaal toegestane masthoogte of de vermogensklasse bekend. Om in dit stadium toch een risicoanalyse te kunnen uitvoeren met als doel inzicht te verkrijgen in de mogelijkheden en de beperkingen ten gevolge van de optredende risico's, kan gebruik gemaakt worden van generieke windturbinegegevens.

De turbineparameters die van belang zijn voor de risicoanalyses, met name voor de trefkansberekening ten gevolge van bladbreuk zijn:

- ashoogte
- rotordiameter en lengte van het blad
- nominaal toerental
- ligging van het zwaartepunt van het blad
- bladoppervlak.

In de onderhavige versie van het handboek zijn de bovenstaande parameters bepaald op basis van de hoofdkenmerken van 82 commercieel verkrijgbare windturbines in de range van 1 MW tot 5 MW (Hoofdstuk 2). Met deze parameters is een aantal analyses uitgevoerd op basis waarvan generieke conclusies zijn getrokken ten aanzien van de volgende aspecten:

- Maximale werpafstand bij bladbreuk als functie van het turbinevermogen en ashoogte.
- ligging van de risicocontouren ($PR = 10^{-5}$ per jaar en $PR = 10^{-6}$ per jaar) voor bladbreuk, mastbreuk en vallende gondel of rotor als functie van het turbinevermogen en ashoogte.

Dankzij de generieke conclusies kunnen gebruikers van het handboek in vele gevallen uitvoerig analysewerk achterwege laten. De generieke resultaten zijn geschikt om een eerste inschatting te maken van de optredende risico's en te beoordelen of en voor welk doel een risicoanalyse nodig is. Indien gewenst kan een risicoanalyse uitgevoerd worden die gebruik maakt van specifieke windturbinegegevens in plaats van generieke data.

In hoofdstuk 3 zijn generieke afstanden afgeleid voor de ligging van de risicocontouren $PR = 10^{-5}$ per jaar en $PR = 10^{-6}$ per jaar. Voor het bepalen van de trefkans van objecten conform bijlage C moet eerst de kans dat het zwaartepunt van het afgebroken blad op een bepaalde plaats terecht komt, $p_{zwp}(x, y)$, worden berekend. Op basis van generieke parameters zijn in Hoofdstuk 3 de kansen berekend en grafisch weergegeven voor windturbines met een vermogen in de range van 1 MW tot 5 MW.

De conclusies worden kort samengevat in hoofdstuk 4.

2 TURBINEPARAMETERS ALS FUNCTIE VAN HET NOMINALE VERMOGEN

In Nederland worden drie *windklassen* onderscheiden. De hoofdparameters van de turbine zoals de diameter, ashoogte en rotortoerental zijn bij gelijkblijvend vermogen afhankelijk van de windklasse waarvoor de turbine is geoptimaliseerd. Het windklimaat in het binnenland is in overeenstemming met windklasse 3 (ook wel IEC klasse 3 genoemd). Het windklimaat op zee en op grote hoogte aan de kust komt overeen met windklasse 1 (IEC klasse 1). Turbines in het binnenland hebben over het algemeen een grotere diameter, een grotere ashoogte en een lager nominaal toerental. Voor het toepassen van generieke windturbinegegevens tijdens het uitvoeren van risicoanalyses zijn in deze bijlage turbines opgenomen die vallen in IEC klasse 1, 2, en 3.

Parameters van belang voor risicoanalyses zijn:

1. ashoogte
2. rotordiameter en lengte van het blad
3. nominaal toerental
4. ligging van het zwaartepunt van het blad
5. bladoppervlak.

Om de eerste drie parameters te bepalen zijn de kenmerken van 82 commercieel verkrijgbare driebladige turbines in de range van 1 MW tot 5 MW verzameld. Deze gegevens zijn weergegeven in Tabel 1. Veel windturbine modellen zijn verkrijgbaar met verschillende ashoogtes. Door de grote variatie in ashoogtes waarin een individueel windturbine model kan worden uitgevoerd is er voor gekozen om in Tabel 1 de minimale en maximale ashoogte waarin de turbine uitgevoerd kan worden weer te geven.

Tabel 1: Hoofdparameters van commercieel verkrijgbare driebladige turbines met een vermogen in de range tot 5000 kW

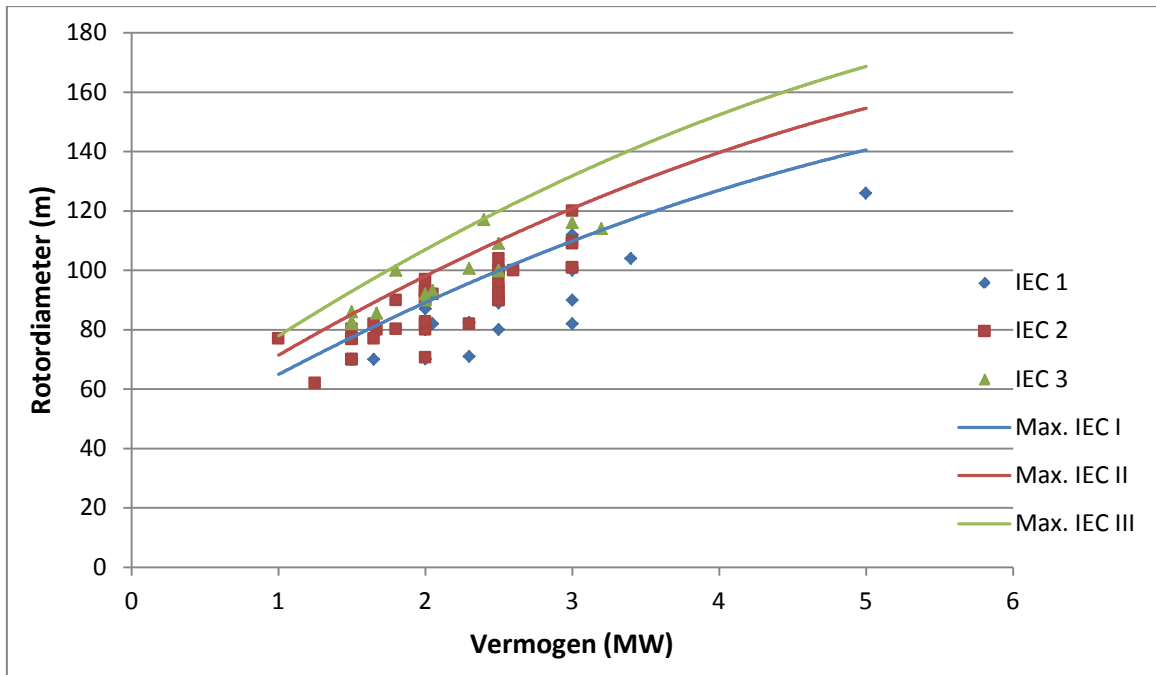
| Turbine type | Vermogen [MW] | Diameter [m] | Toerental [RPM] | Masthoogte minimaal [m] | Masthoogte maximaal [m] |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| Leitwind LTW77-1000 | 1 | 77 | 18 | 65 | |
| Fuhrlander FL 1250/62 | 1,25 | 62 | 18,9 | 50 | 70 |
| Acciona AW-70/1500 | 1,5 | 70 | 20,2 | 60 | 80 |
| Acciona AW-77/1500 | 1,5 | 77 | 18,3 | 60 | 80 |
| Acciona AW-82/1500 | 1,5 | 82 | 16,7 | 60 | 80 |
| Fuhrlander FL 1500/70 | 1,5 | 70 | 22 | 65 | 100 |
| Fuhrlander FL 1500/77 | 1,5 | 77 | 19 | 65 | 100 |
| Fuhrlander FL MD/70 | 1,5 | 70 | 21 | 65 | 114,5 |
| Fuhrlander FL MD/77 | 1,5 | 77 | 19 | 61,5 | 114,5 |
| Leitwind LTW77-1500 | 1,5 | 76,8 | 17,8 | 61,5 | 80 |

| | | | | | |
|----------------------------|------|------|-------|------|-----|
| Leitwind LTW80-1500 | 1,5 | 80,3 | 17,8 | 60 | 100 |
| Leitwind LTW86-1500 | 1,5 | 86 | 15,8 | 80 | 100 |
| STX Windpower STX82 1.5 MW | 1,5 | 82,7 | 17 | 65 | 101 |
| Vensys 70 | 1,5 | 70 | 19 | 65 | 85 |
| Vensys 77 | 1,5 | 77 | 17,3 | 61,5 | 100 |
| Vensys 82 | 1,5 | 82,3 | 17,3 | 85 | 100 |
| M Torres MT TWT 70/1650 | 1,65 | 70 | 17 | 71 | |
| M Torres MT TWT 77/1650 | 1,65 | 77 | 20 | 71 | 81 |
| M Torres MT TWT 82/1650 | 1,65 | 82 | 18 | 71 | 81 |
| Alstom Power 80 | 1,67 | 80 | 18,4 | 80 | |
| Alstom Power 86 | 1,67 | 85,5 | 17,21 | 80 | |
| Leitwind LTW80-1800 | 1,8 | 80,3 | 17,8 | 60 | 80 |
| Repower MM100 | 1,8 | 100 | 13,9 | 80 | 100 |
| Vestas V90/1800 | 1,8 | 90 | 14,5 | 80 | 105 |
| Dewind D8.2 | 2 | 80 | 18,6 | 80 | |
| Dewind D9 | 2 | 93 | 16 | 80 | 100 |
| Dewind D9.1 | 2 | 93 | 16 | 80 | 100 |
| Dewind D9.2 | 2 | 93 | 16,3 | 80 | 100 |
| Enercon E82/2000 | 2 | 82 | 18 | 78 | 138 |
| EWT Directwind 2000/90 | 2 | 90,5 | 15,75 | 85 | 105 |
| Gamesa G80/2000 | 2 | 80 | 19 | 60 | 100 |
| Gamesa G87/2000 | 2 | 87 | 19 | 67 | 100 |
| Gamesa G90/2000 | 2 | 90 | 19 | 67 | 100 |
| Gamesa G97/2000 | 2 | 97 | 17,8 | 78 | 120 |
| Leitwind LTW70-2000 | 2 | 70 | 20,8 | 60 | |
| STX Windpower STX72 | 2 | 70 | 22,5 | 65 | 100 |
| STX Windpower STX82 2.0 | 2 | 83 | 18,5 | 80 | 88 |
| STX Windpower STX92 2.0 | 2 | 92 | 16,5 | 60 | 88 |
| Vestas V80/2000 | 2 | 80 | 16,7 | 60 | 100 |
| Vestas V90/2000 | 2 | 90 | 14,5 | 80 | 125 |
| Eviag ev2.93 | 2,05 | 93 | 17,7 | 85 | 140 |
| Repower MM82/2050 | 2,05 | 82 | 17,1 | 59 | 100 |
| Repower MM92/2050 | 2,05 | 92 | 15 | 68,5 | 100 |
| Avantis AV 1010 | 2,3 | 101 | 14,3 | 99 | |
| Enercon E70/2300 | 2,3 | 71 | 21,5 | 57 | 113 |
| Enercon E82/2300 | 2,3 | 82 | 18 | 78 | 138 |
| Siemens SWT-2.3-82 VS | 2,3 | 82 | 18 | 80 | |
| Nordex N117/2400 | 2,4 | 117 | 13,2 | 91 | 140 |
| Avantis AV 928 | 2,5 | 93 | 16 | 80 | |
| Clipper Liberty C89 | 2,5 | 89 | 15,5 | 80 | |
| Clipper Liberty C93 | 2,5 | 93 | 15,5 | 80 | |
| Clipper Liberty C96 | 2,5 | 96 | 15,5 | 80 | |
| Eviag ev100 | 2,5 | 100 | 16,5 | 85 | 100 |
| Eviag ev90 | 2,5 | 90 | 18,1 | 85 | 160 |
| Fuhrlander FL 2500/100 | 2,5 | 100 | 17,1 | 85 | 160 |

| | | | | | |
|--------------------------|-----|-----|------|-----|-----|
| Fuhrlander FL 2500/104 | 2,5 | 104 | 17,1 | 85 | 161 |
| Fuhrlander FL 2500/90 | 2,5 | 90 | 18,1 | 85 | 160 |
| M Torres MT TWT 100/2500 | 2,5 | 100 | 17 | 103 | |
| M Torres MT TWT 109/2500 | 2,5 | 109 | 17 | 103 | |
| M Torres MT TWT 90/2500 | 2,5 | 90 | 17 | 103 | |
| Nordex N100/2500 | 2,5 | 100 | 14,8 | 75 | 100 |
| Nordex N80/2500 | 2,5 | 80 | 18,9 | 60 | |
| Nordex N90/2500 | 2,5 | 90 | 18,1 | 65 | 80 |
| PowerWind 100 | 2,5 | 100 | 14 | 80 | 100 |
| PowerWind 90 | 2,5 | 90 | 15,5 | 80 | 98 |
| Vensys 100 | 2,5 | 100 | 14,5 | 100 | |
| Vensys 90 | 2,5 | 90 | 16 | 80 | |
| Vestas V100/2600 | 2,6 | 100 | 13,4 | 80 | |
| Acciona AW3000-100 | 3 | 100 | 14,2 | 100 | 120 |
| Acciona AW3000-109 | 3 | 109 | 13,2 | 100 | 120 |
| Acciona AW3000-116 | 3 | 116 | 12,3 | 100 | 120 |
| Alstom Power 100 | 3 | 101 | 14,2 | 75 | 100 |
| Alstom Power 110 | 3 | 110 | 13,6 | 75 | 101 |
| Enercon E101/3000 | 3 | 101 | 14,5 | 99 | 135 |
| Enercon E82/3000 | 3 | 82 | 18,5 | 78 | 138 |
| Fuhrlander FL 3000/120 | 3 | 120 | 14,8 | 90 | 140 |
| Leitwind LTW101-3000 | 3 | 101 | 14,5 | 97 | |
| Vestas V112/3000 | 3 | 112 | 12,8 | 84 | 94 |
| Vestas V90/3000 | 3 | 90 | 16,1 | 65 | 80 |
| Repower 3.2M114 | 3,2 | 114 | 12,1 | 93 | 123 |
| Repower 3.4M104 | 3,4 | 104 | 13,8 | 90 | 128 |
| Repower 5M | 5 | 126 | 12,1 | 117 | |

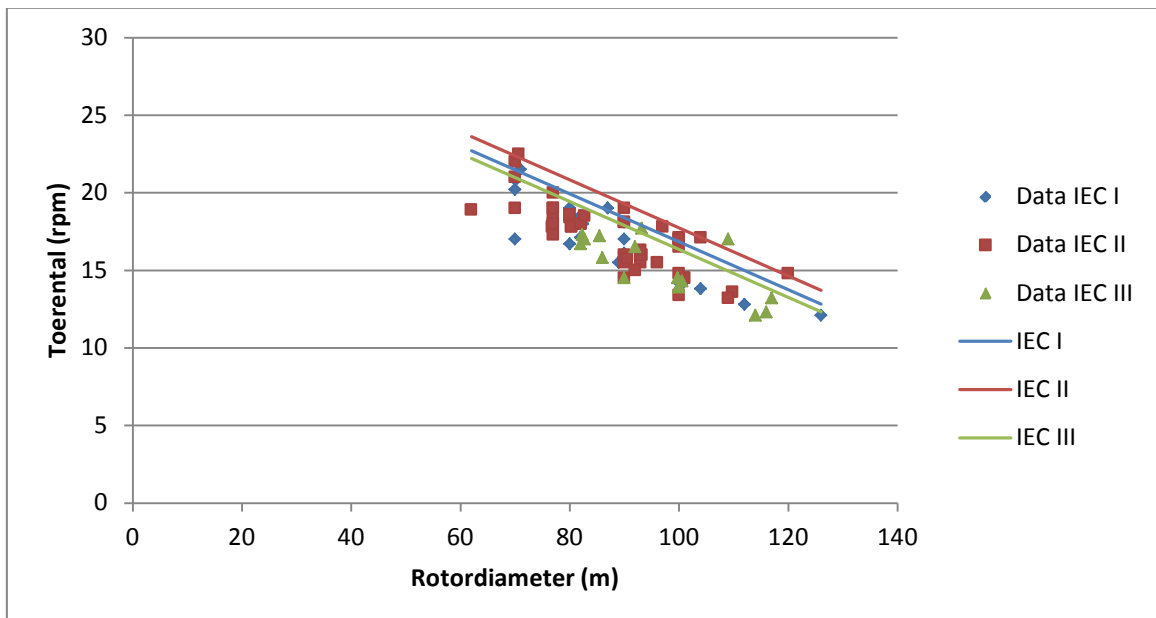
In Figuur 1 is de rotordiameter weergegeven als functie van het nominaal vermogen. De data punten zijn de turbine specifieke gegevens zoals deze in Tabel 1 staan beschreven. Naast de turbine specifieke data zijn er 3 functies weergegeven in

Figuur 1. Deze functies geven de maximale waarden weer van de rotordiameter van turbine met een IEC 1, 2 en 3 klasse. Deze functies zijn bepaald door gebruik te maken van vergelijking 2.1 en de constante waardes zoals weergegeven in Tabel 2.

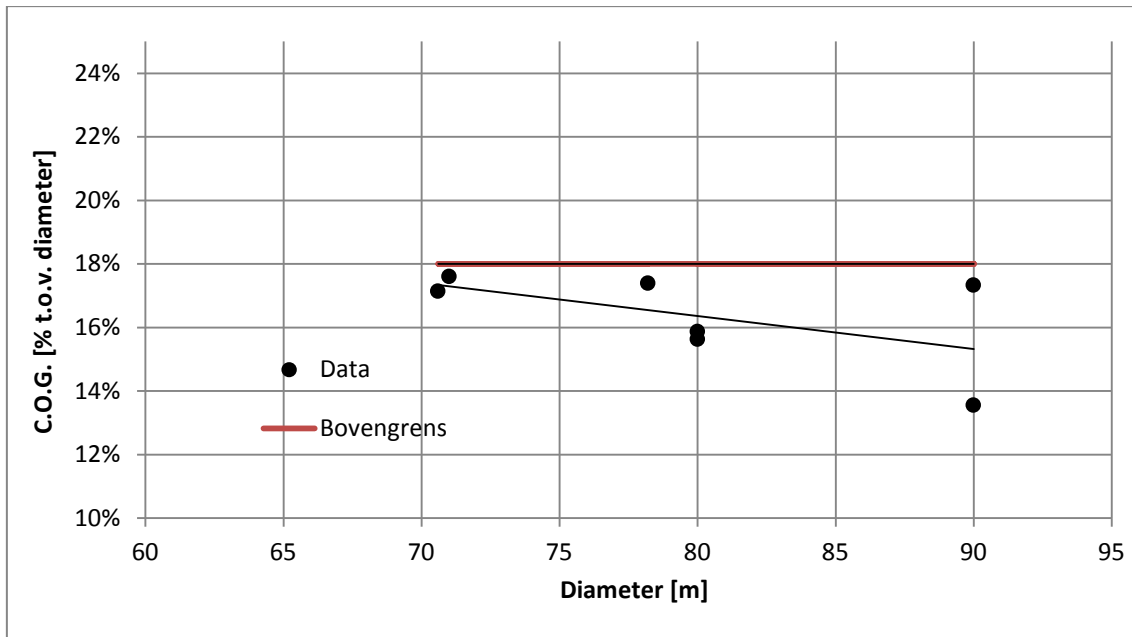


Figuur 1: Diameter als functie van het nominaal vermogen

In **Figuur 2** is het toerental als functie van de rotordiameter weergegeven. De datapunten zijn de turbine specifieke gegevens zoals deze in Tabel 1 zijn beschreven. Naast de turbine specifieke data zijn er 3 functies weergegeven in **Figuur 2**. Deze functies geven de maximale waarden weer van de rotordiameter van turbine met een IEC 1, 2 en 3 klasse. Deze functies zijn bepaald door gebruik te maken van vgl. 2.2 en de constante waarden zoals weergegeven in **Tabel 2**.



Figuur 2: Toerental als functie van rotordiameter

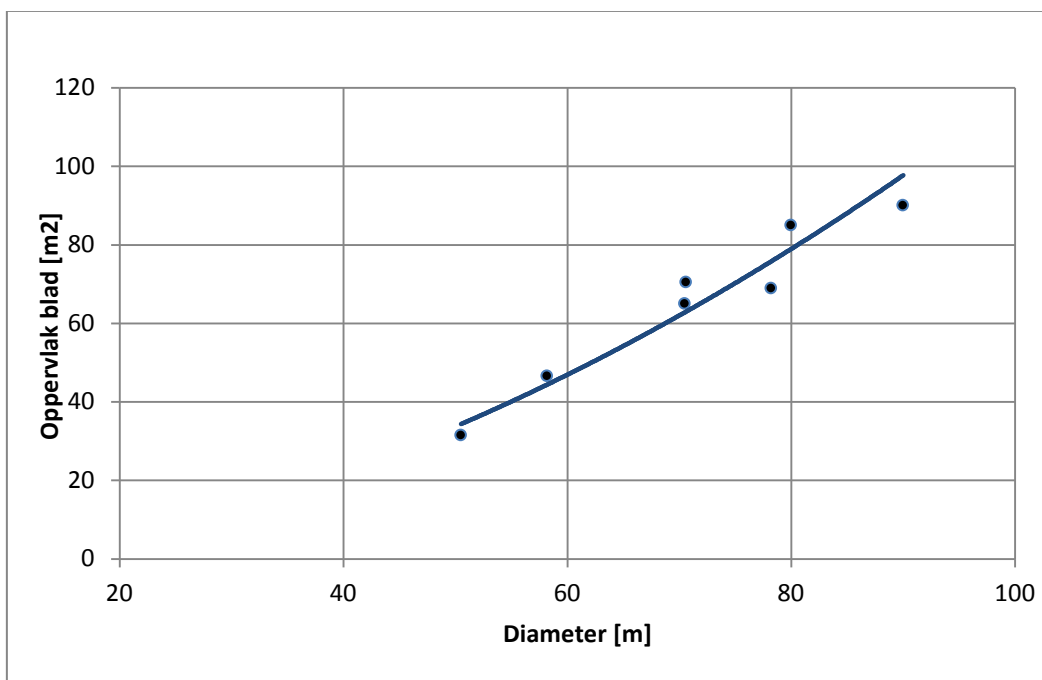


Figuur 3: Ligging van het zwaartepunt van een rotorblad als functie van de diameter

Voor de parameters zwaartepunt van het blad en bladoppervlak van het blad zijn de kenmerken van een aantal turbinebladen geanalyseerd.

De ligging van het zwaartepunt is in **Figuur 3** gegeven als functie van de diameter. Het blijkt dat bij met name de grotere turbines de ligging van het zwaartepunt een grote spreiding vertoont. Als conservatieve waarde wordt de getoonde bovengrens van 18% van de rotordiameter aangehouden. Deze waarde is weergegeven met vgl. 2.3 en de constante uit **Tabel 2**.

Het oppervlak van het blad is in **Figuur 4** gegeven als functie van de diameter. Deze gegevens zijn gefit met vgl. 2.4. De lengte van het blad kan worden berekend met vgl. 2.5.



Figuur 4: Bladoppervlak als functie van de diameter

De vergelijkingen van boven beschreven parameters zijn gegeven in vgl. 2.1 t/m 2.5. De bijbehorende constanten zijn gegeven in **Tabel 2**.

$$\text{Diameter [m]} \quad D = c_1 \cdot \sqrt{P_{\text{nom}}} \quad (2.1)$$

$$\text{Nominaal Toerental [rpm]} \quad n = \frac{c_2}{D} + c_3 \quad (2.2)$$

$$\text{Zwaartepunt t.o.v. rotorcentrum [m]} \quad r_{\text{zw}} = c_4 \cdot D \quad (2.3)$$

$$\text{Kritiek bladoppervlak}^1 \text{ [m}^2\text{]} \quad A_c = 1,1 \cdot c_5 \cdot D^{c_6} \quad (2.4)$$

$$\text{Lengte blad [m]} \quad L_b = \frac{D}{2} - c_7 \cdot D \quad (2.5)$$

Tabel 2: Constanten voor de vgl. 2.1 t/m 2.5 per IEC klasse

| Constante | IEC-3 | IEC-2 | IEC-1 |
|-----------|--------|--------|--------|
| C_1 | 2,4 | 2,2 | 2 |
| C_2 | 1250 | 1250 | 1250 |
| C_3 | 3,7 | 5,1 | 4,2 |
| C_4 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| C_5 | 0,029 | 0,029 | 0,029 |
| C_6 | 1,81 | 1,81 | 1,81 |
| C_7 | 0,0132 | 0,0132 | 0,0132 |

3 GENERIEKE RISICOCONTOUREN

Met de in hoofdstuk 2 berekende generieke windturbinegegevens en op basis van de faalgegevens in bijlage A, de rekenmethodiek in Bijlage C (kogelbaanmodel), en de van toepassing zijnde risicocriteria in bijlage D zijn in dit hoofdstuk een aantal generieke resultaten en conclusies uitgewerkt. Het gaat om:

- ligging van de risicocontouren $PR = 10^{-5}$ per jaar en $PR = 10^{-6}$ per jaar als functie van het turbinevermogen tengevolge van bladbreuk, mastbreuk en afvallen van gondel of rotor
- risicocontouren tijdens tipbreuk en ijsafwerping.

Voor het bepalen van generieke conclusies en resultaten zijn een aantal case studies uitgevoerd waarvan hier de uitgangspunten en resultaten zijn gepresenteerd.

Het gaat uitsluitend om 3-bladige turbines, geoptimaliseerd voor IEC klasse 1 en voor IEC klasse 2, met bladhoekverstelling (dus zonder remtippen), in de vermogensklasse van 1000 kW tot 5000 kW. De hoofdkenmerken zijn afgeleid uit de vergelijkingen 2.1 t/m 2.5 en gegeven in **Tabel 3** voor IEC klasse 1 turbines en in **Tabel 4** voor IEC klasse 2 turbines.

Tabel 3: Hoofdkenmerken van generieke turbines (IEC klasse 1)

| Turbine type | WT1000 | WT2000 | WT3000 | WT4000 | WT5000 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vermogen [kW] | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| Diameter [m] | 63 | 89 | 110 | 126 | 141 |
| Afstand zwaartepunt afgebroken bladdeel tot rotor centrum [m] | 11,4 | 16,1 | 19,7 | 22,8 | 25,5 |
| Nominaal toerental | 24,0 | 18,2 | 15,6 | 14,1 | 13,0 |
| Lengte afgebroken bladdeel [m] | 30,8 | 43,5 | 53,3 | 61,6 | 68,8 |
| Kritiek oppervlak afgebroken bladdeel [m ²] | 58 | 109 | 157 | 203 | 249 |

Tabel 4: Hoofdkenmerken van generieke turbines (IEC klasse 2)

| Turbine type | WT1000 | WT2000 | WT3000 | WT4000 | WT5000 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vermogen [kW] | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| Diameter [m] | 70 | 98 | 120 | 139 | 156 |
| Afstand zwaartepunt afgebroken bladdeel tot rotor centrum [m] | 12,5 | 17,7 | 21,7 | 25,0 | 28,0 |
| Nominaal toerental | 23,1 | 17,8 | 15,5 | 14,1 | 13,1 |
| Lengte afgebroken bladdeel [m] | 33,9 | 47,9 | 58,7 | 67,7 | 75,7 |
| Kritiek oppervlak afgebroken bladdeel [m ²] | 69 | 129 | 186 | 242 | 296 |

In de analyses zijn de scenario's en faalkansen meegenomen zoals gegeven in Tabel 5 (afgeleid uit Bijlage A).

Tabel 5: Scenario's en faalfrequenties voor generieke turbines

| Scenario | Faalfrequentie per turbine per jaar |
|---|-------------------------------------|
| Bladbreek Breuk van geheel blad, onder te verdelen in de volgende scenario's: | $8,4 \cdot 10^{-4}$ |
| <i>Bladbreek bij nominaal bedrijf</i> | $8,4 \cdot 10^{-4}$ |
| <i>Bladbreek bij overtoeren (2 keer nominaal toerental)</i> | $5,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Mastbreuk Omvallen van de turbine door mastbreuk, onder te verdelen in de volgende scenario's: | $1,3 \cdot 10^{-4}$ |
| Naar beneden vallen van hele gondel en/of rotor | $4,0 \cdot 10^{-5}$ |

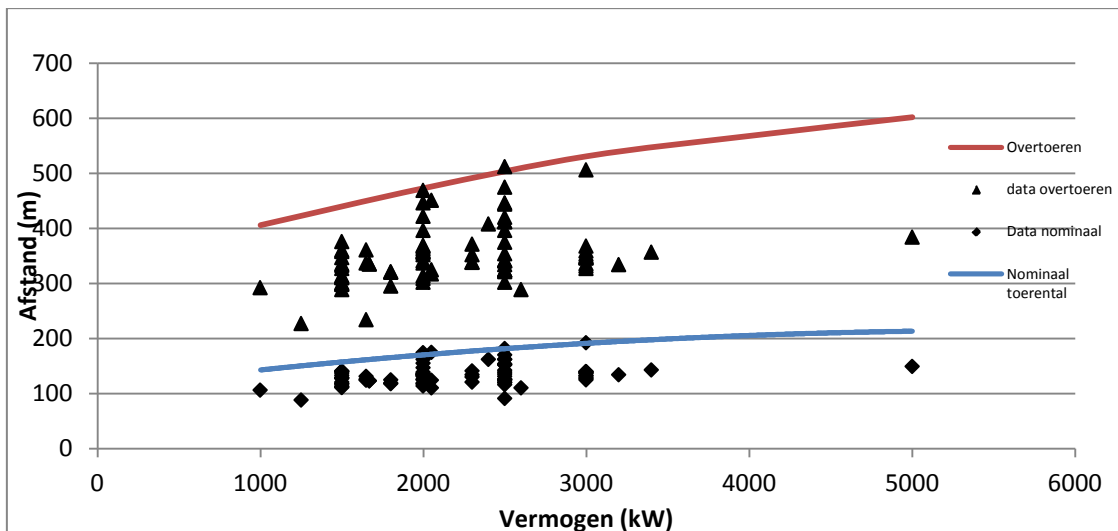
Allereerst zijn de maximale werpafstanden bij bladbreek berekend. De resultaten voor IEC klasse 1 windturbines zijn weergegeven in Tabel 6 en **Figuur 5**. Voor IEC 2 klasse turbines zijn de maximale werpafstanden weergegeven in Tabel 7 en **Figuur 6**. In zowel **Figuur 5** als **Figuur 6** zijn ook de maximale werpafstanden van bladen van de turbines uit Tabel 1 weergegeven. Door de conservatieve benadering van de generieke turbinegegevens liggen de turbine specifiek werpafstanden lager dan de generieke werpafstanden uit Tabel 6 en Tabel 7.

Tabel 6: Maximale werpafstanden [m] van bladen, per vermogensklasse (IEC klasse 1)

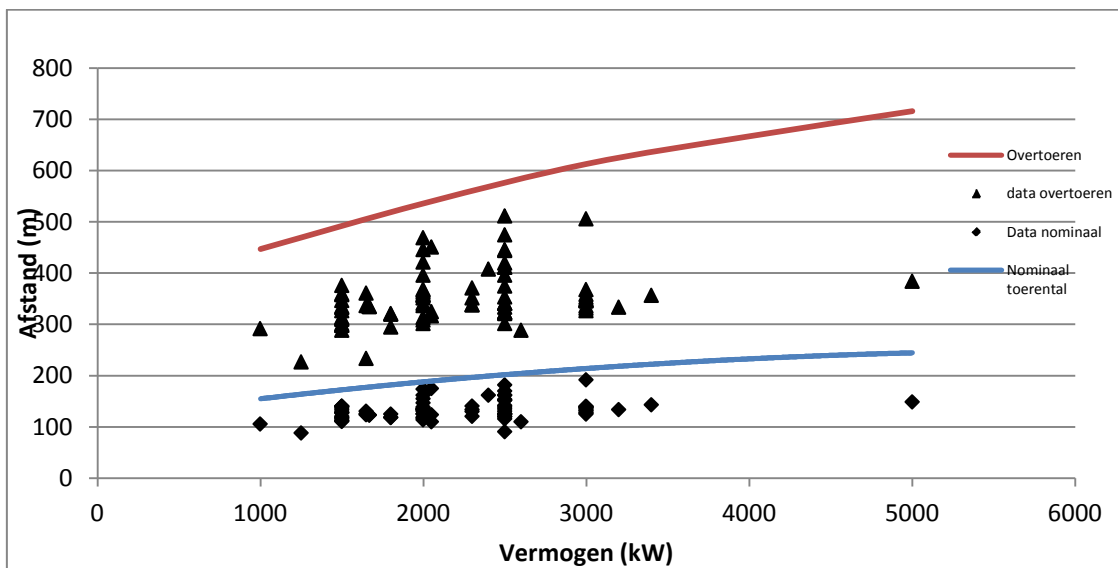
| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|--------------------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| Max Werpafstand [m] | | | | | | | | | | |
| Nominaal | 131 | 143 | 158 | 170 | 176 | 193 | 186 | 204 | 202 | 214 |
| Overtoeren 2*nominaal | 389 | 406 | 457 | 473 | 507 | 531 | 543 | 568 | 585 | 602 |

Tabel 7: Maximale werpafstanden [m] van bladen, per vermogensklasse (IEC klasse 2)

| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|--------------------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| Max Werpafstand [m] | | | | | | | | | | |
| Nominaal | 142 | 155 | 175 | 187 | 198 | 216 | 213 | 231 | 233 | 245 |
| Overtoeren 2*nominaal | 430 | 447 | 519 | 536 | 588 | 613 | 641 | 667 | 699 | 716 |



Figuur 5: Maximale werpafstanden van bladen, per vermogensklasse (IEC I)



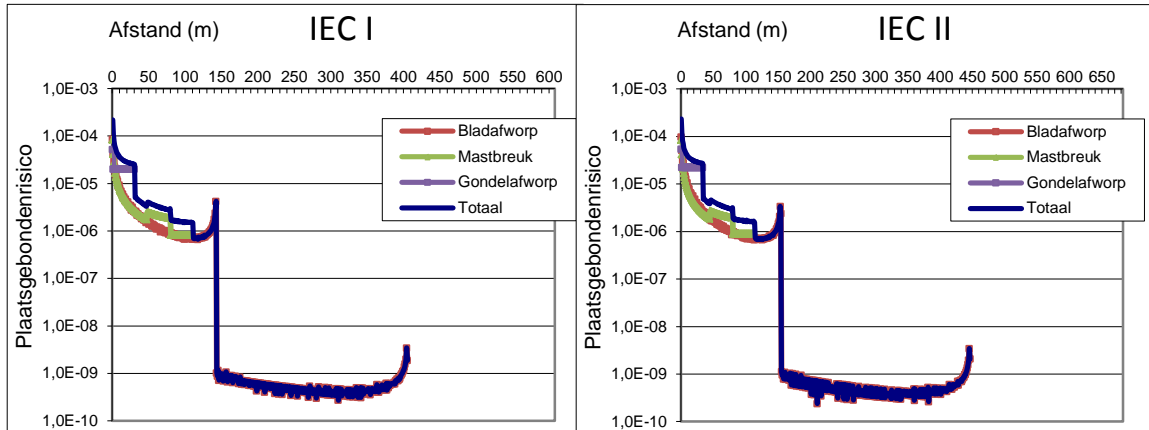
Figuur 6: Maximale werpafstanden van bladen, per vermogensklasse (IEC II)

Het risico van mastbreuk voor de omgeving beperkt zich tot een afstand die gelijk is aan de ashoogte plus de halve rotordiameter. Voor het naar beneden vallen van de gondel of rotor is deze afstand gelijk aan de halve diameter. Aanvullende turbinekenmerken voor het berekenen van het PR bij mastbreuk zijn gegeven in **Tabel 8**

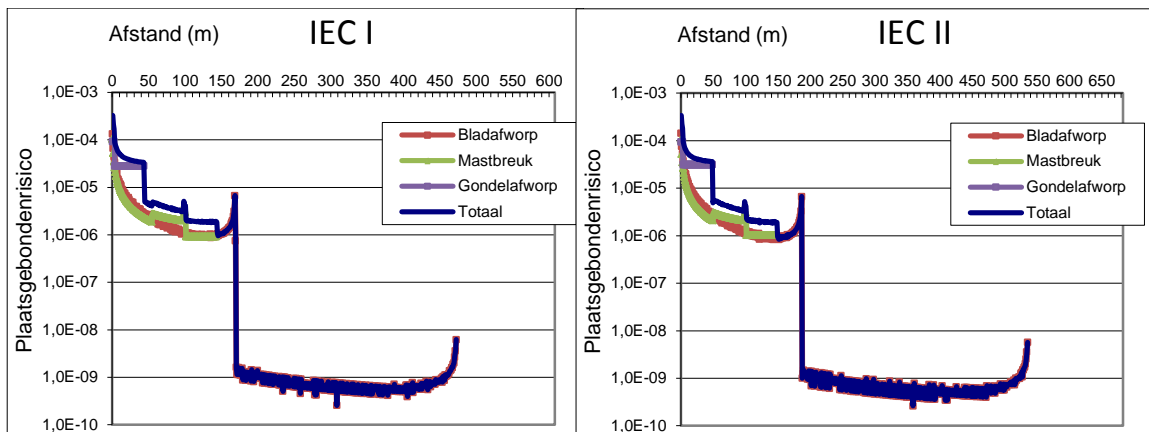
Tabel 8: Aanvullende generieke turbinekenmerken voor berekenen van het PR t.g.v. mastbreuk en gondelafwerp

| Turbine type | WT1000 | WT2000 | WT3000 | WT4000 | WT5000 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vermogen [kW] | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| diameter toren [m] | 4 | 5 | 5 | 7,5 | 10 |
| Max lengte gondel [m] | 5 | 10 | 15 | 17 | 18 |
| Hoogte gondel [m] | 2 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| solidity | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

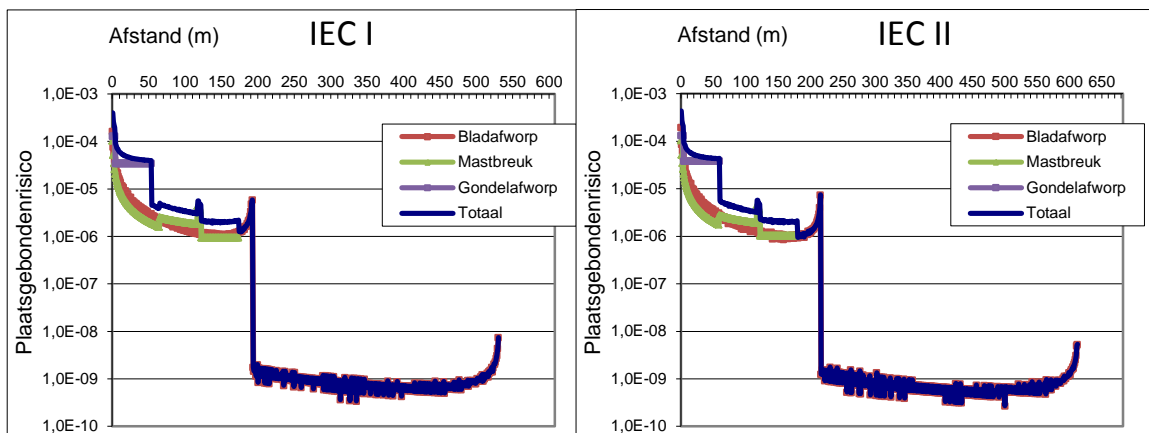
Op basis van de generieke gegevens van windturbines met een vermogen van 1000 kW, 2000 kW, 3000 kW, 4000 kW en 5000 kW en de faalfrequenties uit Tabel 5, is het PR berekend als functie van de afstand tot de turbine. Beschouwd zijn het falen van de bladen, de mast en de gondel of rotor afzonderlijk en het totale PR van deze drie faalmechanismen gezamenlijk. De resultaten zijn weergegeven voor zowel IEC klasse 1 als klasse 2 turbines in de **Figuur 7** t/m **Figuur 11**.



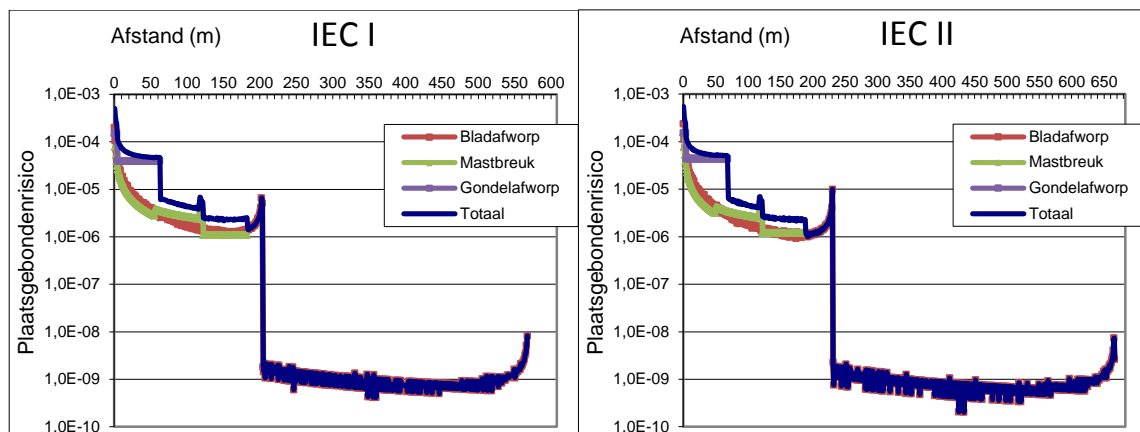
Figuur 7: PR als functie van de afstand tot de windturbine (1000 kW)



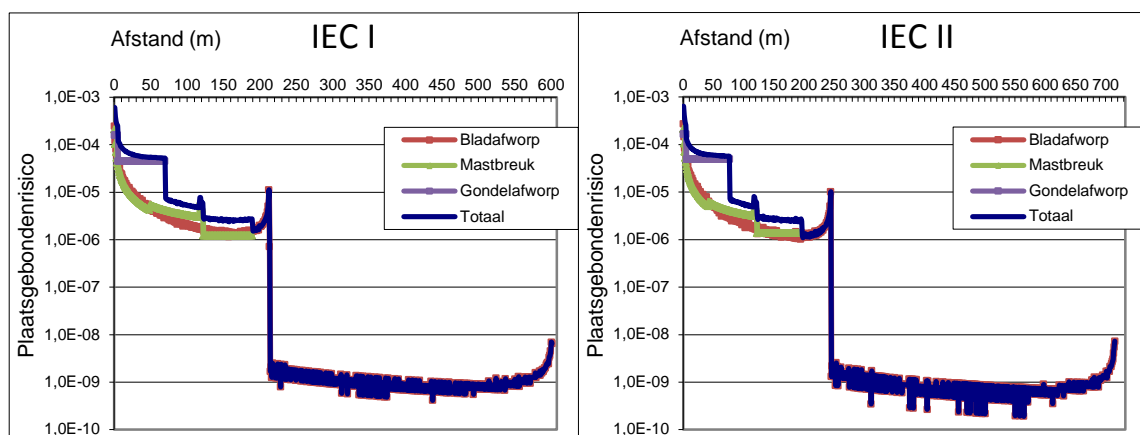
Figuur 8: PR als functie van de afstand tot de windturbine (2000 kW)



Figuur 9: PR als functie van de afstand tot de windturbine (3000 kW)



Figuur 10: PR als functie van de afstand tot de windturbine (4000 kW)



Figuur 11: PR als functie van de afstand tot de windturbine (5000 kW)

Zoals in Bijlage C is uiteengezet treden scherpe pieken op bij de maximale werpafstanden voor de gebeurtenissen ‘normaal bedrijf’ en ‘overtoeeren’. Deze zijn een gevolg van het gebruikte rekenmodel. Bij het kogelbaanmodel wordt er van uitgegaan dat het toerental voor de gebeurtenissen waarbij bladbreuk optreedt een constante waarde is. In werkelijkheid zal het toerental niet constant zijn, maar variëren met als gevolg dat de pieken zullen afvlakken.

Als generiek uitgangspunt voor een risicoanalyse kan worden gesteld dat de afstand van de PR = 10^{-6} contour tot de turbine gelijk is aan het maximum van ashoogte plus halve rotordiameter en de maximale werpafstand bij ‘normaal bedrijf’.

Verder blijkt dat de afstand van de PR = 10^{-5} contour tot de turbine gelijk is aan de halve rotordiameter.

De volgende generieke conclusies kunnen worden getrokken:

- 1 de PR = 10^{-6} contour is gelijk aan het maximum van *ashoogte plus halve rotordiameter* en *maximale werpafstand bij nominaal rotortoerental*
- 2 de PR = 10^{-5} contour is gelijk aan de halve rotordiameter

De waarden voor de verschillende vermogensklassen zijn gegeven in Tabel 9. Merk op dat deze generieke conclusies geldig zijn voor:

- driebladige turbines met een maximaal vermogen van 5000 kW
- met stalen mast
- met kunststof bladen (geen stalen bladwortel)
- gecertificeerde turbines.

Tabel 9: Afstand [m] tussen de contouren voor $PR = 10^{-6}$ per jaar en $PR = 10^{-5}$ per jaar en de windturbine voor verschillende vermogensklassen

IEC 1

| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|----------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| PR = 10^{-6} | 131 | 143 | 158 | 170 | 176 | 193 | 186 | 204 | 202 | 214 |
| PR = 10^{-5} | 32 | 32 | 45 | 45 | 55 | 55 | 63 | 63 | 71 | 71 |

IEC 2

| Turbine type | WT1000 | | WT2000 | | WT3000 | | WT4000 | | WT5000 | |
|----------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Vermogen [kW] | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 4000 | | 5000 | |
| Ashoogte [m] | 60 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 90 | 120 | 100 | 120 |
| PR = 10^{-6} | 142 | 155 | 175 | 187 | 198 | 216 | 213 | 231 | 233 | 245 |
| PR = 10^{-5} | 35 | 35 | 49 | 49 | 60 | 60 | 70 | 70 | 78 | 78 |

4 CONCLUSIES

De volgende generieke conclusies kunnen worden getrokken:

- de $PR = 10^{-6}$ contour is gelijk aan het maximum van *ashoogte plus halve rotordiameter* en *maximale werpafstand bij nominaal rotortoerental*
- de $PR = 10^{-5}$ contour is gelijk aan de halve rotordiameter.

De generieke windturbinegegevens zijn op conservatieve wijze bepaald, zodat er wezenlijke verschillen mogelijk zijn met een bepaald type windturbine uit dezelfde vermogensklasse. Er wordt dan ook aanbevolen om een risicoanalyse ten behoeve van de vergunningsaanvraag te baseren op specifieke windturbinegegevens in plaats van generieke data. De generieke resultaten zijn met name geschikt om een eerste inschatting te maken ten aanzien van de optredende risico's en zodoende te beoordelen of en voor welk doel een risicoanalyse nodig is.

Bijlage C:

Rekenmethodiek Werpafstanden en Trefkansen

Versie 3.0, november 2011

Bewerkt door: DNV KEMA

Versie 2.0, januari 2005

Bewerkt door: H.Braam (ECN)

Auteurs versie 1.0, mei 2002

H. Braam (ECN)

J.L. Brinkman (NRG)

VERANTWOORDING

In 2012 heeft DNV KEMA de opdracht gekregen om het handboek opnieuw te actualiseren. Deze laatste actualisatie behelst:

- uitbreiding van generieke gegevens met turbines met een vermogen vanaf 3 MW
- actualisatie van de faalscenario's en faalstatistieken
- actualisatie van de regelgeving, onder andere het Activiteitenbesluit
- aanpassing van rekenmodellen voor buisleidingen en hoogspanningslijnen
- actualisatie van regelgeving van Ministeries, Rijkswaterstaat, ProRail, Gasunie, TenneT en RIVM
- verbetering van de leesbaarheid en toegankelijkheid van het handboek door middel van redactionele aanpassingen.

In dit kader is ook Bijlage C herzien, waarbij met name de onderdelen die leidingen en kabels/lijnen betreffen (zowel bovengronds als ondergronds) gewijzigd zijn.

INHOUDSOPGAVE BIJLAGE C

| | Pagina |
|--|--------|
| BIJLAGE C.1: BLADBREUK..... | 5 |
| 1 Inleiding..... | 6 |
| 2 Werpmodellen..... | 9 |
| 2.1 Ballistisch model zonder luchtkrachten..... | 10 |
| 2.1.1 Bewegingsvergelijking..... | 10 |
| 2.1.2 Verdelingsfuncties..... | 11 |
| 2.2 Ballistisch model met luchtkrachten..... | 12 |
| 2.2.1 Uitgangspunten..... | 12 |
| 2.2.2 Bewegingsvergelijking..... | 13 |
| 2.2.3 Verdelingsfuncties..... | 15 |
| 2.3 Ongevallenscenario's..... | 16 |
| 3 Trefkansberekeningen..... | 18 |
| 3.1 Personen (Plaatsgebonden Risico)..... | 18 |
| 3.2 Wegen..... | 19 |
| 3.2.1 Infrastructuur..... | 19 |
| 3.2.2 Passanten..... | 20 |
| 3.3 Ruimtelijke objecten..... | 21 |
| 3.3.1 Raakfrequentie: algemene aanpak..... | 21 |
| 3.3.2 Raakfrequentie: Vereenvoudigde aanpak..... | 24 |
| 3.3.3 Kritieke raakfrequentie..... | 27 |
| 3.4 Gebieden..... | 28 |
| 4 Referenties..... | 29 |
| BIJLAGE C.2: MASTBREUK..... | 30 |
| 5 Trefkansberekeningen..... | 31 |
| 5.1 Personen (Plaatsgebonden Risico)..... | 31 |
| 5.2 Infrastructuur..... | 32 |
| 5.3 Ruimtelijke objecten..... | 34 |
| 5.4 Gebieden..... | 35 |

BIJLAGE C.3: INCIDENTEN BINNEN DE ROTORDIAMETER36

| | | |
|-----|---|----|
| 6 | Scenario's | 37 |
| 6.1 | Afvallen van Gondel en Rotor | 37 |
| 6.2 | Kleine Onderdelen uit de Gondel of de Rotor | 37 |
| 6.3 | Bladfragmenten na Botsing met Toren | 37 |
| 6.4 | Ijsafwerping..... | 38 |

BIJLAGE C.4: INCIDENTEN MET BUISLEIDINGEN EN ELEKTISCHE INFRASTRUCTUUR ...39

| | | |
|-------|--|----|
| 7 | Bovengrondse leidingen en hoogspanningslijnen..... | 40 |
| 7.1 | Bladafworp | 40 |
| 7.1.1 | Bladafworp op basis van grondoppervlak..... | 40 |
| 7.1.2 | Bladafworp op basis van verticaal oppervlak | 41 |
| 7.1.3 | Horizontaal of verticaal oppervlak?..... | 44 |
| 7.1.4 | Hoogspanningslijnen (langwerpige objecten)..... | 44 |
| 7.2 | Mastbreuk | 46 |
| 7.3 | Gondel en rotorafworp..... | 46 |
| 8 | Ondergrondse leidingen en kabels | 48 |
| 8.1 | Bladafworp | 48 |
| 8.1.1 | Raakfrequentie tracé | 48 |
| 8.1.2 | Kritische strook..... | 50 |
| 8.1.3 | Domino scenario's op ondergrondse elektriciteitskabels | 51 |
| 8.1.4 | Kritische afstand | 53 |
| 8.2 | Mastbreuk | 57 |
| 8.3 | Gondel en/of rotorafworp | 57 |
| 8.4 | Rekenvoorbeeld ondergrondse leiding | 59 |
| 8.4.1 | Turbineblad..... | 60 |
| 8.4.2 | Mastbreuk | 61 |
| 8.4.3 | Gondel en rotorafworp..... | 61 |

BIJLAGE C.1: BLADBREUK

1 INLEIDING

Het risico dat een afgebroken blad van een windturbine voor zijn omgeving vormt, is in het algemeen afhankelijk van:

- de kans dat een blad afbreekt en de omstandigheden waaronder dit gebeurt
- de baan die het afgebroken blad aflegt, de plek waar het afgebroken blad zal inslaan en de snelheid bij inslag
- de aanwezigheid van personen en of objecten op de plaats waar het afgebroken blad terechtkomt
- de gevolgen voor personen en of objecten als ze door een afgebroken blad worden getroffen.

In deze bijlage wordt nader ingegaan op een aantal modellen, waarmee de baan van een afgebroken blad kan worden beschreven en op welke wijze de trefkansen van personen en objecten kunnen worden berekend. De numerieke waarden voor de kans op bladbreuk worden hier niet beschouwd, maar in Bijlage A. wordt wel uiteengezet op welke wijze deze gegevens moeten worden gebruikt om de trefkans te berekenen. Ten aanzien van de gevolgen van bladbreuk wordt voor personen verondersteld dat treffen fataal is. De gevolgen voor objecten worden nader beschouwd in Bijlage D.

De gepresenteerde werpmodellen zijn op verschillende uitgangspunten gebaseerd. Voor de keuze voor een bepaald model is het dus van belang te weten, wat de invloed is van de gebruikte uitgangspunten op de berekende trefkansen. Om hierin inzicht te krijgen is een case studie uitgevoerd.

Werpmodellen

Onderstaand wordt een drietal modellen genoemd die gebruikt zijn voor het berekenen van de baan die een afgebroken blad zal afleggen.

1. Ballistisch model zonder luchtkrachten [1].

Dit is in wezen het klassieke kogelbaanmodel.

2. Ballistisch model met luchtweerstandskrachten [2,9].

Ook dit model is gebaseerd op het klassieke kogelbaanmodel. Echter naast de zwaartekracht worden ook de luchtweerstandskrachten in het vlak van de rotor (dit is het vlak waarin het afgebroken blad(deel) wegvliegt) en de luchtweerstandskrachten loodrecht op het vlak van de rotor in rekening gebracht. Ten gevolge van de luchtweerstand in het vlak van de rotor zal het afgebroken blad minder ver komen vergeleken met de kogelbaan. De luchtkrachten loodrecht op het vlak van de rotor zorgen ervoor dat het afgebroken blad met de wind mee wordt verplaatst.

3. Ballistisch model met luchtweerstandskrachten gecombineerd met zweefvlucht [4].

Bij dit model wordt de vlucht van het afgebroken blad(deel) in eerste instanda beschreven met bovenstaand ballistisch model met luchtweerstandskrachten, waarbij na verloop van tijd het blad in een stabiele zweefvlucht terechtkomt, waarbij de liftkrachten bepalend zijn en niet de luchtweerstandskrachten. In [4] is uiteengezet onder welke condities de overgang naar een zweefvlucht mogelijk is en het blijkt dat de kans hierop zeer klein is, vandaar dat dit model verder niet beschouwd zal worden.

Met deze modellen kan de plek waar het zwaartepunt van het blad terechtkomt worden berekend. Afhankelijk van het gebruikte model wordt deze plek mede bepaald door:

- windturbine specifieke parameters zoals hoogte van de rotoras en de bladeigenschappen (gewicht en aerodynamische profieleigenschappen), en
- de volgende grootheden die stochastisch van aard zijn:
 - windsnelheid (v_w)
 - windrichting (θ_w) en gierhoek (θ_y)
 - azimuthhoek waarbij het blad afbreekt (α)
 - toerental op moment dat blad afbreekt (Ω).

Combineren van de werpberekening met de kans van voorkomen van windsnelheid, windrichting, gierhoek en azimuthhoek ten tijde van breuk levert de kansverdelingsfunctie

$$f_{ZWPT}(x, y; \Omega) \cdot \Delta x \cdot \Delta y = P\{x < X_{ZWPT} < x + \Delta x, y < Y_{ZWPT} < y + \Delta y\} \quad (1.1)$$

De kansverdelingsfunctie f_{ZWPT} geeft de kans per m^2 dat het zwaartepunt van een blad(-deel) op een bepaalde positie (x, y) terechtkomt bij een bepaald toerental, Ω , gegeven bladbreuk.

Om de kans, $p_{ZWPT}(x, y)$, dat het zwaartepunt op positie (x, y) terechtkomt te berekenen moet ook de kans op bladbreuk worden verdisconteerd. Voor het specificeren van deze kansen moeten eerst de scenario's en de initiële gebeurtenissen worden bepaald die kunnen leiden tot bladbreuk. In par. 2.3 van onderhavige bijlage zijn deze scenario's uitgewerkt. In het algemeen kan worden gesteld dat de kans op bladbreuk kan worden gedefinieerd als een functie van het toerental in een bepaalde range,

$$p_b = f_b(\Omega), \quad \Omega_{\min} < \Omega < \Omega_{\max} \quad (1.2)$$

of voor een aantal discrete waarden van het toerental

$$p_{b,i} = p_b(\Omega_i), \quad i = 1, \dots, N_s \quad (1.3)$$

met N_s het aantal scenario's waarbij bladbreuk kan optreden. Ook is een combinatie van beide mogelijk, bijv. voor de toerentalen die optreden tijdens normaal bedrijf is de kans op bladbreuk gegeven als functie van het toerental, terwijl de kans op bladbreuk bij overtoeren wordt gegeven als discrete waarde.

Combineren van kansverdelingsfunctie en de kans op bladbreuk levert

$$p_{ZWPT}(x, y) = \int_{\Omega_{\min}}^{\Omega_{\max}} f_{ZWPT}(x, y; \Omega) \cdot f_b(\Omega) \cdot d\Omega + \sum_{i=1}^{N_s} f_{ZWPT}(x, y; \Omega_i) \cdot p_{b,i} \quad (1.4)$$

In hoofdstuk 2 van deze bijlage wordt nader ingegaan op de gebruikte werpmodellen en de daarbij behorende kansverdelingsfunctie, f_{ZWPT} , en de kans op inslag, p_{ZWPT} .

Trefkansen

Is de kans dat het zwaartepunt op een bepaalde plek terechtkomt, $p_{ZWPT}(x, y)$, bekend, dan kan worden overgegaan tot de berekening van het aanwezige risico dat een afgebroken blad van een windturbine voor zijn omgeving vormt. Het optredende risico voor een persoon of object is een combinatie van de kans dat de persoon of het object wordt getroffen en de gevolgen van deze treffer. In hoofdstuk 3 van deze bijlage is uiteengezet op welke wijze de trefkans kan worden berekend voor:

- personen
- wegen (verkeers-, spoor- en vaarwegen)
- passanten op deze wegen
- objecten over deze wegen (auto's, treinen en schepen)
- gebouwen en andere ruimtelijke objecten
- gebieden.

Case studie

In hoofdstuk 2 van deze bijlage zijn twee werpmodellen beschreven waarmee de kansverdelingsfunctie f_{ZWPT} , en de kans op inslag p_{ZWPT} kan worden berekend. In hoofdstuk 4 van deze bijlage zijn aan de hand van een rekenvoorbeeld de overeenkomsten en verschillen tussen deze modellen uitgewerkt.

2 WERPMODELLEN

In dit hoofdstuk worden de vergelijkingen behorende bij het ballistisch model *zonder* luchtkrachten en het ballistisch model *met* luchtweerstandskrachten uitgewerkt. Het ballistisch model zonder luchtkrachten is in wezen het klassieke kogelbaanmodel, waarbij de luchtkrachten op het blad worden verwaarloosd. Ook het ballistisch model met luchtweerstandskrachten is gebaseerd op het kogelbaanmodel, maar hierbij worden de luchtweerstandskrachten in rekening gebracht. Bij de luchtkrachten kan onderscheid worden gemaakt tussen liftkrachten, weerstandskrachten in het rotorvlak en weerstandskrachten loodrecht op het rotorvlak. Deze luchtkrachten ontstaan doordat een afgebroken blad een snelheid heeft ten opzichte van de lucht en zijn onder andere afhankelijk van de luchtdichtheid, de relatieve snelheid van het blad en de oriëntatie van het blad.

Liftkrachten

Ten gevolge van de aerodynamische lift ondervindt het blad een kracht loodrecht op zijn oppervlak. Direct na breuk zal het blad in het vlak van de rotor wegvliegen, waarbij het zal roteren om zijn zwaartepunt. Tijdens dit tuimelen, kan de gemiddelde waarde van de lift worden verwaarloosd [8].

Liftkrachten zijn wel van belang als het blad gaat zweven. Echter, bij de huidige kunststof bladen ligt het zwaartepunt op ca. 1/3 van de bladlengte, waardoor het onwaarschijnlijk is dat een blad vanuit tuimelen overgaat in zweven, omdat dit een instabiele toestand is [4].

Bij beide modellen wordt dus verondersteld dat door de ligging van het zwaartepunt het blad tot inslag zal blijven tuimelen en dat de liftkrachten kunnen worden verwaarloosd.

Weerstandskrachten in rotorvlak

De luchtweerstandskrachten in het rotorvlak hebben tot gevolg dat de werpafstand volgens de kogelbaanberekeningen wordt beperkt. Verwaarlozing van deze weerstandskracht levert dus een conservatieve werpafstand op bij het kogelbaanmodel. De weerstandskracht is evenredig met het kwadraat van de relatieve snelheid van het blad ten opzichte van de lucht, zodat bij een overtoerensituatie de invloed van de luchtweerstand erg groot kan worden.

Weerstandskrachten loodrecht op rotorvlak

De luchtweerstandskracht loodrecht op het rotorvlak zal er voor zorgen dat het blad naar achteren wordt verplaatst. Dit aspect is alleen van belang als de invloed van de windrichting en windsnelheid in beschouwing wordt genomen, zoals bij het ballistisch model met luchtweerstandskrachten. Bij het kogelbaanmodel wordt dus impliciet aangenomen dat de invloed van de windrichting is te verwaarlozen. In hoofdstuk 4 van deze bijlage is aangetoond dat deze aanname gerechtvaardigd is voor locaties waar de windrichtingverdeling vergelijkbaar is met die van Nederland. Voor locaties waar een bepaalde windrichting dominant is, zoals bij passaatwinden, is het wel van belang de windroos in de berekening mee te nemen.

2.1 Ballistisch model zonder luchtkrachten

2.1.1 Bewegingsvergelijking

Dit model is in principe het klassieke kogelbaanmodel, waarbij de luchtkrachten op het blad worden verwaarloosd. De relevante parameters voor dit ballistisch model zijn:

H : hoogte rotoras [m]

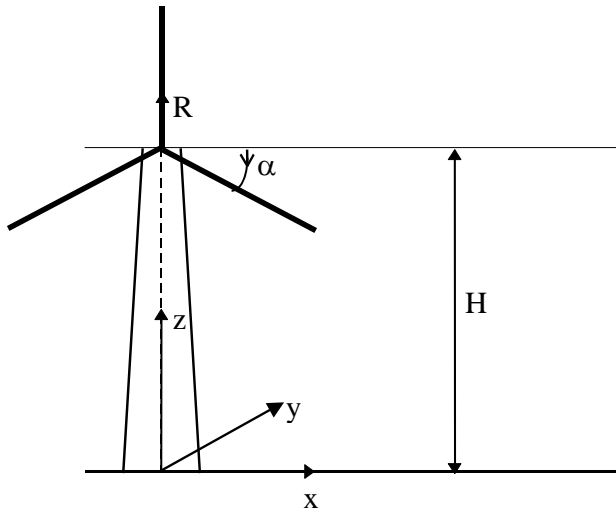
Ω : toerental van de rotor [rad/s]

R_z : afstand tot het rotor centrum van het zwaartepunt van wegvliegende deel [m]

α : azimuthoek [rad]

g : valversnelling ($= 9,81 \text{ m/s}^2$).

Het gehanteerde assenstelsel en de draairichting wordt aangegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Overzicht parameters in ballistisch model

De bewegingsvergelijking voor het zwaartepunt is nu

$$\ddot{x}(t) = 0, \quad \ddot{y}(t) = 0, \quad \ddot{z}(t) = -g \quad (2.1.1)$$

Met de beginvoorwaarden

$$\begin{aligned} x(0) &= R_z \cos \alpha, & y(0) &= 0, & z(0) &= H - R_z \sin \alpha, \\ \dot{x}(0) &= -\Omega R_z \sin \alpha, & \dot{y}(0) &= 0, & \dot{z}(0) &= -\Omega R_z \cos \alpha, \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

is de positie van een wegvliegende deel op tijdstip t is gegeven door:

$$\begin{aligned} x(t) &= R_z \cos \alpha - \Omega R_z t \sin \alpha \\ y(t) &= 0 \\ z(t) &= H - R_z \sin \alpha - \Omega R_z t \cos \alpha - \frac{gt^2}{2} \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

Het tijdstip waarop het zwaartepunt de grond raakt volgt uit $z(t_i) = 0$ en wordt gegeven door

$$t_i = -\frac{\Omega R_z \cos \alpha}{g} + \sqrt{\frac{2}{g} \left(H - R_z \sin \alpha + \frac{\Omega^2 R_z^2 \cos^2 \alpha}{2g} \right)} \quad (2.1.4)$$

Substitutie van (2.1.4) in (2.1.3) geeft voor een bepaald toerental de afgelegde afstand, r , als functie van de azimuthhoek ten tijde van bladbreuk, ofwel

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = x = h(\alpha; \Omega) \quad (2.1.5)$$

2.1.2 Verdelingsfuncties

De kansverdelingsfunctie f_{ZWP} geeft de kans per m^2 dat het zwaartepunt op een bepaalde plek terecht komt gegeven bladbreuk. Bij het onderhavige model worden de luchtkrachten niet meegenomen, zodat alleen het toerental en de azimuthhoek als stochastische grootheden overblijven. Tevens geldt dat f_{ZWP} alleen afhankelijk is van de afstand tot de windturbine. De kans dat het zwaartepunt van het blad in een cirkelschijf met breedte dr op een afstand r van de turbine terecht komt, is gegeven door

$$\begin{aligned} f_R(r; \Omega) dr &= P\{r < R < r + dr\} \\ &= P\{h^{-1}(r; \Omega) < \alpha < h^{-1}(r + dr; \Omega)\} \\ &= F_A(h^{-1}(r + dr; \Omega)) - F_A(h^{-1}(r; \Omega)) \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

waarbij F_A de cumulatieve verdelingsfunctie is van de azimuthhoek waarbij bladbreuk optreedt. Met de aanname dat de azimuthhoek waarbij het blad afbreekt uniform is verdeeld, ofwel

$$f_A(r) = \frac{d}{d\alpha} F_A(\alpha) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \alpha < 2\pi \quad (2.1.7)$$

geldt nu

$$f_R(r; \Omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dr} h^{-1}(r; \Omega) \quad (2.1.8)$$

Opm : Om de gevolgde aanpak te demonstreren is bij bovenstaande afleiding verondersteld dat de functie $h(\alpha; \Omega)$ inverteerbaar is. In het geval van bladbreuk zal dit niet zo zijn, want in het algemeen zal het zwaartepunt vanuit twee verschillende azimuthhoeken op een bepaalde plek terecht kunnen komen, via de hoge baan of via de lage baan. Bij de numerieke uitwerking zal hiermee rekening moeten worden gehouden.

De kansverdelingsfunctie van de positie waar het zwaartepunt van het blad zal inslaan is nu

$$f_{ZWP}(x, y; \Omega) = f_{ZWP}(r; \Omega) = \frac{1}{2\pi r} f_R(r; \Omega) \quad (2.1.9)$$

2.2 Ballistisch model met luchtkrachten

2.2.1 Uitgangspunten

Het werpmodel gaat ervan uit dat op het weggegoorpen blad twee krachten werken:

- zwaartekracht
- luchtweerstandskrachten.

Alle overige krachten als lift-, Coriolis- en centrifugaalkracht worden verwaarloosd.

Zwaartekracht

De zwaartekracht wordt onafhankelijk van de hoogte verondersteld.

Windsnelheid en windrichting

Voor de bepaling van de relatieve snelheid van het afgeworpen blad ten opzichte van de lucht is de windsnelheid en windrichting van belang. Slechts bij windsnelheid 0 is de snelheid van het blad ten opzichte van de lucht gelijk aan de snelheid van het blad ten opzichte van de grond.

De windsnelheid wordt onafhankelijk van de hoogte verondersteld, met andere woorden de windsnelheid is constant tijdens de gehele vlucht van het blad(-deel).

Luchtweerstand (Drag)

Een weggegoorpen object (bijv. een blad van een windturbine) dat aangestroomd wordt door de lucht onder een bepaalde aanstroomhoek ("angle of attack") ondervindt een kracht tegengesteld gericht aan de bewegingsrichting van het object ten opzichte van de lucht.

De grootte van de luchtweerstand is afhankelijk van de aanstroomhoek, de oriëntatie van het blad in de ruimte in relatie tot de baan en de relatieve snelheid van het blad ten opzichte van de lucht.

De luchtweerstand ("drag", D) neemt kwadratisch toe met de relatieve luchtsnelheid:

$$D = \frac{1}{2} \rho v_z^2 A C_D \quad (2.2.1)$$

Waarin:

ρ = luchtdichtheid kg/m^3

v_z = snelheid zwaartepunt van blad t.o.v. de lucht

A = oppervlakte van blad in richting van stroming

C_D = luchtweerstand- of dragcoëfficiënt.

De invloed van aanstroomhoek en oriëntatie wordt verdisconteerd in een zogenaamde C_D -waarde. Deze factor geeft aan dat van twee objecten met dezelfde v_z^2 , ρ en A het object met de beste "stroomlijn" de minste luchtweerstand ondervindt.

Ten gevolge van het “tuimelen” varieert de C_D -waarde van een blad tijdens de vlucht als gevolg van de wisselende oriëntatie en aanstroomhoek van het blad in de lucht, zodat de C_D -waarde tussen een minimum en een maximum varieert. [8]. De gemiddelde C_D -waarde over de vlucht is de waarde die in dit rapport gehanteerd wordt. Deze gemiddelde waarde blijkt voor een grote klasse van bladen weinig te variëren [8]. Goed bedacht moet worden dat deze “drag” op het afgebroken blad niets te maken heeft met de “drag” die een rotor tijdens normale vermogenslevering ondervindt.

Tijdens een worp moet met twee verschillende C_D waarden worden gerekend. De C_D in de richting van de worp verschilt duidelijk van de C_D in de richting daar loodrecht op.

2.2.2 Bewegingsvergelijking

Het algemene beeld van een worp is dat een blad wegvliegt in het vlak van de rotor, maar dat het blad in de richting van het rotorvlak door de kwadratisch toenemende luchtweerstand minder ver komt 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 werp richting.

Introductie van de luchtkrachten in het ballistische model leidt er toe dat de enkelvoudige baanvergelijking (2.1.1 – 2.1.2) van het ballistische model overgaat in een stelsel niet-lineaire differentiaalvergelijkingen U'_{xyz} , dat numeriek opgelost kan worden. Hieronder is het stelsel inclusief randvoorwaarden gegeven

$$\begin{aligned}
 |u(t)| &= \sqrt{u_x^2(t) + u_y^2(t) + u_z^2(t)} \\
 \frac{du_x}{dt} &= -\mu_x u_x |u(t)| \\
 \frac{du_y}{dt} &= -\mu_{yz} u_y |u(t)| \\
 \frac{du_z}{dt} &= -g - \mu_{yz} u_z |u(t)| \\
 \frac{dx}{dt} &= u_x + w_x \\
 \frac{dy}{dt} &= u_y + w_y \\
 \frac{dz}{dt} &= u_z
 \end{aligned} \tag{2.2.2}$$

De volgende randvoorwaarden gelden:

$$u_x(0) = -w_x$$

$$u_y(0) = -rot u_0 \sin \varphi$$

$$u_z(0) = -rot u_0 \cos \varphi$$

$$x(0) = 0$$

$$y(0) = -cg \cos \varphi$$

$$z(0) = h + cg \sin \varphi$$

De definities van de verschillende parameters zijn als volgt:

$|u(t)|$ modulus van de snelheid van het bladdeel t.o.v. de lucht

$u_{x,y,z}$ snelheidscomponent in de x , y of z richting

$$\mu_x = \frac{\rho C_{D,x} A}{2m}$$

$$\mu_{yz} = \frac{\rho C_{D,yz} A}{2m}$$

waarin:

$C_{D,i}$ luchtweerstand- of dragcoëfficiënt in richting x of y

A oppervlakte van weggegoorpen blad(deel)

m massa van weggegoorpen (blad)deel

ρ dichtheid lucht (1 atm, 20 °C)

w_x $w_{10} \cos \gamma$, x -component van de windsnelheid

w_y $-w_{10} \sin \gamma$, y -component van de windsnelheid

w_{10} windsnelheid op standaardhoogte van 10m en bij standaard ruwheid (0,03)

γ kruihoek

rot draairichting rotor; -1 tegen de klok in, 1 met de klok mee

u_0 lanceersnelheid van het zwaartepunt afgeworpen bladdeel

azimuthhoek

cg zwaartepunt afgeworpen wiekdeel

h hoogte van de as boven het maaiveld.

Het trefpunt in het xy -vlak kan worden berekend door $z(t) = 0$ op te lossen voor t . Stel voor $t = t_m$ geldt $z(t_m) = 0$, dan wordt het trefpunt in het xy -vlak gevonden uit $x(t_m)$ en $y(t_m)$. Evenzo kunnen de snelheden in x , y en z -richting vlak voor de inslag in het xy -vlak berekend worden. Deze laatste waarden kunnen gebruikt worden om bijvoorbeeld de maximaal voor vervorming van een object beschikbare energie te berekenen.

2.2.3 Verdelingsfuncties

De kansverdelingsfunctie f_{ZWPT} geeft opnieuw de kans dat het zwaartepunt van het blad op een bepaalde plek terechtkomt gegeven bladbreuk. Worden de additionele parameters die de luchtkrachten op het blad bepalen constant genomen dan geldt de afleiding die in par. 0 is gemaakt nog steeds, zij het dat de afstand r niet gegeven wordt door de daar gedefinieerde $h(\alpha, \Omega)$, maar volgt uit de oplossing van het stelsel $U'_{xyz}(\alpha, \Omega, \theta_w, v_w, C_D)$. Hierin zijn:

C_D de luchtweerstand- of dragcoëfficiënt

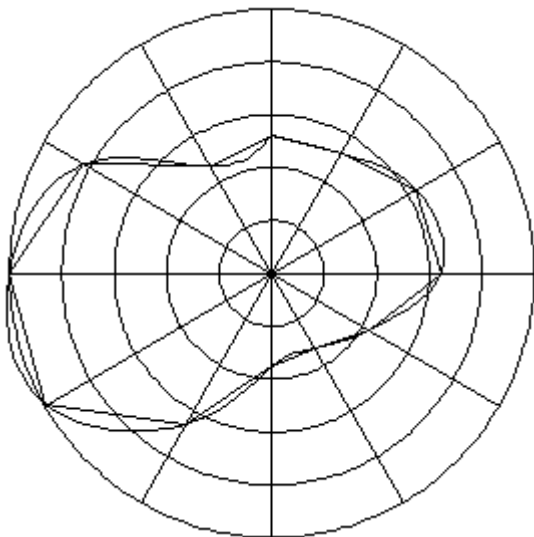
θ_w de windrichting

v_w de windsnelheid.

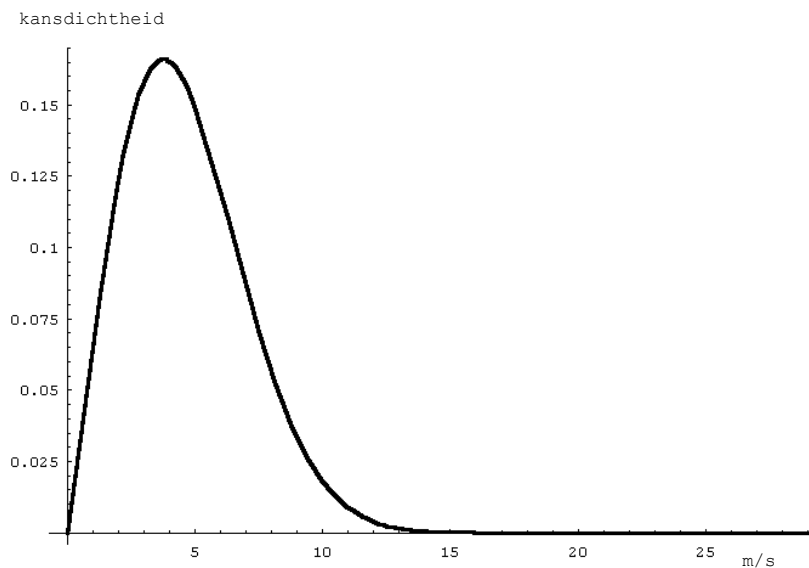
De kansverdelingsfunctie wordt gecompliceerder als ook de additionele parameters als stochasten worden behandeld. In de praktijk zal dit betekenen dat op simulatie moet worden overgegaan.

De luchtweerstandcoëfficiënt wordt in het algemeen constant verondersteld. De windrichtingverdeling en windsnelheidsverdeling zijn voor een groot aantal plaatsen in Nederland bekend [5] of te berekenen [6].

In onderstaande figuren is een voorbeeld van beide verdelingen gegeven voor de locatie Vlissingen.



Figuur 2: Relatieve windrichtingverdeling Vlissingen [5]



Figuur 3: Windsnelheidsverdeling (noord), Vliissingen [5]

2.3 Ongevallenscenario's

In voorgaande paragrafen is uiteengezet hoe de kansverdelingsfunctie, f_{ZWPT} , bepaald moet worden. Deze kansverdelingsfunctie geeft de kans per m^2 dat het zwaartepunt op een bepaalde plek terechtkomt gegeven bladbreuk. Voor de berekening van de kans op inslag moet deze kansverdelingsfunctie nog worden gecombineerd met de kans dat een blad afbreekt (zie verg. 1.4).

Om de kans op bladbreuk te kunnen specificeren moeten eerst alle scenario's en initiërende gebeurtenissen worden bepaald die kunnen leiden tot ongewenste situaties. Voor een specifieke turbine kan dit worden gedaan door een systeemanalyse. Hiermee wordt geanalyseerd wat de kans is dat een remsysteem faalt, dat een bladverstelsysteem faalt, dat een blad breekt onder bepaalde condities, etc. uitgaande van de faalfrequenties van de afzonderlijke componenten. In het algemeen is dit een arbeidsintensief proces en het is niet gebruikelijk dit speciaal t.b.v. een risicoanalyse voor bladbreuk te doen.

Op basis van gepubliceerde gegevens (zoals de Windkraft journals en gegevens van fabrikanten) en eerder uitgevoerde studies (Bijlage A) kunnen de risicoanalyses worden gebaseerd op bladbreuk bij normaal bedrijf, bladbreuk bij mechanisch remmen en bladbreuk bij overtoeren. Mechanisch remmen komt bij moderne windturbines niet meer voor. Er is hierdoor geen onderscheid meer te maken voor bladbreuk bij normaal bedrijf of tijdens mechanisch remmen. DNV KEMA onderscheidt daarom slechts twee categorieën: bladbreuk bij normaal bedrijf en bladbreuk tijdens overtoeren. De faalfrequentie van bladbreuk door overtoeren is volgens het Handboek zeer klein.

1. Bladbreek tijdens normaal bedrijf.

Hierbij wordt aangenomen dat tijdens normaal bedrijf (nominaal toerental) een blad afbreekt. Als mogelijke oorzaken kunnen worden genoemd onder andere storm (overschrijden van de maximale belasting), vermoeiing en fabricagefouten.

2. Bladbreek tijdens overtoeren.

Beschouwd wordt de situatie waarbij een turbine in overtoeren raakt door het falen van het eerste en het tweede beveiligingssysteem, waardoor de turbine zal optoeren. Het is moeilijk vast te stellen hoe groot het toerental zal worden bij overtoeren, aangezien dit afhankelijk is van de op dat moment heersende windsnelheid, de pitch-hoek van de bladen en het aerodynamisch gedrag van de te beschouwen windturbine. Bij een bepaalde windsnelheid kan op basis van de C_p - λ kromme het maximaal mogelijke toerental worden bepaald (C_p is de rotor vermogenscoëfficiënt en λ geeft de verhouding van tip snelheid en de windsnelheid). Daarnaast is afhankelijk van het aerodynamisch bladprofiel de tipsnelheid gelimiteerd tot een kritieke Mach-waarde die kleiner is dan 1 [3].

In de berekeningen met het ballistisch model zonder luchtkrachten wordt de kans op bladbreek gedefinieerd voor twee situaties; normaal bedrijf en overtoeren, zodat de kans op inslag voor dit model geschreven kan worden als

$$p_{ZWPT}(x, y) = \sum_{i=1}^3 f_{ZWPT}(x, y; \Omega_i) \cdot p_{b,i} \quad (2.3.1)$$

Aangenomen wordt dat het toerental bij overtoeren gelijk ligt aan twee keer het nominale toerental. Impliciet is hiermee verondersteld dat de werpafstand bij hogere toerentalen met weerstandkrachten, ongeveer gelijk zal zijn aan de berekening volgens het ballistisch model zonder weerstandskracht. Voor verdere onderbouwing van deze aanname wordt verwezen naar de case studie in hoofdstuk 4 van deze bijlage.

Voor het model met luchtkrachten vormen bovenstaande twee gebeurtenissen ook het uitgangspunt. Voor de overtoerensituatie ($\Omega > 1,2$ nominaal) is er voor gekozen om het toerental te bepalen op basis van de gekozen windsnelheid. Verondersteld wordt dat de rotor versnelt tot het vrijloop toerental bij die windsnelheid. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een voor een groot scala van bladen geldende relatie tussen windsnelheid en vrijlooptoerental. [3].

3 TREFKANSBEREKENINGEN

3.1 Personen (Plaatsgebonden Risico)

Voor de berekening van het plaatsgebonden risico (PR) moet een persoon worden beschouwd die permanent aanwezig is. Aangenomen wordt dat deze persoon dodelijk wordt getroffen als het zwaartepunt van het blad precies op hem terechtkomt. Komt het zwaartepunt van het blad in de buurt van de persoon terecht dan is er een kans dat deze persoon wordt getroffen. Eén en ander afhankelijk van de oriëntatie van het blad bij inslag. Deze trefkans neemt af naarmate het blad verder van de persoon terechtkomt. Bij de huidige kunststofbladen ligt het zwaartepunt op ca. 1/3 van de bladlengte, gemeten vanaf de bladwortel, zodat de kans nul wordt als het zwaartepunt verder dan 2/3 keer de bladlengte van de persoon terechtkomt.

Met de veronderstelling dat p_{ZWP} constant is in het gebied rondom de persoon, is de trefkans van een persoon die permanent aanwezig is op positie (x^*, y^*) , gegeven door

$$p_p(x^*, y^*) = 1,5 \cdot A_c \cdot p_{ZWP}(x^*, y^*) \quad (3.1.1)$$

waarbij A_c het kritiek oppervlak van het blad is en de factor 1,5 bekend staat als de schaduwfactor. Deze schaduwfactor brengt in rekening dat een persoon een zekere hoogte heeft en het rotorblad schuin naar beneden komt. Het kritiek oppervlak kan als volgt worden berekend. Een persoon zal met zekerheid worden getroffen indien het zwaartepunt binnen een afstand R terechtkomt, met

$$R \leq \frac{d}{2} + \frac{c}{2} \quad (3.1.2)$$

waarbij het oppervlak van een persoon gelijk is genomen aan een cirkel met diameter d ($d = 0,3$ m) en c de gemiddelde koorde van het blad is. Komt het zwaartepunt van het blad op een afstand groter dan deze waarde, dan zal de persoon nog worden getroffen indien

$$-\arcsin\left(\frac{c+d}{2R}\right) \leq \varphi \leq \arcsin\left(\frac{c+d}{2R}\right) \quad (3.1.3)$$

waarbij

$$\frac{d}{2} + \frac{c}{2} < R \leq L_1 \quad (3.1.4)$$

voor het tipsegment en

$$\frac{d}{2} + \frac{c}{2} < R \leq L_2 \quad (3.1.5)$$

voor het wortelsegment.

De kans dat de persoon wordt getroffen door het tipsegment of het wortelsegment is dus

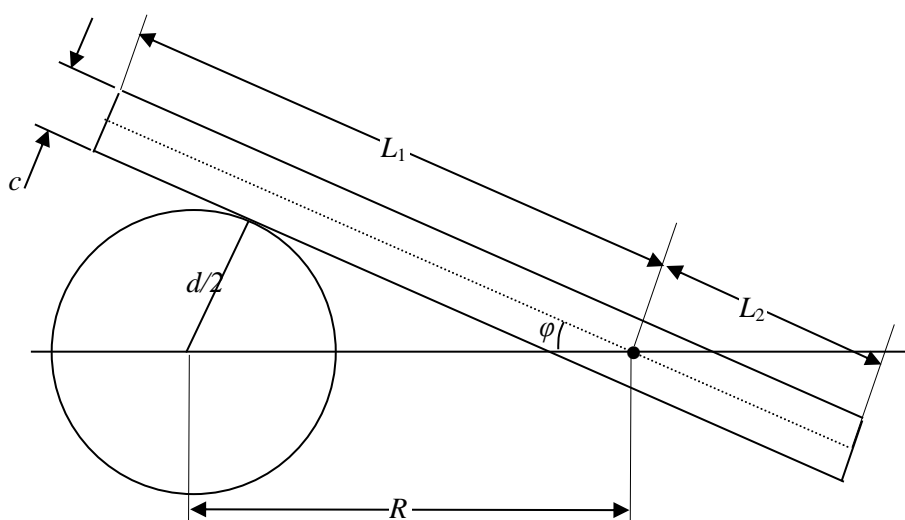
$$p = \frac{2\varphi}{2\pi} \quad (3.1.6)$$

waarbij is aangenomen dat de hoek φ waarmee een blad op de grond terechtkomt willekeurig is. Voor een ringvormig oppervlak met straal R en breedte dR rond de persoon geldt

$$p(R) = \frac{2\varphi(R)}{2\pi} \cdot 2\pi \cdot dR \quad (3.1.7)$$

zodat het kritiek oppervlak gelijk is aan

$$A_c = \pi \left(\frac{d}{2} + \frac{c}{2} \right)^2 + \int_{\frac{d+c}{2}}^{\frac{d}{2}+L_1} 2\varphi(r) r dr + \int_{\frac{d+c}{2}}^{\frac{d}{2}+L_2} 2\varphi(r) r dr \quad (3.1.8)$$



Figuur 4: Berekening kritiek oppervlak

3.2 Wegen

3.2.1 Infrastructuur

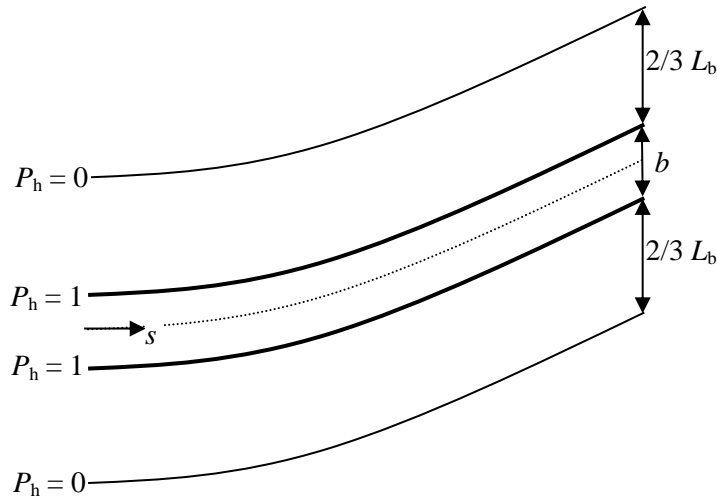
De kans dat een weg met breedte b wordt getroffen door een afgebroken blad is (zie Figuur 5)

$$P_w = F_a \int_s P_{ZWPT}(s) ds \quad (3.2.1)$$

waarbij s de contour langs de weg weergeeft en

$$F_a = \left(b + \frac{2}{3} L_b \right) \quad (3.2.2)$$

een factor is die de effectieve breedte van de weg verdisconteert.



Figuur 5: Overzicht parameters infrastructuur

3.2.2 Passanten

De kans dat een passerende auto, trein of schip wordt geraakt kan uit (3.3.1) worden afgeleid door de factor F_a te baseren op de breedte van het passerende object en tevens de verblijfstijd van het passerende object in rekening te brengen

$$F_a = \frac{L_o}{v_o} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \left(1,5 \cdot b_o + \frac{2}{3} L_b \right) \quad (3.2.3)$$

met

- L_o : lengte van het passerende object [m]
- v_o : snelheid van het passerende object [m/s]
- b_o : breedte van het passerende object [m].

De factor 1,5 in bovenstaande vergelijking is weer de shadowfactor, waarmee in rekening wordt gebracht dat de passerende objecten een bepaalde hoogte hebben.

De lengte van het passerende object (trein, auto of schip) is de som van de echte lengte van het object vermeerderd met de remweg.

Bij berekening van het individueel passantenrisico en het maatschappelijk risico volgens de richtlijnen van ProRail en RWS [7] dient een persoon te worden beschouwd die onbeschermd voorbij komt. Op basis van verg (3.3.1) en verg. (3.1.1) kan dus worden afgeleid dat de kans dat een passerend individu wordt geraakt, kan worden berekend met

$$F_a = \frac{1}{v_o} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} 1,5 \cdot A_c \quad (3.2.4)$$

met

v_o : snelheid van de passant [m/s]

A_c : kritiek oppervlak van het afgebroken blad [m^2].

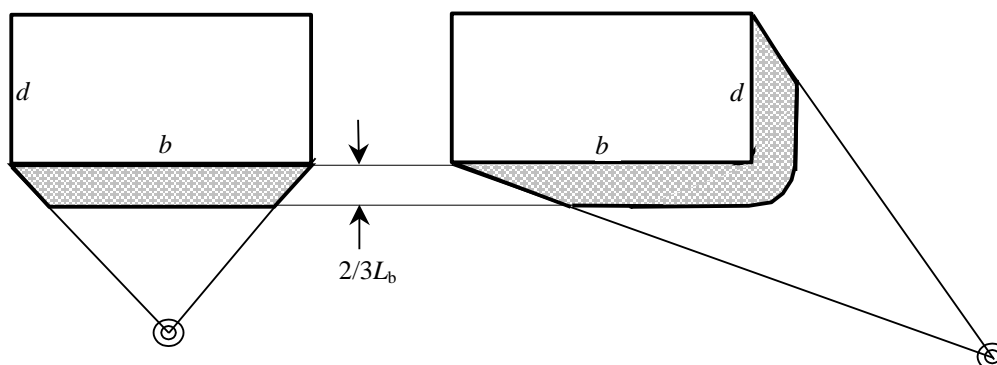
3.3 Ruimtelijke objecten

In het vervolg zullen ruimtelijke objecten worden aangegeven als “gebouwen”, maar hiermee worden ook andere objecten bedoeld, bijv. opslagtanks. Karakteristiek voor een gebouw is dat het een zekere niet te verwaarlozen hoogte heeft. Er moet rekening worden gehouden met het feit dat een blad de gevel of het dak kan raken. Deze algemene aanpak is uitgewerkt in par. 3.3.1. Indien de bte van de gebouwen zich beperkt tot enkele meters dan kan de vereenvoudigde aanpak zoals beschreven in par. 3.3.2 worden toegepast.

3.3.1 Raakfrequentie: algemene aanpak

Trefkans gevel

Een gevel kan direct door het zwaartepunt worden getroffen, maar het is ook mogelijk dat het zwaartepunt van het blad binnen een afstand van $2/3L_b$ van de gevel inslaat. In dit laatste geval kan de gevel nog door het blad worden geraakt (want algemeen kan worden gesteld dat het zwaartepunt op $1/3$ van de bladlengte ligt). De situatie dat een blad voor de gevel op de grond terechtkomt, is geschetst in Figuur 6. Afhankelijk van de positie van de windturbine ten opzichte van het gebouw kan er dus zowel één gevel als twee gevels worden getroffen. Komt het zwaartepunt op de binnenrand van het gearceerde gebied, AR, terecht dan is de kans dat de gevel wordt geraakt $ph = 1,0$. Deze kans zal verlopen naar $ph = 0,0$ op de buitenrand, die op $2/3L_b$ van de gevel ligt. Het verloop van de kans ph is ingewikkeld, maar wordt hier benaderd door een lineair verband.



Figuur 6: Effectief oppervlak voor trefkans gevel

De kans dat een gevel wordt getroffen door een blad waarvan het zwaartepunt binnen een afstand van $2/3L_b$ van de gevel inslaat is

$$p_{g_i} = \int_{A_R} p_h(x, y) \cdot p_{ZWPT}(x, y) dA \quad (3.3.1)$$

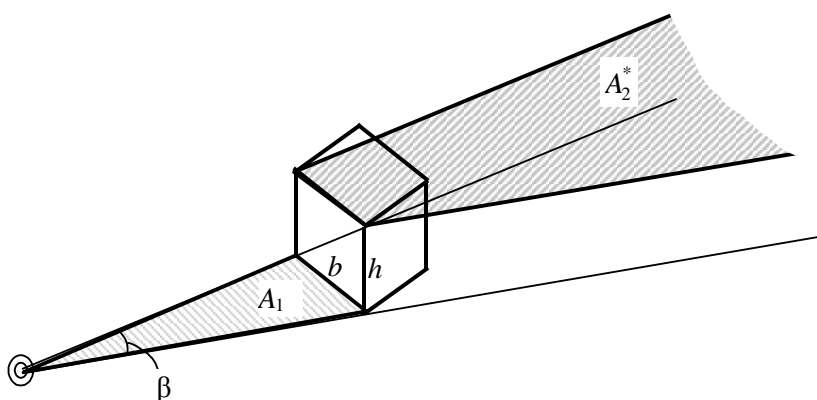
Met de veronderstelling, dat p_{ZWPT} constant is in het gebied A_R voor de gevel, gaat (3.3.1) over in

$$p_{g_i} = b \cdot \frac{L_b}{3} \cdot p_{ZWPT}(x^*, y^*)$$

of

$$p_{g_i} = (b + d) \cdot \frac{L_b}{3} \cdot p_{ZWPT}(x^*, y^*) \quad (3.3.2)$$

waarbij het gebied A_R is benaderd door een rechthoekig gebied met lengte b of $(b+d)$ en breedte $2/3L_b$. De kans dat het zwaartepunt van een blad de gevel rechtstreeks raakt is uitgewerkt aan de hand.



Figuur 7: Overzicht parameters voor berekening trefkans gevel

De kans dat het zwaartepunt een gevel met breedte b en hoogte h rechtstreeks raakt is gelijk aan de kans dat het zwaartepunt in het cirkelsegment met hoek β terechtkomt min de kans dat het zwaartepunt voor de gevel terechtkomt, ofwel in gebied A_1 inslaat, min de kans dat het zwaartepunt over de gevel heen gaat, ofwel in gebied A_2^* inslaat, waarbij A_2^* op een hoogte h ligt ten opzichte van A_1 .

In formule

$$p_{g_d} = p_\beta - \int_{A_1} p_{ZWPT}(x, y) dA - \int_{A_2^*} p_{ZWPT}(x, y) dA \quad (3.3.3)$$

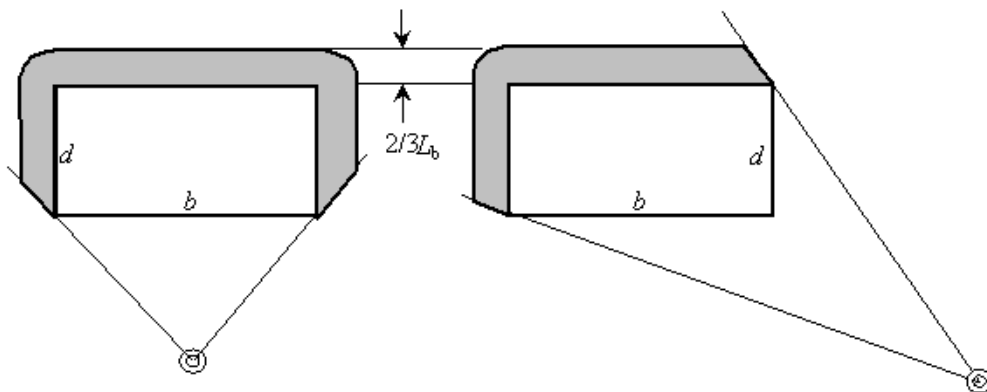
waarbij p_β de kans geeft dat het zwaartepunt in het cirkelsegment met hoek β terechtkomt.

De kans dat het zwaartepunt in gebied A_2^* terecht komt, kan worden berekend door een windturbine te beschouwen waarbij de mast met h is verkleind, ofwel de as-hoogte is gelijk aan $H-h$. Het gebied A_2 ligt op hetzelfde niveau als A_1 .

Verg. (3.3.3) kan nu worden herschreven als

$$\begin{aligned}
 p_{gd} &= p_\beta - \int_{A_1} p_{ZWPT}(x, y) dA - \int_{A_2} p_{ZWPT}^h(x, y) dA \\
 &= p_\beta - \int_{A_1} p_{ZWPT}(x, y) dA - \left(p_\beta - \int_{A_1} p_{ZWPT}^h(x, y) dA \right) \\
 &= \int_{A_1} p_{ZWPT}^h(x, y) dA - \int_{A_1} p_{ZWPT}(x, y) dA
 \end{aligned} \tag{3.3.4}$$

waarbij p_{ZWPT}^h de kans van inslag geeft voor een windturbine waarvan de totale hoogte met h is verlaagd.



Figuur 8: Effectief oppervlak voor trefkans dak

Trefkans dak

De kans dat het zwaartepunt van het blad op het dak terecht komt is

$$p_{dd} = \int_{A_d} p_{ZWPT}^h(x, y) dA \tag{3.3.5}$$

waarbij A_d het dakoppervlak weergeeft.

Met de veronderstelling, dat p_{ZWPT} constant is in het gebied A_d gaat (3.3.5) over in

$$p_{dd} = p_{zwpt}^h(x^*, y^*) \cdot A_d \tag{3.3.6}$$

Naast het feit dat het zwaartepunt op het dak terecht komt, kan het ook voorkomen dat het dak wordt getroffen als het zwaartepunt in strook met breedte $2/3L_b$ achter het dak terecht komt, zie Figuur 8. De kans dat het dak wordt geraakt door het blad is dan

$$p_{d_i} = \int_{A_R} p_{zwpt}^h(x, y) dA \quad (3.3.7)$$

waarbij A_R een gebied is vergelijkbaar met A_R in Figuur 6, maar dan aan de achterzijde van het gebouw. Hier is het dus mogelijk dat er twee of drie stroken, zowel langs achtergevel als 1 of 2 zijgevels, moeten worden beschouwd.

Met de veronderstelling, dat p_{zwpt} constant is in het gebied voor de gevel gaat (3.3.7) over in

$$p_{d_i} = (b + 2d) \cdot \frac{L_b}{3} \cdot p_{zwpt}^h(x^*, y^*)$$

of

$$p_{d_i} = (b + d) \cdot \frac{L_b}{3} \cdot p_{zwpt}^h(x^*, y^*) \quad (3.3.8)$$

waarbij het gebied A_R is benaderd door een rechthoekig gebied met lengte b en breedte $2/3L_b$.

De kans dat het gebouw (ruimtelijk object) wordt geraakt is nu

$$p_o = p_{o_d} + p_{o_i}$$

met

$$p_{o_d} = p_{g_d} + p_{d_d}$$

$$p_{o_i} = p_{g_i} + p_{d_i} \quad (3.3.9)$$

waarbij rekening dient te worden gehouden met het feit dat afhankelijk van de positie van de windturbine ten opzichte van het gebouw soms één soms twee gevels beschouwd moeten worden.

3.3.2 Raakfrequentie: Vereenvoudigde aanpak

In paragraaf 3.3.1 is uiteengezet op welke wijze de kans moet worden berekend dat een gebouw wordt getroffen door afgebroken blad. Om deze methode toe te passen moet zowel de kans worden berekend dat het zwaartepunt van het blad op het grondoppervlak als op het dak van het gebouw terechtkomt. Dit model is met name ontwikkeld voor hoge gebouwen. Om te komen tot een niet te complex rekenmodel voor gebouwen met een beperkte hoogte is onderstaand een eenvoudiger model uitgewerkt, waarbij alleen de kans dat het zwaartepunt van het blad op het grondoppervlak terechtkomt nodig is.

De keuze wanneer met het verticale of horizontale vlak dient te worden gerekend hangt af van de verhouding tussen lengte l en de hoogte h van het object en tevens de afstand r tussen object en windturbine in relatie tot de maximale werpafstand R . Als vuistregel kan de volgende vergelijking worden:

$$h > 10 * l * \frac{r^2}{R^2}$$

Wanneer het linker lid (de hoogte) veel groter is dan het rechter lid, kan beter met het verticale vlak (hoekfracties) gerekend worden. Wanneer de hoogte beduidend kleiner is, is de berekening op basis van het grondoppervlak beter geschikt. Wanneer beide kanten van de vergelijking ongeveer even groot zijn, wordt aangeraden om beide methoden toe te passen en de meest conservatieve uitkomst in de risicoberekening te gebruiken. Voor een kubus betekent dit dat het omslagpunt in de berekening op ongeveer op 1/3 van de maximale werpafstand bevindt: dichterbij kan beter met het verticale vlak worden gerekend, verder af is de berekening met betrekking tot het grondoppervlak meer representatief.

Om de trefkans van een object met hoogte, h , breedte, b , en diepte, d , te berekenen wordt uitgegaan van een geprojecteerd grondoppervlak (zie Figuur 9)

$$A_{pr} = (b + h) \cdot (d + h) \quad (3.3.10)$$

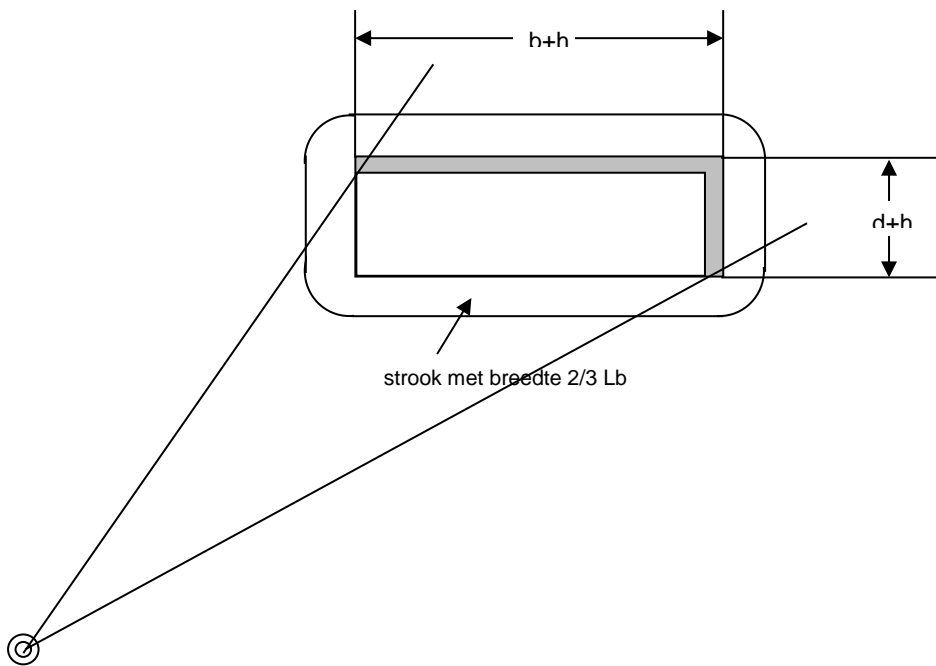
waarmee de hoogte van het object wordt verdisconteerd.

Analoog aan verg. (3.3.5) is de kans dat het zwaartepunt van het blad op het geprojecteerde oppervlak terecht komt

$$p_{o_d} = \int_{A_{pr}} p_{ZWPT}(x, y) dA \quad (3.3.11)$$

Met de veronderstelling, dat p_{ZWPT} constant is in het gebied A_{pr} gaat (3.3.11) over in

$$p_{o_d} = p_{zwpt}(x^*, y^*) \cdot A_{pr} \quad (3.3.12)$$



Figuur 9: Geprojecteerd oppervlak

Het gebouw kan direct door het zwaartepunt worden getroffen, maar het is ook mogelijk dat het zwaartepunt van het blad binnen een afstand van $2/3 L_b$ (L_b is lengte van het afgebroken blad) van het gebouw inslaat. In dit geval kan het gebouw nog door het blad worden geraakt, want algemeen kan worden gesteld dat het zwaartepunt van het blad op $1/3$ van de bladlengte ligt.

Komt het zwaartepunt op de rand van dit gebied terecht en wel aan de zijde van gevel dan is de kans dat de gevel wordt geraakt $p_h = 1,0$. Deze kans zal verlopen naar $p_h = 0,0$ op de buitenrand, die op $2/3 L_b$ van de gevel ligt. Het verloop van de kans p_h is ingewikkeld, maar wordt hier benaderd door een lineair verband.

De kans dat het zwaartepunt in één van deze vier stroken met breedte $2/3 L_b$ langs de gevels terechtkomt en zodoende het gebouw indirect raakt is nu

$$p_{o_i} = p_{zwpt}(x^*, y^*) \left((2b + 2d) \cdot \frac{1}{3} \cdot L_b + \frac{\pi}{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L_b \right)^2 \right) \quad (3.3.13)$$

De totale kans dat het gebouw wordt geraakt door een afgebroken blad wordt nu

$$p_o = p_{o_d} + p_{o_i} \quad (3.3.14)$$

Bij verg. (3.3.12) en (3.3.13) is verondersteld dat p_{zwpt} constant is over het oppervlak A_{pr} en de strook met breedte $2/3L_b$. Indien dit niet het geval is kunnen de trefkansen als volgt worden berekend

$$p_{o_d} = \bar{p}_{zwpt} \cdot A_{pr}$$

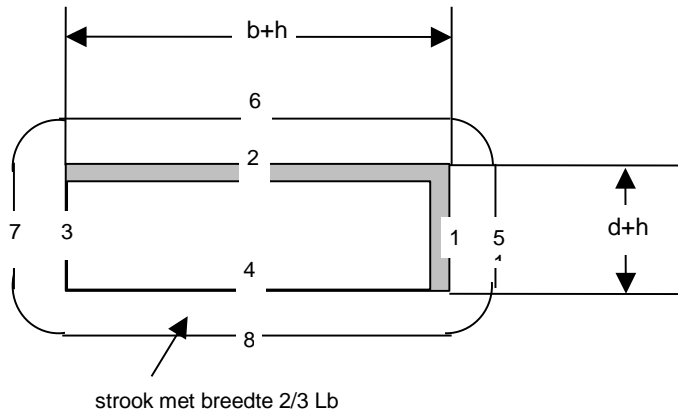
$$p_{o_i} = \bar{p}_{zwpt,b} \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot L_b + \bar{p}_{zwpt,d} \cdot d \cdot \frac{2}{3} \cdot L_b + \frac{\pi}{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L_b\right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{p}_{zwpt,b} + \bar{p}_{zwpt,d}}{2}\right)$$

waarbij:

\bar{p}_{zwpt} : de gemiddelde waarde van de trefkans van het zwaartepunt per m^2 over het oppervlak A_{pr} (gemiddelde van de punten 1 t/m 4 uit onderstaande figuur);

$\bar{p}_{zwpt,b}$: de gemiddelde waarde van de trefkans van het zwaartepunt per m^2 in de stroken langs de gevel met lengte b (gemiddelde van de punten 2, 4, 6, en 8 uit onderstaande figuur);

$\bar{p}_{zwpt,d}$: de gemiddelde waarde van de trefkans van het zwaartepunt per m^2 in de stroken langs de gevel met lengte d (gemiddelde van de punten 1, 3, 5, en 7 uit onderstaande figuur).



3.3.3 Kritieke raakfrequentie

Verg. (3.3.9) of (3.3.14) geeft de kans dat een ruimtelijk object wordt geraakt door een afgebroken blad. Voor de beoordeling van de risico's is echter de kritieke faalfrequentie van belang. De kritieke faalfrequentie is gedefinieerd als de kans op een ernstige calamiteit met het object (domino effect) ten gevolge van een mogelijke inslag van een deel van een windturbine en kan als volgt worden berekend. De kans op een calamiteit is nu

$$p_{kr} = (1 - f_{b,d}) \cdot p_{o_d} + (1 - f_{b,i}) \cdot p_{o_i} \quad (3.3.15)$$

waarbij $f_{b,d}$ en $f_{b,i}$ respectievelijk de beschermingsfactoren bij directe en bij indirecte inslag van het blad zijn. De grootte van deze beschermingsfactoren wordt bepaald door de aard en de constructie van het object en zodoende kunnen hiervoor geen generieke waarden worden gegeven (zie kader). 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.

Beschermingsfactoren

Algemeen

De constructie van een opslagtank waarin gevaarlijke stoffen onder druk worden opgeslagen is zodanig dat deze in zekere mate bestand is tegen externe impact belastingen. Indien dus een opslagtank wordt getroffen door een afgebroken blad hoeft dit niet in alle gevallen tot lekkage te leiden. Op basis van ontwerp-specificaties van de te beoordelen opslagtank kunnen eventueel beschermingsfactoren worden bepaald.

Een andere en additionele vorm van bescherming kan aanwezig zijn als bijvoorbeeld een installatie met gevaarlijke stoffen zich in een gebouw bevindt. Afhankelijk van het type gebouw zal deze installatie een

3.4 Gebieden

Ten aanzien van een gebied is, in het algemeen, alleen de kans dat het zwaartepunt in het gebied terechtkomt van belang, ofwel

$$p_A = \int_A p_{ZWPT}(x, y) dA \quad (3.4.1)$$

4 REFERENTIES

- [1] H. Braam, “*Het risico van bladbreuk voor passanten van windturbines*”, Nederlandse Duurzame Energie Conferentie, pp. 132 - 133, 25 - 26 nov. 1999.
- [2] Zadel, A. van, “*Werpafstand afgeworpen wiekdeel van een windturbine*”, rapport 40297-NUC 93-4874, KEMA 1993
- [3] J.F.Macqueen et al, “*Risks associated with wind turbine blade failures*”, IEE proc., pp. 574 – 586, Vol. 130 dec 1983.
- [4] A.J. Eggers et al, “*Exploratory study of HAWT blade throw risk to nearby people and property*”, Proc. AIAA 2001, pp. 355-367
- [5] Wieringa, J Rijkooft, P.J., “*Windklimaat van Nederland*”, SDU1983
- [6] “*Handboek energieopbrengsten van windturbines*”, TNO/Novem, 1989.
- [7] “*Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen; Beoordeling van veiligheidsrisico's, Rijkswaterstaat en NS Railinfrabeheer*”, Doc. Nr. VRWP-99004, 15 april 1999.
- [8] Turner, D.M., “*A Monte Carlo method for determining the risk presented by wind turbine blade failures*”, Wind Engineering Vol 11, no 1, 1986
- [9] Zadel, A. van, “*Onderzoek betreffende de kwantificering van de risico's van windturbines*”, rapport 40760-NUC 94-4350, KEMA 1994

BIJLAGE C.2: MASTBREUK

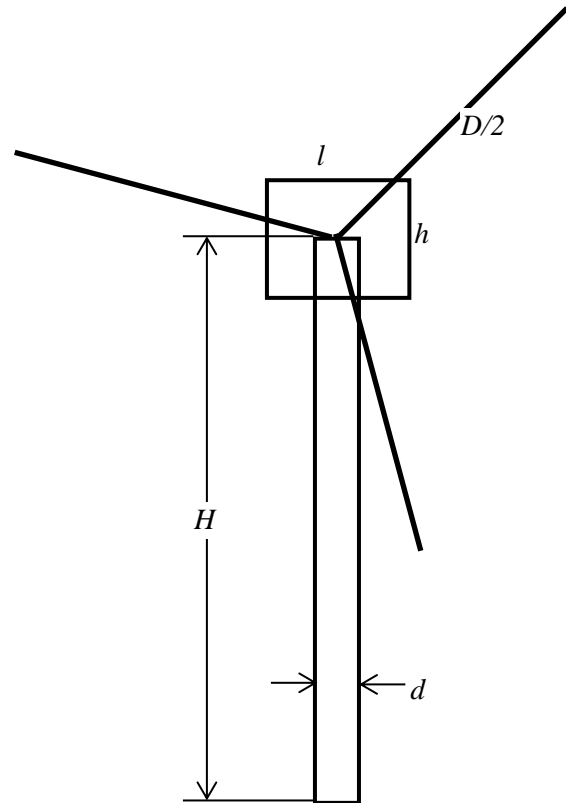
5 TREFKANSBEREKENINGEN

5.1 Personen (Plaatsgebonden Risico)

Om de trefkans van een persoon op een bepaalde plaats te berekenen kan onderscheid worden gemaakt tussen drie gebieden (zie Figuur 10).

1. Een cirkelvormig gebied met straal H rondom de turbine, waar de mast terecht kan komen.
2. Een cirkelschijf met binnenstraal $H-h/2$ en buitenstraal $H+h/2$, waar de gondel terecht kan komen.
3. Een cirkelschijf met binnenstraal $H-D/2$ en buitenstraal $H+D/2$, waar de rotor terecht kan komen.

Het is duidelijk dat deze gebieden elkaar kunnen overlappen, en dat op deze locaties de grootse trefkans bepalend is voor het risico.



Figuur 10: Afmetingen windturbine

Bij onderstaande uitwerking is verondersteld dat de mast zal breken ter plaatse van de voetflens en dat de kans op mastbreuk P_{mb} per jaar is.

1. De kans dat een persoon op een afstand r ($r < H$) van de turbine wordt getroffen door de mast, is

$$P_p = P_{mb} \cdot \frac{d}{2\pi r} \quad (5.1.1)$$

2. De kans dat een persoon in het gebied met $H-h/2 < r < H+h/2$ door de gondel wordt getroffen is

$$P_n = P_{mb} \cdot \frac{l}{2\pi H} \quad (5.1.2)$$

met l de maximale waarde van de lengte en breedte van de gondel.

3. De kans dat een persoon in het gebied met $H-D/2 < r < H+D/2$, door een blad wordt getroffen is afhankelijk van de afstand tot de turbine, maar kan worden benaderd door

$$P_r = P_{mb} \cdot \frac{D}{2\pi H} \cdot s \quad (5.1.3)$$

waarbij s de solidity aangeeft, ofwel de verhouding tussen het totale bladoppervlak en het oppervlak van de rotor.

5.2 Infrastructuur

Om het risico voor infrastructuur (verkeers-, spoor- of vaarweg) ten gevolge van mastbreuk te kunnen berekenen is onderstaand een eenvoudige maar conservatieve aanpak beschreven, waarbij de turbine wordt gemodelleerd als een cirkelsegment (zie Figuur 12) met straal

$$R = H + D/2 \quad (5.2.1)$$

en hoek

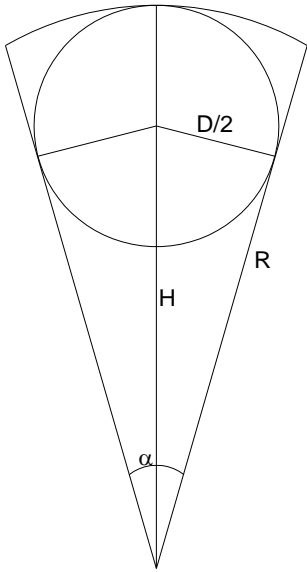
$$\alpha = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{D}{2H} \right) \quad (5.2.2)$$

waarbij

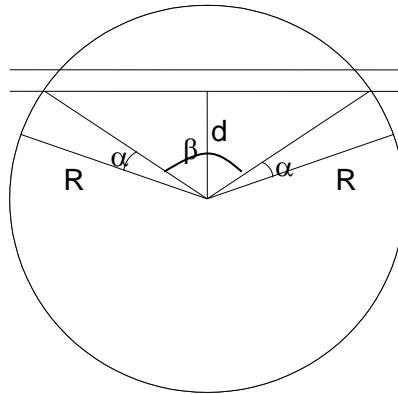
D : Diameter van de rotor [m]

H : Ashoogte [m]

De kans dat een nabijgelegen infrastructuur wordt getroffen door een onderdeel van een omvallende windturbine wordt gelijk verondersteld aan de kans dat een gedeelte van het bovengenoemde cirkelsegment in aanraking komt met de infrastructuur, hetgeen is geïllustreerd in Figuur 11.



Figuur 12: Windturbine gemodelleerd als cirkelsegment



Figuur 11: Turbine in aanraking met infrastructuur

De kans dat een nabijgelegen infrastructuur wordt getroffen door een omvallende turbine is nu

$$\begin{aligned}
 P_r &= P_{mb} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[\beta + 2 \frac{\alpha}{2} \right] \\
 &= P_{mb} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{d}{H + D/2} \right) + 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{D/2}{H} \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{5.2.3}$$

waarbij

d : Afstand tussen turbine en de infrastructuur [m]

P_{mb} : Kans op mastbreuk [1/jaar]

Hierbij is aangenomen dat de richting waarin de turbine valt uniform verdeeld is.

Passanten

De kans dat een passerende auto, trein of schip wordt geraakt kan worden afgeleid door de trefkans te vermenigvuldigen met de verblijfsfactor,

$$\tau = \frac{L_o}{v_o} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600}
 \tag{5.2.4}$$

met

L_o : lengte van het passerende object [m]

v_o : snelheid van het passerende object [m/s]

De lengte van het passerende object (trein, auto of schip) is de som van de echte lengte van het object vermeerderd met de remweg.

Bij berekening van het individueel passanten risico en het maatschappelijk risico volgens de richtlijnen van NS en RWS [7] dient een persoon te worden beschouwd die onbeschermd voorbij komt. De kans dat een passant wordt getroffen kan worden berekend door de trefkans uit verg. (5.2.3) te vermenigvuldigen met de verblijfsfactor

$$\tau = \frac{0,3}{v_o} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (5.2.5)$$

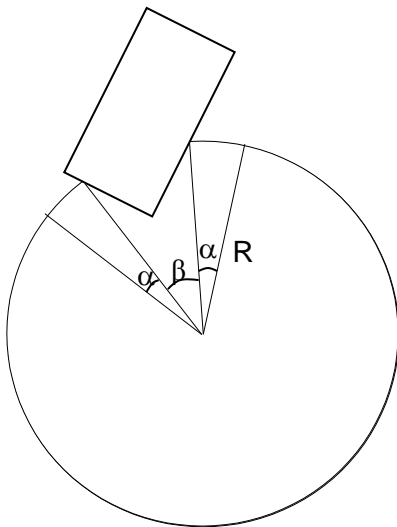
met

v_o : snelheid van de passant [m/s]

en waarbij een persoon wordt gemodelleerd als een cirkel met diameter 0,3 m.

5.3 Ruimtelijke objecten

Ook voor de trefkansberekening van ruimtelijke objecten wordt de turbine gemodelleerd als een cirkelsegment. De kans dat een nabijgelegen gebouw wordt getroffen door een onderdeel van een omvallende windturbine wordt gelijk verondersteld aan de kans dat een gedeelte van het bovengenoemde cirkelsegment in aanraking komt met het gebouw hetgeen is geïllustreerd in Figuur 13.



Figuur 13: Schematisch bovenaanzicht van de turbine met een gebouw binnen het effectgebied

De kans dat een nabijgelegen gebouw wordt getroffen door een omvallende turbine is nu

$$P_g = P_{mb} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[\beta + 2 \frac{\alpha}{2} \right] \quad (5.3.1)$$

Hierbij is aangenomen dat de richting waarin de turbine valt uniform verdeeld is.

5.4 Gebieden

De kans dat een bepaald gebied getroffen door een omvallende wind turbine kan op dezelfde manier worden berekend als aangegeven in Figuur 13.

Beschermingsfactor

Een risicoanalyse heeft tot doel na te gaan of een windturbine een risico vormt voor zijn omgeving en indien dit het geval is, vervolgens vast te stellen of dit risico toelaatbaar is. Een risicoanalyse kan dan ook opgedeeld worden in twee onderdelen:

1. Het kwantificeren van de aanwezige risico's
2. Het toetsen van de aanwezige risico's aan wetgeving, normen, codes, etc.

Windturbines kunnen een risico vormen door afgebroken of losgeraakte onderdelen die in de omgeving van de windturbine terecht komen (zie Bijlage A). Het risico wordt bepaald door de kans dat iets of iemand in de omgeving door een losgeraakt onderdeel wordt getroffen maal de gevolgen van de inslag (risico = kans * gevolg). In deze bijlage is nader ingegaan op het kwantificeren van de trefkans ten gevolge van mastbreuk.

Om het risico van mastbreuk te kunnen kwantificeren moeten de volgende twee aspecten worden beschouwd:

1. De kans dat een mast afbreekt
2. De kans dat een object of activiteit door afgebroken mast wordt getroffen (trefkans).

Voor de volgende kwetsbare objecten/activiteiten is uitgezet op welke wijze de kans berekend moet worden dat ze getroffen worden door omvallende wind turbine:

- personen
- wegen (verkeers-, spoor- en vaarwegen)
- passanten op deze wegen
- objecten over deze wegen (auto's, treinen en schepen)
- gebouwen en andere ruimtelijke objecten
- gebieden.

BIJLAGE C.3: INCIDENTEN BINNEN DE ROTORDIAMETER

6 SCENARIO'S

Naast de risico's ten gevolge van mastbreuk en bladbreuk dient ook rekening te worden gehouden met het naar beneden vallen van ijs of turbineonderdelen. Het zijn incidenten die alleen risico's vormen voor het gebied onder de rotor. Het risicovolle gebied rondom de mast heeft een diameter die gelijk is aan de rotordiameter. De volgende incidenten dienen te worden beschouwd.

1. afvallen van de hele rotor of de gehele gondel met de rotor
2. het naar beneden vallen van kleine onderdelen, b.v. bouten, neuskegels, of windmeters
3. het naar beneden vallen van delen van een blad nadat het tegen de toren is geslagen
4. het naar beneden vallen van brokken ijs tijdens stilstand.

In het kader van dit handboek is gebleken dat slechts incident 1 “*afvallen van de hele rotor of de gehele gondel met de rotor*” op een volledig kwantitatieve manier beschouwd kan worden, analoog aan mastbreuk en bladbreuk. Dit wordt uitgewerkt in paragraaf 6.1. De scenario's ten gevolge van de overige incidenten worden in paragraaf 6.2 t/m 6.4 kwalitatief beschreven met aanbevelingen voor een kwantitatieve analyse.

6.1 Afvallen van Gondel en Rotor

Voor het berekenen van de trefkansen van personen en objecten ten gevolge van het afvallen van een gondel met rotor of alleen een rotor kan dezelfde aanpak worden gevolgd als voor mastbreuk. De masthoogte wordt voor deze berekening nul verondersteld. Het risicogebied blijft dan beperkt tot een gebied rondom de toren dat gelijk is aan de rotordiameter.

6.2 Kleine Onderdelen uit de Gondel of de Rotor

Kleine onderdelen zoals bouten, een anemometer, of een beschermingskap van de gondel of de naaf vallen meestal rechtstandig naar beneden. Hun omvang en gewicht is meestal beperkt. Ze zullen amper schade aanrichten wanneer ze b.v. een gebouw of een object treffen. Wanneer echter een onbeschermd persoon wordt getroffen door een naar beneden vallende bout kan dit dodelijk zijn.

6.3 Bladfragmenten na Botsing met Toren

Nadat een turbine bijv. in onbalans is gekomen of nadat een blad beschadigd is door blikseminslag kan het voorkomen dat een blad tegen de toren slaat en dat er delen van het blad naar beneden vallen. Het betreft dan relatief kleine onderdelen met een beperkt gewicht die weinig schade aan gebouwen kunnen aanrichten. Meestal gebeuren dit soort incidenten bij zeer slecht weer (bliksem) of bij zware

stormen. De kans dat er zich op dat moment personen onbeschermd onder de turbine bevinden is dan ook kleiner.

6.4 Ijsafwerping

Uit ervaring is bekend dat in Nederland ijsafzetting op de bladen meestal ontstaat tijdens stilstand van de turbine. Observaties van dit fenomeen hebben laten zien dat bij een kleine beweging of doorbuiging van het blad, hetgeen al optreedt bij zeer geringe windsnelheid, het ijs in grote brokken naar beneden valt en dat langwerpige platen ijs in een strook onder het rotorvlak terecht komen. De brokken hebben een oppervlak dat kleiner is dan het blad zelf en een dikte van enkele millimeters tot een centimeter. Door het “dwarrelen” van de brokken ijs kunnen deze, afhankelijk van de hoogte van de windturbine in een strook van enkel tientallen meters breed terecht komen. Bij een turbine met een masthoogte van circa 65 m is waargenomen dat de stukken ijs op 10 - 15 m van het rotorvlak terecht kwamen.

Indien het gebied onder de rotor vrij toegankelijk is zal het aspect van afvallend ijs in de risicobeoordeling meegenomen moeten worden. De impact op een object is vergelijkbaar met die van brokken ijs die b.v. van een vrachtwagen afwaaien en een achteropkomende auto treffen; meestal is de achteropkomende auto niet beschadigd. Onbeschermden personen kunnen mogelijk gewond raken. Het aantal keren per jaar dat ijs aangroeit aan een blad is sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden. Indien nodig of gewenst kan dit risico worden vermeden door bij ijsafzetting de turbine zodanig te kruien dat de strook onder het rotorvlak niet meer toegankelijk is voor onbeschermden personen. Het aantal keren per jaar dat ijs aangroeit aan een blad is sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden. Volgens schattingen van de opstellers van het handboek komt de situatie in Nederland maximaal twee keer per jaar voor.

In het Activiteitenbesluit is opgenomen dat indien een windturbine als gevolg van het in werking treden van een beveiliging buiten bedrijf is gesteld, deze pas weer in werking wordt gesteld nadat de oorzaak van het buiten werking stellen is opgeheven. Mocht dit toch gebeuren dan zijn de risico's voor de omgeving minimaal omdat het om kleine brokstukken gaat die relatief ver weg geslingerd kunnen worden. Het PR hiervan is verwaarloosbaar klein.

BIJLAGE C.4: INCIDENTEN MET BUISLEIDINGEN EN ELEKTISCHE INFRASTRUCTUUR

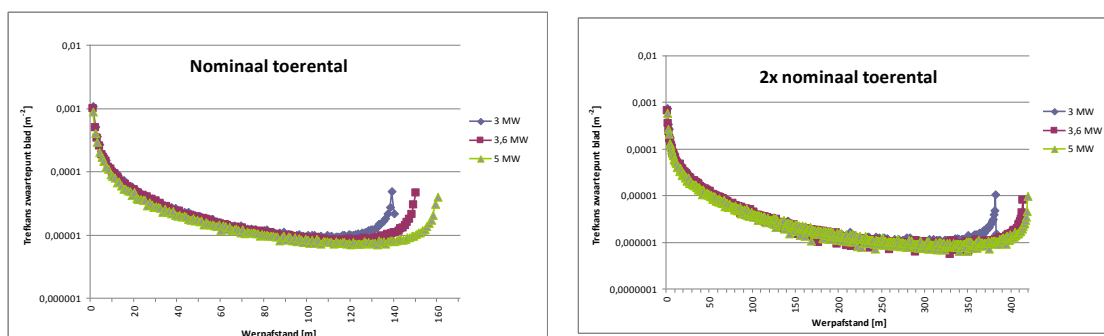
Om de impact van de windturbine op bovengrondse leidingen en kabels te bepalen, worden de ongevalsscenario's van de windturbine afzonderlijk behandeld. In de methode bestaat geen verschil tussen bovengrondse elektriciteits- of gasinfrastructuur. Beide kunnen op identieke wijze worden doorgerekend.

7.1 Bladafworp

Voor bladafworp gaat het model uit van kansdichtheidsverdelingen over het grondoppervlak. Voor hoge objecten dicht bij de windturbine is deze methode niet geschikt en moet een andere methode worden toegepast op basis van een verticaal oppervlak.

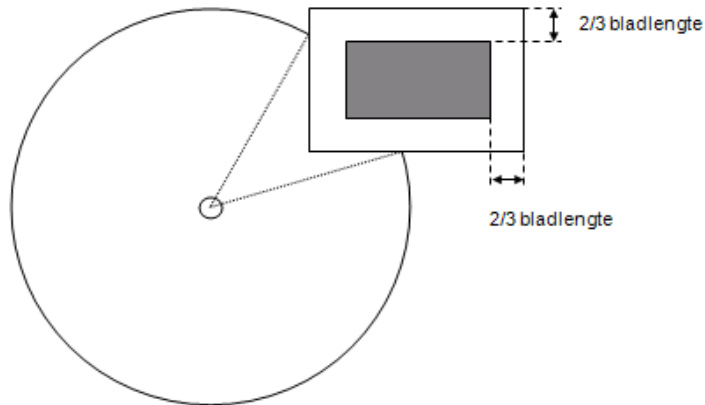
7.1.1 Bladafworp op basis van grondoppervlak

De trefkans van een object kan bepaald worden door de integraal van de kansdichtheidsverdeling, zoals weergegeven in Figuur 14, over het object oppervlak binnen de effectafstand te berekenen.



Figuur 14: Kansdichtheidsverdeling bij nominaal toerental en bij 2 maal nominaal toerental

Hierbij dient nog rekening gehouden te worden met het feit dat de tip van een blad zich op $2/3$ bladlengte afstand bevindt van het massamiddelpunt. Hiertoe wordt het grondoppervlak met $2/3$ bladlengte vergroot. Dit is conservatief, omdat de tip dan precies in de juiste stand moet staan om het object nog te raken. Een voorbeeld wordt uitgebeeld in Figuur 15. De cirkel geeft de maximale werpafstand weer, de gearceerde rechthoek geeft het grondoppervlak van het object weer.



Figuur 15: Schematische weergave van het effectgebied van bladafworp rondom een windturbine in de nabijheid van een object

Door het verloop van de kansdichtheidsfuncties van bladafworp is een pragmatische benadering van de hiervoor beschreven integraal veelal niet nauwkeurig. Het wordt daarom aanbevolen om de integraal numeriek te benaderen met een rekenprogramma.

7.1.2 Bladafworp op basis van verticaal oppervlak

Voor hoge objecten (zoals hoogspanningsmasten) dicht bij de windturbine is bovenstaande aanpak (op basis van een horizontaal objectoppervlak) minder geschikt. Voor hoge objecten dicht bij de windturbine is een aanpak op basis van een verticaal (geprojecteerd) oppervlak beter. Voor deze objecten is de volgende methode beschikbaar:

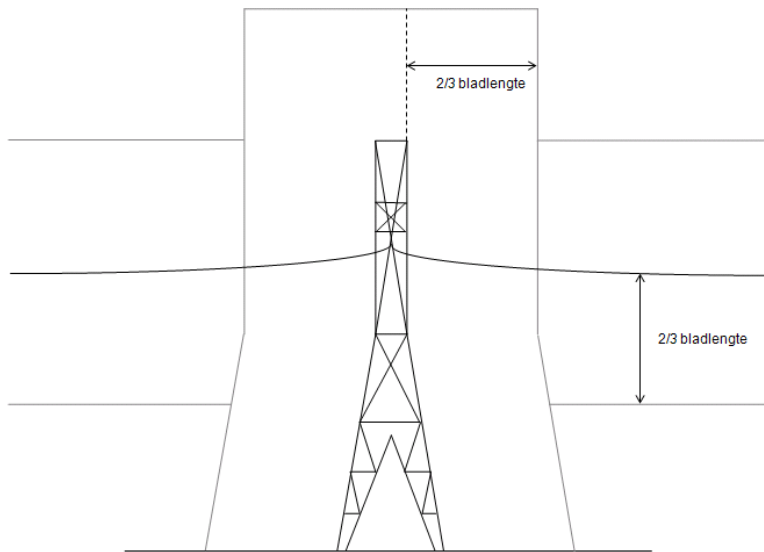
Uitgangspunt is de uniforme kansverdeling over de hoek van afworp, zowel in horizontaal opzicht (elke richting in het horizontale vlak evenveel kans) als verticaal (de stand van het blad op het moment van loslaten in het kogelbaan model). Voor hoge objecten dicht bij de windturbine kan worden aangenomen dat de kansdichtheidsfunctie voor de treflocatie eveneens uniform is. Dit in tegenstelling tot de kansdichtheidsfunctie van de treflocatie voor lage objecten verder weg, zoals in Figuur 14.

Voor ruimtelijke objecten wordt het geprojecteerde verticale oppervlak bepaald door de breedte vanuit het perspectief van de windturbine en de hoogte van het object. Een hoogspanningsmast plus lijnen kan als volgt worden benaderd.

Voor de hoogspanningsmast wordt het geprojecteerde oppervlak uitgebreid met $2/3$ bladlengte aan boven- en beide zijkanten. Hierdoor wordt wederom rekening gehouden met het feit dat een windturbineblad, waarvan het massamiddelpunt op $2/3$ bladlengte langs het object vliegt, nog net met de tip van het blad het object kan raken. Deze uitbreiding van het oppervlak is uitgebeeld in Figuur 16. De nuance in vergelijking met de berekening op basis van het grondoppervlak (horizontaal vlak) is dat

de verbreding van de onderzijde verwaarloosd wordt; dit komt doordat het massamiddelpunt niet onder een object dat op de grond staat langs kan.

Voor de lijnen wordt alleen de onder- en bovenkant van het oppervlak uitgebreid met $\frac{2}{3}$ bladlengte (en niet in de lengterichting omdat de lijn zal doorlopen tot buiten het effectgebied van de windturbine). Tevens wordt zodanig gekozen dat er geen overlap is in geprojecteerd oppervlak; in dit geval zijn lijnen pas beschouwd vanaf het punt dat deze buiten het geprojecteerd oppervlak van de hoogspanningsmast komen.

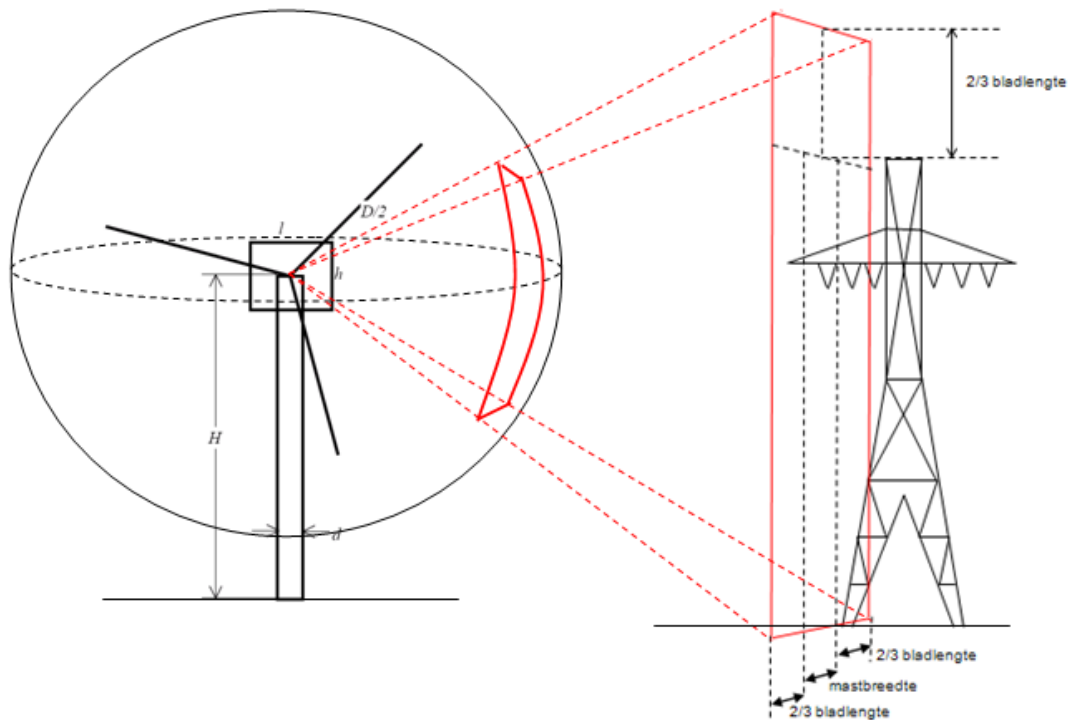


Figuur 16: Geprojecteerd oppervlak rondom een hoogspanningsmast in zijaanzicht, inclusief hoogspanningslijnen

Voor elk van deze onderdelen kan de kans worden bepaald dat bij bladafbreuk het onderdeel geraakt wordt, door de hoekfractie in hoogterichting te vermenigvuldigen met de hoekfractie in horizontale richting van het onderdeel. Hiermee wordt de fractie van het in rood ingetekende deel van het boloppervlak ten opzichte van het totale boloppervlak verkregen; deze fractie is gelijk aan de kans dat het beschouwde object geraakt wordt bij bladafworp.

Voor de hoogspanningsmast is de hoekfractie in horizontale richting t.o.v. de gemiddelde breedte genomen (de hoogspanningsmast uit Figuur 16 is niet overal even breed). De sommatie van de kansen van de verschillende onderdelen levert de totale kans op dat de verbinding (hoogspanningsmast + lijnen) wordt getroffen.

Deze schematische beschouwing is weergegeven in



Figuur 17: Schematische beschouwing van een hoogspanningsmast

Rekenvoorbeeld

Een hoogspanningsmast heeft een breedte 5 meter en hoogte 50 meter op een afstand van 60 meter van een windturbine. De windturbine heeft bladen van met een lengte van 30 meter. Ten aanzien van de breedte dient het oppervlak in beide richtingen met $2/3$ bladlengte verlengd te worden. Aan beide zijden komt er dus $2/3$ van 30 meter erbij; de totale breedte komt hiermee op $20\text{m} + 5\text{m} + 20\text{m} = 45\text{m}$. Hiermee kan de hoekfractie in de breedterichting benaderd worden met $\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{45}{60} \cdot \frac{54,1}{70} = 0,119$ (voor exacte berekening kunnen goniometrische formules worden gebruikt).

Voor de hoogte wordt alleen aan de bovenzijde gecorrigeerd met de bladlengte: de effectieve hoogte wordt daarmee $50\text{m} + 2/3$ van $30\text{m} = 70\text{m}$. De hoekfractie die hiermee gepaard gaat is $\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{70}{60} = 0,186$.

De totale kans dat – gegeven bladafbreuk – het object wordt geraakt, wordt verkregen door de vermenigvuldiging van beide hoekfracties: $0,119 * 0,186 = 2,2 \cdot 10^{-2}$.

7.1.3 Horizontaal of verticaal oppervlak?

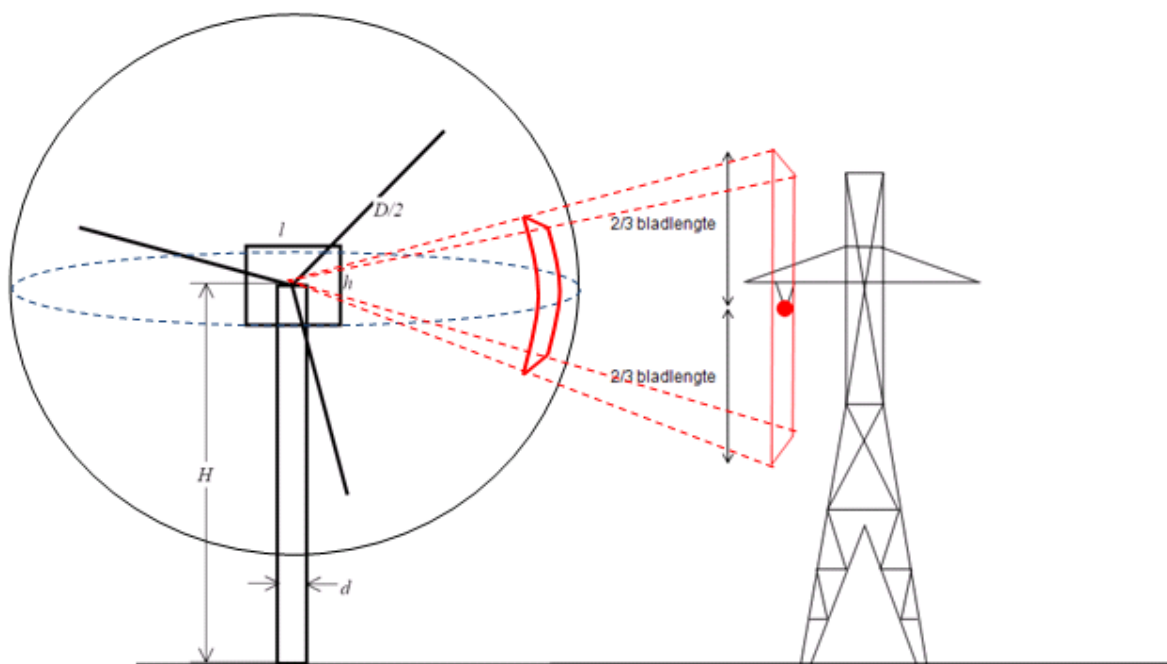
De keuze wanneer met het verticale of horizontale vlak dient te worden gerekend hangt af van de verhouding tussen lengte l en de hoogte h van het object en tevens de afstand r tussen object en windturbine in relatie tot de maximale werpafstand R . Als vuistregel kan de volgende vergelijking worden gehanteerd:

$$h > 10 * l * \frac{r^2}{R^2}$$

Wanneer het linker lid (de hoogte) veel groter is dan het rechter lid, kan beter met het verticale vlak (hoekfracties) gerekend worden. Wanneer de hoogte beduidend kleiner is, is de berekening op basis van het grondoppervlak beter geschikt. Wanneer beide kanten van de vergelijking ongeveer even groot zijn, wordt aangeraden om beide methoden toe te passen en de meest conservatieve uitkomst in de risicoberekening te gebruiken. Voor een kubus betekent dit dat het omslagpunt in de berekening op ongeveer op $1/3$ van de maximale werpafstand bevindt: dichterbij kan beter met het verticale vlak worden gerekend, verder af is de berekening met betrekking tot het grondoppervlak meer representatief.

7.1.4 Hoogspanningslijnen (langwerpige objecten)

De kans dat een langwerpig object, zoals bovengrondse elektriciteitslijnen of bovengrondse gasleidingen worden geraakt, kan nauwkeuriger worden bepaald door de lijnen in korte segmenten te analyseren en de uitkomst van de raakkansen van de verschillende delen bij elkaar op te tellen. Dit is gevisualiseerd in Figuur 18.



Figuur 18: Schematische beschouwing van hoogspanningslijnen

In het figuur is een elektriciteitslijn met een dikke stip aangegeven. De mast is weergegeven ter ondersteuning van de visualisatie maar maakt geen deel uit van de berekening (wordt apart uitgerekend). Het raakoppervlak wordt aan boven- en onderzijde met 2/3 bladlengte uitgebreid. In lengterichting wordt dit niet gedaan, omdat over de lengterichting zal worden geïntegreerd en dubbeltelling zou optreden.

Wanneer de lijnen in korte segmenten worden beschouwd (typisch wordt 10m in risicoanalyses aangehouden) kan op eenzelfde manier de kans bepaald worden dat de lijn door een afgeworpen blad getroffen wordt. Voor het beschouwde stuk kunnen opnieuw de hoekfracties in verticale en horizontale richting worden bepaald. De vermenigvuldiging geeft dan de kans dat dit segment getroffen wordt, wanneer de beschouwde windturbine een blad zou verliezen.

Bij meerdere lijnen onder elkaar wordt eenzelfde benadering toegepast; nu volgt dat het geprojecteerde oppervlak wordt gevormd door de afstand tussen onderste en bovenste lijn, aangevuld met 2/3 bladlengte aan onder- en bovenzijde.

Rekenvoorbeeld

Beschouw de elektriciteitslijn zoals in Figuur 18. De lijn is in segmenten van 10 meter verdeeld. Wanneer het 10 meter lange segment het dichtst bij de windturbine wordt beschouwd, staat dit gedeelte automatisch loodrecht op de lijn richting de windturbine en is de geprojecteerde breedte (vanuit de windturbine beschouwd) gelijk aan de daadwerkelijke breedte. De afstand tussen het beschouwde segment en de windturbine is 60m. Bladlengte van de windturbine betreft 42m.

Het geprojecteerde oppervlak betreft nu 10m breed (wordt niet uitgebreid omdat over deze lengte wordt geïntegreerd en dubbeltelling zou ontstaan) en 2 maal 2/3 van 42m = 56m hoog.

De hoekfractie in horizontale richting betreft $\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{10}{60} = 2,65 \cdot 10^{-2}$.

De hoekfractie in verticale richting betreft $\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{56}{60} = 0,149$.

De totale kans dat dit segment door een afgeworpen blad wordt geraakt is nu het product van deze kansen: $2,65 \cdot 10^{-2} * 0,149 = 3,9 \cdot 10^{-3}$.

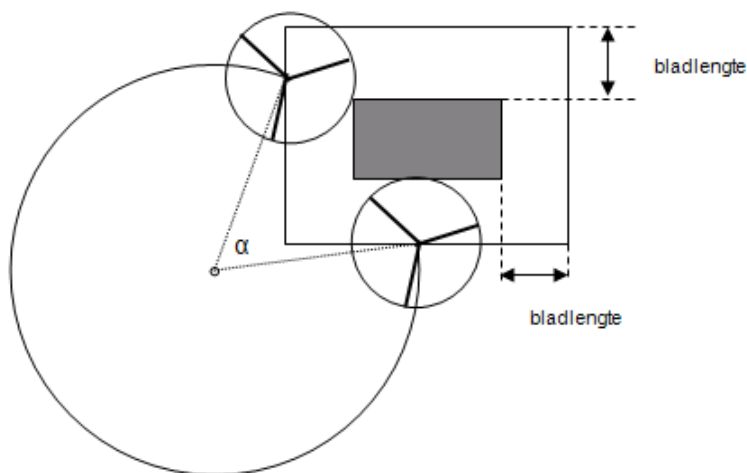
Voor een lange lijn kan de totale raakkans worden gevonden, door voor alle achtereenvolgende segmenten deze kans te berekenen en op te tellen. Het doorhangen van de lijnen heeft geen effect op de berekening; de horizontale afstand en de geprojecteerde verticale hoogte zijn onafhankelijk van het doorhangen. In combinatie met voorgaande methode voor de elektriciteitsmasten kan voor het gehele tracé de totale impact van een blad van een windturbine worden uitgerekend. Hierbij moet wel bedacht worden dat de overlap van de geprojecteerde oppervlakken van de mast en lijn niet dubbel geteld dienen te worden. Nadat de geprojecteerde oppervlakken van de masten zijn bepaald, hoeft alleen voor de lijnsegmenten tussen deze oppervlakken gerekend te worden. De keuze van de lijnen dient zodanig

te zijn dat alle onderdelen binnen de effectafstand van de windturbine zijn beschouwd; buiten maximale bladworp afstand is de raakkans nul.

7.2 Mastbreuk

Bij de mastbreuk wordt bij "volledig falen" aangenomen dat de mast breekt op 0m hoogte. De reikwijdte bij het omvallen wordt bepaald door de masthoogte en de stand van de turbinebladen op het moment dat de grond wordt geraakt. Het volledig falen wordt als volgt uitgewerkt:

De kans dat - gegeven volledig falen van de mast - een object wordt geraakt, wordt bepaald door de hoekfractie waarbij het object nog wordt getroffen. Hierbij wordt tevens rekening gehouden met het feit dat de tip van het turbineblad het object kan raken. Hierdoor wordt het object in lengte en breedterichting met een bladlengte vergroot tot een geprojecteerd oppervlak. Van dit geprojecteerd oppervlak wordt de hoekfractie bepaald waarmee rekening gehouden dient te worden, zie Figuur 19. Deze aanpak is conservatief in dit opzicht, doordat ervan wordt uitgegaan dat het oppervlak waarin de bladen draaien, plat op de grond terechtkomt en hiermee het grootst mogelijke oppervlak treft.



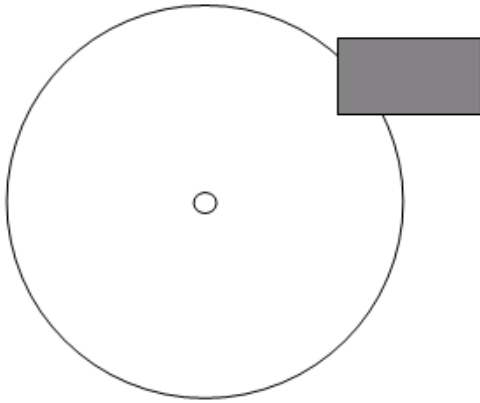
Figuur 19: Schematisch bovenaanzicht van het effectgebied van de mast van een windturbine in combinatie met een object (grijs gearceerd)

Voor het scenario van volledig falen van de mast betreft de kans dat het object getroffen wordt de hoekfractie van het geprojecteerde (vergroete) objectoppervlak.

7.3 Gondel en rotorafworp

Gondelafworp en rotorafworp wordt verondersteld binnen de rotorstraal plaats te vinden.

Bovengrondse objecten die daarbinnen getroffen worden, zullen door het grote gewicht van de windturbine onderdelen (mast, gondel of blad) bezwijken. De kans dat bij een ongeval een object wordt geraakt hangt af van de geometrie: hieronder is een bovenaanzicht van het effectgebied rondom een windturbine weergegeven. De grote cirkel betreft het effectgebied van de gondel/rotor. In het grijs is een object weergegeven.



Figuur 20: Schematisch bovenaanzicht van windturbine, het effectgebied van de gondel en een object dat geraakt zou kunnen worden

De meest nauwkeurige methode om deze kans te bepalen is gebruik te maken van software die de integraal van de kansdichtheid over het gemeenschappelijk oppervlak zou kunnen oplossen. Bij benadering is deze kans te bepalen met behulp van de kansdichtheden op de drie hoekpunten van het gemeenschappelijk oppervlak. Wanneer de kansdichtheid op de rand van het effectgebied wordt verwaarloosd (bijna 0), volgt dat de kans wordt gegeven door het gemeenschappelijke oppervlak te vermenigvuldigen met $1/3$ (inhoud van een tetraëder betreft $1/3 * h * \text{oppervlak}$) maal de kansdichtheid van het dichtstbijzijnde punt.

8 ONDERGRONDSE LEIDINGEN EN KABELS

8.1 Bladafworp

8.1.1 Raakfrequentie tracé

Er zijn twee manieren waarop ondergrondse leidingen kunnen falen door impact van een zwaar voorwerp op de grond:

1. het voorwerp vormt een krater en raakt de leiding daarbij rechtstreeks
2. de leiding faalt doordat de grond bij een dergelijke grote impact over lange afstanden weggeduwd wordt, waardoor leidingen worden blootgesteld aan verschuivingen en door de ontstane spanningen kunnen falen.

De methodiek die gebruikt wordt om de raakkans te berekenen is afgeleid uit onderzoek naar de uitwerking van explosieven op ondergrondse pijpleidingen. Uit deze onderzoeken is een formule bepaald die de stress in de pijpleiding uitrekent als gevolg van de impact. Voor toepassing bij de windturbines is deze formule herschreven zodanig dat de maximale afstand, waarbij de leiding nog faalt (de kritische afstand) volgt uit de hoeveelheid toelaatbare stress. Door herschrijving naar gebruikelijke eenheden volgen in de formule aanvullende factoren van $2,03 \cdot 10^{-4}$ en 0,3048.

$$R = 0,3048 * \left(\frac{4,44 E}{\sigma_{toelaatbaar}} \right)^{\frac{1}{k_5 k_6}} * \left(\frac{2,03 * 10^{-4} * k_4 * E_{kinetisch}}{\sqrt{E * t}} \right)^{\frac{1}{k_5}}$$

waarbij

R : de kritische afstand [m]

E : elasticiteit [Pa]

$\sigma_{toelaatbaar}$: toelaatbare extra stress voordat metaal gaat vloeien [Pa]

t : wanddikte [mm]

$SMYS$: de gespecificeerde minimum vloeigrens [Pa]

$E_{kinetisch}$: de energie van de bron (effectieve kinetische energie) [J] of voor de lijnbron de energiedichtheid per eenheidslengte [J/m]

k_4, k_5 en k_6 : empirische coëfficiënten, zoals in onderstaande tabel gedefinieerd.

Tabel 1: Empirische coëfficiënten

| | Puntbron | Lijnbron |
|----------------|----------|-------------------|
| K ₄ | 1.0 | 0.43 ¹ |
| K ₅ | 2.5 | 1.5 |
| K ₆ | 0.77 | 0.77 |

Voor een pijpleiding is de nog toelaatbare extra stress voordat vervorming optreed gelijk aan de SMYS – de hoopstress:

$$\sigma_{toelaatbaar} = SMYS - \frac{P * D}{2 * t}$$

- $\sigma_{toelaatbaar}$: toelaatbare extra stress door de schokgolf [Pa]
 SMYS : de gespecificeerde minimum vloeigrens [Pa]
 P : de interne gasdruk in de pijpleiding [Pa]
 D : de diameter van de pijpleiding [mm]
 t : wanddikte [mm].

De SMYS (specified minimum yield stress) is een materiaaleigenschap en wordt bij het ontwerp van gasleidingen opgegeven als minimum eis. Veel voorkomende waarden zijn $241 \cdot 10^6$ Pa (Grade B staal), $414 \cdot 10^6$ Pa (X60 staal) en $483 \cdot 10^6$ Pa (X70 staal).

Voor elk van de vallende onderdelen kan de energie worden berekend die het onderdeel heeft, wanneer het de bodem treft. De hoeveelheid energie bestaat voor de gondel en de mast uit de potentiële energie (m·g·h). Voor de turbinebladen komt hier tevens de initiële kinetische energie bij (de bewegingsenergie van het ronddraaiende turbineblad). De energie van het vallen van de mast en gondel zal vrijwel geheel verticaal zijn gericht en aangenomen wordt dat er geen energieverlies optreedt.

Turbinebladen kunnen ver weggeslingerd worden. De hoek van impact van een blad met de grond zal gemiddeld slechts 45° betreffen in plaats van volledig verticaal. De energie die de grond in dissipeert is hierdoor slechts de helft van deze kinetische energie. De overige helft van de energie betreft de kinetische energie behorend bij de horizontale richting, waarmee het turbineblad doorglijdt (of stuitert) over het grondoppervlak; dit draagt niet bij aan de schokgolf.

Het handboek beveelt aan om de fractie van de totale energie behorend bij de verticale snelheidscomponent voor elk scenario te berekenen en hier toe te passen.

De potentiële energie van het turbineblad (m·g·h) wordt, op enige wrijving na, volledig omgezet in kinetische energie. Hierdoor betreft bovenstaande correctiefactor alleen de initiële bewegingsenergie van het turbineblad.

¹ De factor 0.43 wordt gevormd door de originele waarde van 1.4 vermenigvuldigd met 0.3048 m/feet. De formule gebruikt een energiedichtheid per voet. Overgang naar energie per meter geeft dan teveel energie per eenheidslengte. Door te corrigeren met deze factor wordt in de formule met dezelfde energiedichtheid gerekend.

$$E_{schokgolf} = m * g * h + \frac{1}{4} * m * v^2, \quad \text{met } v = \frac{2\pi\omega}{60} * \frac{l}{3}$$

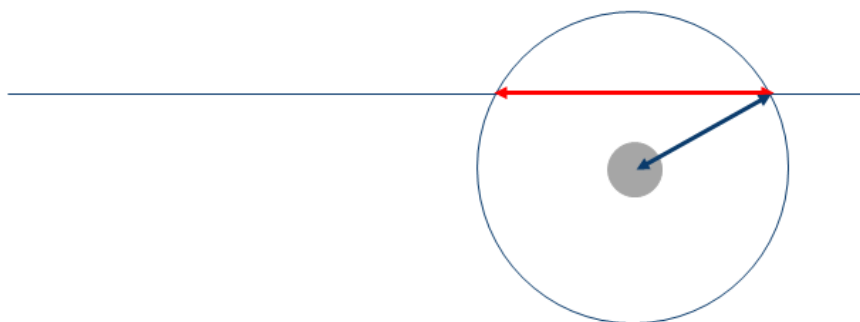
| | |
|-------------------|---|
| $E_{schokgolf}$: | de energie van de bron (effectieve kinetische energie van de schokgolf) [J] |
| m : | massa van het object [kg] |
| g : | valversnelling (9,81 m/s ²) |
| h : | initiële hoogte van het vallend object [m] |
| ω : | toerental van de windturbine [per minuut], scenarioafhankelijk |
| l : | bladlengte van de windturbine [m], waarbij is aangenomen dat het massamiddelpunt op 1/3 ligt. |

Voor de hoogte van het vallend object wordt voor zowel de gondel als het turbineblad de masthoogte gehanteerd. De hoogte van het massamiddelpunt van de gondel ofwel het turbineblad ten opzichte van deze masthoogte wordt hierbij verwaarloosd.

8.1.2 Kritische strook

Met bovenstaande formules kan aan de hand van de windturbine- en leidingparameters een kritische afstand worden gevonden waarbinnen een door de grond aan de ondergrondse leiding doorgegeven schokgolf als gevolg van het op de grond neerkomen van een windturbine onderdeel tot schade zal leiden aan de leiding. Elk windturbinedeel heeft een eigen energiehoeveelheid en dus wordt voor elk onderdeel een eigen kritische afstand berekend.

Deze kritische afstand kan worden toegepast als een denkbeeldige cilinder rondom de leiding, zoals is weergegeven in Figuur 21. Het grondoppervlak binnen deze denkbeeldige cilinder (het in het rood aangegeven deel) is de kritische strook; valt hierbinnen het massamiddelpunt van het desbetreffende voorwerp, dan is de afstand tot de leiding kleiner dan de kritische afstand en leidt dit rekenkundig tot schade aan de leiding.



Figuur 21: Verticale dwarsdoorsnede van de lucht/aarde, loodrecht op de leiding (grijs), waarmee de kritische breedte van de strook(rood) als functie van de kritische afstand (blauw) en diepteligging wordt bepaald

De breedte van de kritische strook wordt berekend met de volgende formule:

$$kritisch\ breedte = \begin{cases} 2 * \sqrt{R^2 - d^2}, & 0 < d < R \\ 0 & d \geq R \end{cases}$$

R : kritische afstand [m]

d : afstand maaiveld tot de bovenkant van de leiding (de "gronddekking") [m]

De breedte van de kritische strook varieert hiermee van $2R$ ($d = 0$; pijpleiding aan het aardoppervlak) tot 0 (pijpleiding dieper dan de kritische afstand R).

In de praktijk liggen kabels veelal met drie naast elkaar; elk voor een verschillende fase. Wanneer deze kabels als groep worden beschouwd dient voor de kritische afstand de afstand tussen de buitenste kabels hierbij opgeteld te worden.

Voor elk onderdeel van de windturbine (blad, gondel en mast) kan op deze manier een kritische afstand worden bepaald voor een leiding. Hiermee volgt uit de diepteligging van de leiding de desbetreffende breedte van de kritische strook. Analytisch beschouwd kan de raakkans per jaar worden verkregen door de integraal van de kansdichtheidsverdeling over het kritische oppervlak te nemen.

$$P = \iint^{Krit.Opp} F(x,y) dx dy$$

| | |
|----------|--|
| P | kans |
| $F(x,y)$ | kansdichtheidsverdeling |
| Krit.Opp | het kritisch oppervlak, gegeven door de lengte van het segment en de kritische breedte van de strook |

Deze methode kan worden benaderd door de leiding in korte stukken te beschouwen. Voor elk stuk leiding kan per windturbineonderdeel één desbetreffende kritische breedte worden gevonden (uniform over het leidingdeel). De vermenigvuldiging van de lengte van een dergelijk leidingsegment, de kritische breedte en de kansdichtheid ten opzicht van het middelpunt van dit leidingsegment geeft de kans van falen van dit leidingsegment als gevolg van het onderdeel.

De som van de frequenties per onderdeel kan worden opgeteld bij de autonome faalfrequentie van dit stukje leiding in een desbetreffende wettelijke kwantitatieve risicoanalyse.

8.1.3 Domino scenario's op ondergrondse elektriciteitskabels

Voor ondergrondse elektriciteitskabels is in de literatuur geen model bekend zoals dit voor ondergrondse pijpleidingen uiteen is gezet. Het is dus in dit kader niet mogelijk te verwijzen naar een uitgebreid onderzoek, waarin de invloed van een schokgolf op een kabel is beschreven. Daarom wordt een aantal mogelijke modellen beschouwd.

In het Handboek 2005 wordt voor ondergrondse gastransportleidingen (kabels worden in het Handboek 2005 nog niet beschouwd) een model gehanteerd dat uitgaat van een kritisch oppervlak en een aantal beschermingsfactoren. Het uitgangspunt hierbij is dat falen kan optreden als een afbrekend blad zodanig op het kritisch oppervlak terechtkomt dat het voldoende energie bevat, onder de juiste hoek en vrijwel door de hartlijn van de leiding gaat (elk met een beschermingsfactor van 0.1, resulterend in een totale conditionele kans van 0.001). Echter, dit model heeft de eigenschap dat naarmate de leiding, en dan analoog beschouwd eveneens de kabel, dieper wordt gelegd het risico groter wordt (doordat het kritisch oppervlak toeneemt). Bovendien is de beschermingsfactor van de gronddekking, zoals boven genoemd, constant verondersteld. Deze methodiek is in praktisch opzicht niet houdbaar.

Een andere mogelijkheid is het extrapoleren van de formule voor stalen buisleidingen (zie paragraaf 8.1.1) naar kabels; in de formule voor gastransportleidingen wordt gebruikt gemaakt van slechts drie bijbehorende pijpleidingeigenschappen: wanddikte, elasticiteit en de SMYS van het gebruikte materiaal. De diameter van de pijpleiding (of verhouding wanddikte/diameter) is geen onderdeel van de formule. Daarmee lijken bovenstaande eigenschappen in principe ook voor het metaal in een kabel toepasbaar (kleine diameter pijpleiding met relatief grote wanddikte). Er zijn echter ook bezwaren die het gebruik van de formule voor kabels uitsluiten. Zo is het extrapoleren van een empirisch bepaalde formule tot buiten het geteste gebied zeer riskant (in tegenstelling tot het gebruik van een fysisch model). Daarnaast is de voorstelling dat kabels alleen uit een metalen omhulling bestaan een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Bij kabels gaat het om een samenspel van verschillende materialen, en niet om de krachten op een enkele metalen mantel alleen. Als laatste moet worden gesteld dat er naast een schokgolf ook sprake kan zijn van grondverplaatsing door het vallende object.

Naast het bestaande model en het model voor pijpleidingen (schokgolfmodel) is ook gekeken naar een oplossing op basis van indringdiepte. Het nadeel van dit model is dat er een reeks aan aannames ten aanzien van de stand van een blad en de vrijheidsgraden rondom het massamiddelpunt moet worden gedaan om tot representatieve scenario's te komen. Daarbij dienen kansen in principe bepaald te worden door van de aannames de bijbehorende kansdichtheidsverdelingen uit te integreren. Vanwege de onzekerheid in kansdichtheidsverdelingen is de uitkomst van een dergelijke aanpak niet eenvoudig te kwantificeren. Tevens is het uitgangspunt dat de kabel pas breekt wanneer het op de juiste manier door een blad wordt geraakt optimistisch in vergelijking met het schokgolfmodel en wordt geprefereerd een model te vinden analoog aan de impact op een pijpleiding.

8.1.4 **Kritische afstand**

Doordat de verschillende typen omhulling van de kabel variatie in gevoeligheid hebben en er geen modellen beschikbaar zijn, waarin de relatie afstand, energie en gevoeligheid van de mantel worden beschreven, wordt op basis van "expert opinion" een kritische afstand bepaald. Met deze kritische afstand kan analoog aan het pijpleidingmodel een kritische breedte worden bepaald, die verder alleen afhangt van de diepteligging. Deze kritische breedte geeft, in combinatie met de kabellengte, het oppervlak aan waarbinnen een voorwerp dient te vallen om de kabel te doen beschadigen (analoog aan de methode voor ondergrondse gasinfrastructuur, paragraaf 8.1.1).

Voor de bovengenoemde beschouwing wordt eerst een analyse van de verschillende typen kabels gegeven, waarna vervolgens wordt afgeleid wat voor elk van deze typen de kritische afstand is. De volgende vier typen ondergrondse elektriciteitskabels kunnen worden onderscheiden op basis van de verschillende omhullingen:

Self Contained Fluid Filled cables (SCFF cables - oliedrukkabels)

Deze hoogspanningskabels zijn typisch een jaar of 30 oud, en hebben een verslechterde conditie. De loodmantel en de papierlagen zijn gevoelig voor trillingen. Wanneer de loodmantel scheurt, zal er een olie lekkage optreden, die kan worden gedetecteerd door on-line drukkewaking van het hydraulische systeem (vaak aanwezig). Het gevolg is niet alleen dat de kabel moet worden gerepareerd (uit bedrijf dus), maar ook dat er milieuvervuiling ontstaat die moet worden opgeruimd. De reparatie kan maar door enkele mensen worden uitgevoerd, omdat het verouderde technieken betreft. Bij ernstigere vormen van beschadiging, zal de kabel ook direct elektrisch kapot gaan, doordat papierlagen scheuren of verplaatsen.

Paper Insulated Lead Covered cables (PILC cables – GPLK kabels)

Deze middenspanningskabels zijn ook typisch 30 jaar oud. Dit type kabel komt bij TenneT slechts in beperkte mate voor, maar is een veel voorkomend kabeltype bij regionale netbeheerders (RNB's). De loodmantel is ook hier het meest kritisch. Bij scheuren van de loodmantel komt er echter geen olie vrij, maar zal er water indringen, wat vroeger of later zal leiden tot falen van de kabels. Dat betekent dus dat wanneer er een haarscheurtje ontstaat, het best een half jaar kan duren voordat die kabel elektrisch doorslaat. Oorzaak en gevolg kunnen dus uit elkaar liggen in de tijd. Bij verouderde PILC is het niet vreemd dat de armering van de kabels degenereert. Dan is het lood extra gevoelig voor trillingen in de grond.

Gas insulated cables (UGD, uitwendige gasdruk kabels)

Deze hoogspanningskabels zijn typisch 20-30 jaar oud. Dit zijn geïmpregneerde papierkabels, die onder gasdruk staan en in een stalen pijp zijn ondergebracht. Deze kabels zijn door de stalen pijp robuuster dan bovengenoemde kabels. Bij beschadiging echter, is het gevolg ook vervelender. Bij breuk van de staalpijp ontstaat een uittreden van gas (door ongeveer 15 bar gasdruk), waardoor een krater ontstaat. Vervolgens verliest het hele kabelcircuit zijn goede

elektrische eigenschappen. Het kan worden gerepareerd (maar is net als de SCFF specialistisch werk dat maar door weinigen gedaan kan worden), maar het kabelcircuit moet na reparatie worden geconditioneerd door het langdurig zonder spanning op druk te laten staan. Daardoor is een kabelcircuit na beschadiging zo maar 3-4 weken uit bedrijf.

XLPE insulated cables (XLPE kabels)

Deze hoog of middenspanningskabels zijn relatief nieuw. Ze kunnen weliswaar reeds 20-30 jaar oud zijn, maar typisch zijn ze slechts een jaar of 10. Dit zijn kunststof geïsoleerde systemen, die vrij goed te repareren zijn. Ze kunnen een loodmantel hebben (typisch voor NL hoogspanningskabels), ze kunnen ook andere mantels hebben (koperdraadscherm is typisch voor middenspanningskabels). Ze lijken wat beter bestand tegen trillingen en mechanische krachten, hoewel de moffen (verbindingsstukken tussen twee kabelsecties) er gevoeliger voor zijn.

Om de kritische afstand te bepalen is met behulp van Figuur 22 een beschouwing gemaakt van de hoeveelheid energie die per vierkante meter wegvloeit als functie van de afstand tussen kabel en punt van inslag van het massamiddelpunt van het windturbineonderdeel. Hierbij is voor de relatie tussen energie per oppervlak en de afstand het model van de gastransportleiding als uitgangspunt genomen.

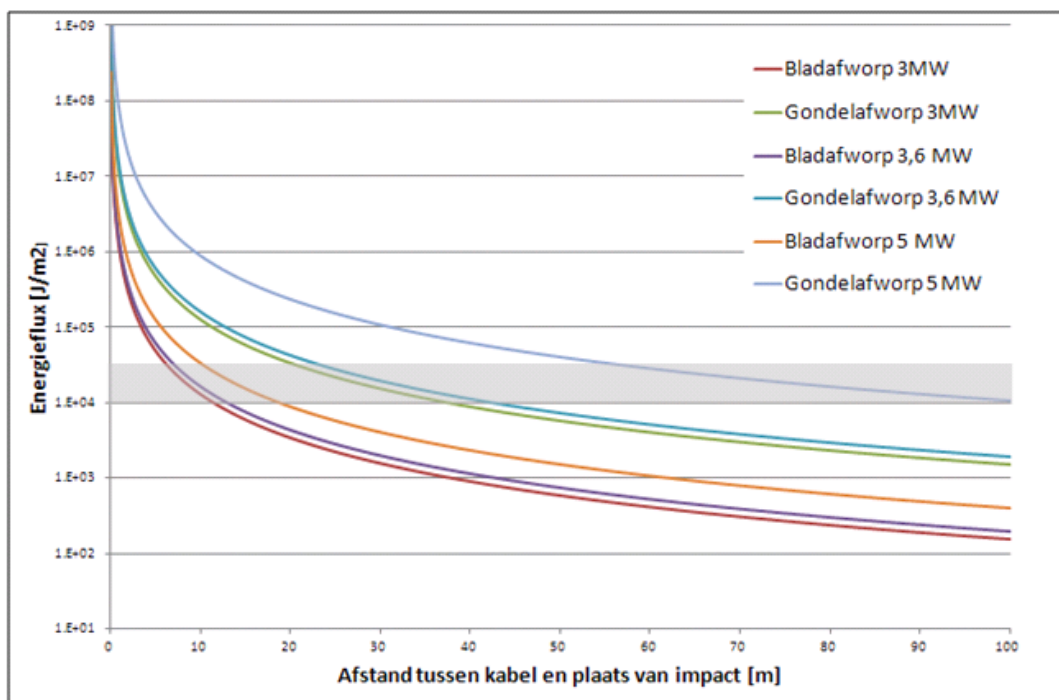
In dat model neemt de stress voor een puntbron af met de afstand volgens $\left(\frac{1}{R^{2,5}}\right)^{0,77} = \frac{1}{R^{1,925}}$. Deze relatie wordt ook toegepast voor de kabel.

Als typische voorbeelden zijn de kritische afstanden bepaald van een 3MW, een 3.6MW en een 5 MW windturbine, waarvan de gehanteerde parameters zijn weergegeven in

Tabel 2: Uitgangspunten bij de voorbeeldberekeningen

| Vermogen [MW] | Masthoogte [m] | Massa gondel *1000 [kg] | Massa blad *1000 [kg] | Massa mast *1000 [kg] |
|------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 3 | 100 | 70 | 7 | 250 |
| 3,6 | 110 | 80 | 8 | 300 |
| 5 | 120 | 400 | 15 | 600 |

Tevens is een bandbreedte ingetekend waarbij verwacht wordt dat elektriciteitskabels een aanzienlijke kans hebben te bezwijken. Bij de bovenrand van deze bandbreedte horen de stevigere kabels zoals XLPE en gas insulated cables. De onderrand van deze bandbreedte geldt voor de gevoeliger Self Contained Fluid Filled cables en Paper Insulated Lead Covered cables.



Figuur 22: Energieflux als functie van de afstand voor gondel en blad, met de verwachte kritische energiehoeveelheden voor de verschillende kabeltypen (bovenrand grijze balk voor UGD en XPLE en onderrand voor SCFF en PILC)

De snijpunten van de energieflux met de energieniveaus uit de bandbreedte geven de afstanden aan waarbinnen het vallen van het onderdeel tot kritische schade leidt. Uitgaande van bovenstaande beschouwing worden de volgende kritische afstanden uitgelezen uit Tabel 3:

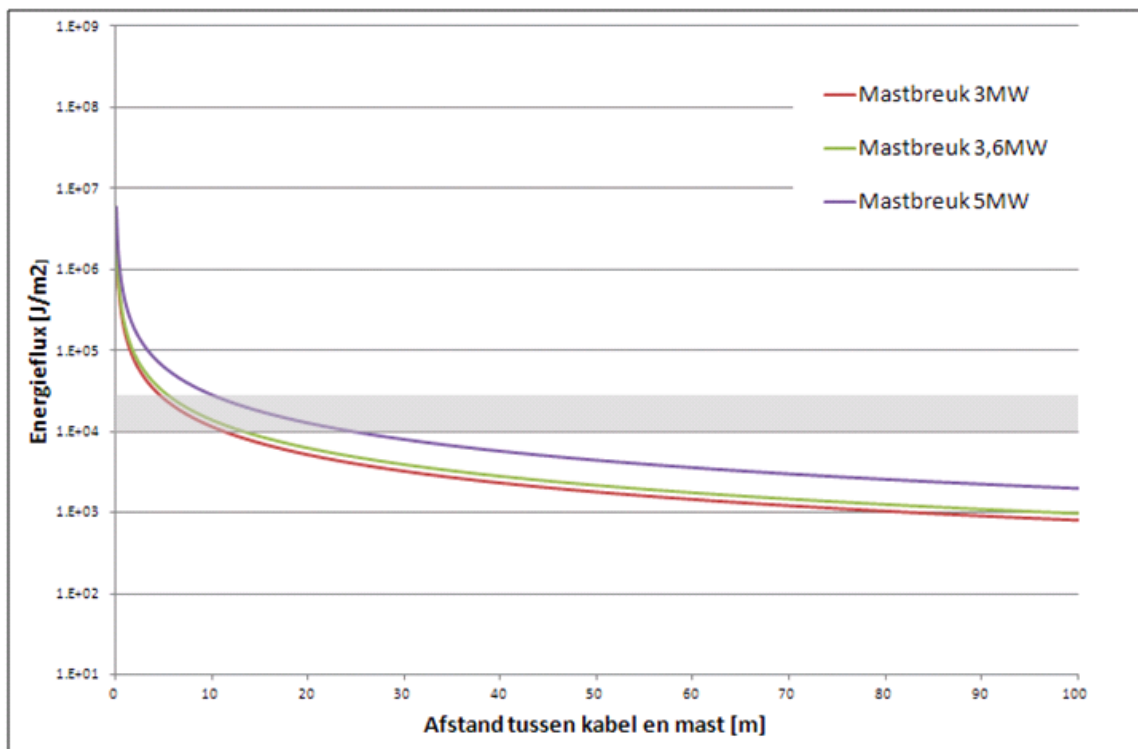
Tabel 3: Afgelezen kritische afstanden per type ondergrondse elektriciteitskabel

| Kritische afstanden per type ondergrondse elektriciteitskabel | | | | | | |
|---|------------------|-------|-------|------------|-------|------|
| | Val gondel/rotor | | | Bladafworp | | |
| | 3MW | 3,6MW | 5MW | 3MW | 3,6MW | 5MW |
| Self Contained Fluid Filled cables (SCFF) | 40 m | 45 m | 100 m | 12 m | 13 m | 20 m |
| Paper Insulated Lead Covered cables (PILC) | 40 m | 45 m | 100 m | 12 m | 13 m | 20 m |
| Gas insulated cables (UGD) | 25 m | 25 m | 60 m | 7 m | 8 m | 11 m |
| XLPE insulated cables | 25 m | 25 m | 60 m | 7 m | 8 m | 11 m |

De mast kan op eenzelfde manier worden beschouwd. Voor de energiedissipatie (relatie tussen energie per oppervlak en de afstand) wordt het empirisch vastgestelde verband (zie paragraaf) gebruikt.

Hierin neemt de stress voor een lijnbron af met de afstand volgens $\left(\frac{1}{R^{1,5}}\right)^{0,77} = \frac{1}{R^{1,155}}$. Omdat dit een grondeigenschap betreft, kan deze relatie ook worden toegepast voor de kabel.

In de benadering voor de mast wordt uitgegaan van een uniforme massaverdeling over de lengte van de mast. Daarbij wordt voor het bepalen van de energie uitgegaan van de maximale hoogte. Dit betekent dat de onderstaande figuur geldt voor de top van de mast; naar beneden toe wordt de energiedichtheid steeds minder, doordat de valhoogte afneemt. Zo levert een kilogram staal op halve hoogte van de mast slechts de helft van de impactenergie als een kilogram staal aan de top van de mast (volgens $m \cdot g \cdot h$). Hierdoor neemt ook de kritische afstand af ten opzichte van onderstaande figuur.



Figuur 23: Energieflux als functie van de afstand voor mast, met de verwachte kritische energiehoeveelheden voor de verschillende kabeltypen (bovenrand grijze balk voor UGD en XPLE en onderrand voor SCFF en PILC)

De kritische afstanden voor de mast wordt eveneens uit de figuur afgelezen. Deze betreffen voor de voorbeeld windturbines de volgende waarden:

Tabel 4: Afgelezen kritische afstanden per type ondergrondse elektriciteitskabel

| | Mastbreuk | | |
|--|-----------|-------|------|
| | 3MW | 3,6MW | 5MW |
| Self Contained Fluid Filled cables (SCFF) | 12 m | 13 m | 25 m |
| Paper Insulated Lead Covered cables (PILC) | 12 m | 13 m | 25 m |
| Gas insulated cables (UGD) | 5 m | 6 m | 10 m |
| XLPE insulated cables | 5 m | 6 m | 10 m |

Opgemerkt wordt dat bovenstaande benadering een best professional guess betreft. Er zijn geen wetenschappelijke bronnen beschikbaar om na te gaan welke energieflex op een kabel toelaatbaar is en welke niet. Een fysisch model is tevens niet voorhanden (hierbij is het samenspel van de verschillende materialen in een kabel een belangrijk ontbrekend onderdeel). Bij gebrek aan een grondig onderzocht fysisch model wordt voor kansrekening de bovenstaande methodiek aanbevolen. Echter, ten behoeve van het opstellen van wettelijke richtlijnen, wordt aanbevolen de consequenties van deze methodiek eerst nader te onderzoeken.

8.2 Mastbreuk

Voor mastbreuk kan dezelfde methodiek gevolgd worden als voor bladbreuk. Deze methodiek is beschreven in paragraaf 8.1.

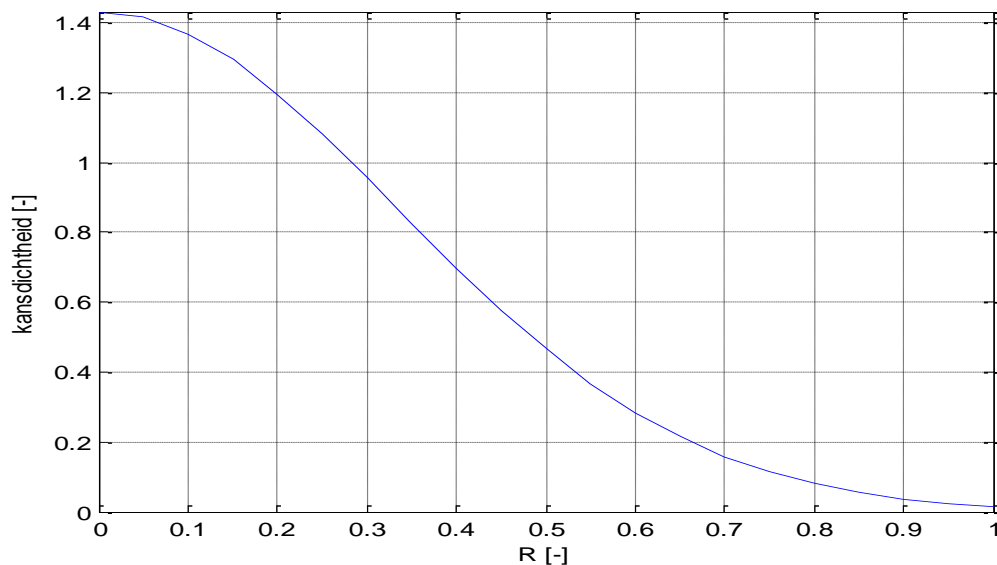
8.3 Gondel en/of rotorafworp

Voor mastbreuk en en gondel/rotorafworp kan dezelfde methodiek gevolgd worden als voor bladbreuk. Deze methodiek is beschreven in paragraaf 8.1.

Om het scenario van gondel en/of rotorafworp in een risicoanalyse mee te kunnen nemen, dient een kansdichtheidsverdeling van de trefkanslocatie bekend te zijn. Er is echter onvoldoende casuïstiek bekend om een verdeling af te kunnen leiden van incidenten. Wel kunnen er foto's van dergelijke incidenten gevonden worden, waarop te zien is dat de gondel of rotor direct naast de mast is neergekomen. Vanwege de massa van de gondel en rotor is het ook zeer aannemelijk dat deze niet ver van de voet van de windturbine valt. In het Handboek komt naar voren dat het effectgebied van het vallen van de gondel/rotor gelijk is aan de bladlengte (halve rotordiameter). In het voorliggende rapport wordt eveneens van dit effectgebied uitgegaan.

De meest voor de hand liggende keuze voor de verdeling is de normaalverdeling. Hiervan is de eigenschap dat de kans dat de gondel/rotor op een bepaalde afstand terecht komt groter wordt naarmate men dichterbij de voet van de windturbine komt (nog zonder rekening te houden met het bijbehorende oppervlak). Voor deze verdeling dient de parameter σ gekozen te worden die aangeeft hoe snel de kans afneemt als functie van de afstand tot de mast. Een kleinere σ betekent een lagere kans dat de gondel/rotor ver van de mast neerkomt. Om de kans geleidelijk tot aan de effectafstand te laten afnemen tot ongeveer nul, wordt voorgesteld uit te gaan dat 3σ gelijk is aan de bladlengte. Hierdoor neemt enerzijds de kans niet te snel af voor locaties die verder van de voet van de windturbine verwijderd zijn en anderzijds is de kans dat de gondel/rotor, op basis van deze verdeling, buiten de effectafstand terecht komt voldoende klein (minder dan 1%) zodat deze verwaarloosd kan worden. Buiten de effectafstand van een bladlengte wordt voortaan dan ook de kans afgeknapt op nul.

De normaalverdeling is toegepast op de ruimtelijke situatie. De kans dat de gondel/rotor op een bepaalde afstand van de voet van de windturbine terechtkomt, is in de volgende figuur weergegeven. Hierbij is de afstand geschaald naar de bladlengte. Op de y-as staat nu een kansdichtheid die dimensieloos is (het oppervlak van het effectgebied is in de geschaalde grafiek eveneens 1, zonder eenheid). Om de kans per vierkante meter te vinden dient de gevonden kansdichtheid nog gedeeld te worden door de bladlengte in het kwadraat.



Figuur 24: Kansdichtheidsverdeling van de val van de gondel/rotor

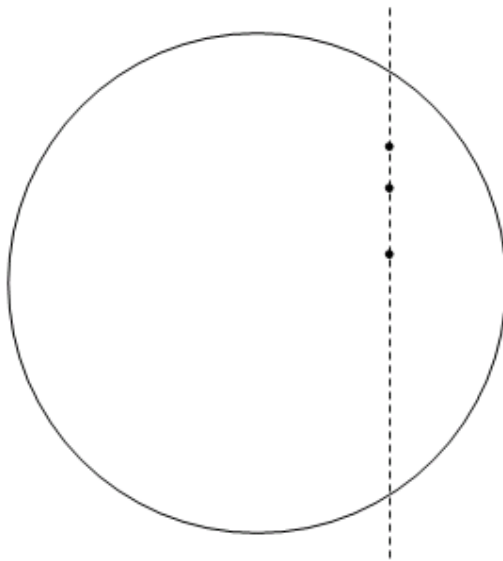
Rekenvoorbeeld

Ter verduidelijking volgt een voorbeeld. Een windturbine heeft een bladlengte van 40m. De kansdichtheid op 16 meter afstand kan uit de grafiek worden afgelezen bij $R = 16/40 = 0,4$ en betreft circa 0,7. Om de kans per vierkante meter te vinden dient dit getal nog gedeeld te worden door de bladlengte in het kwadraat, zijnde de straal van de cirkel waarbinnen de gondel of rotor terecht kan komen. Hieruit volgt dat de kans dat het massamiddelpunt van de gondel/rotor op een bepaalde plek

op een afstand van 16 meter van de voet van de windturbine valt, gelijk is aan $0,7 / (40 \text{ m})^2 = 4,4 \cdot 10^{-4} / \text{m}^2$.

Voor toepassing in een kwantitatieve risicoanalyse dient bovenstaande nog vermenigvuldigd te worden met de frequentie van het afvallen van de gondel/rotor, om tot een frequentie per vierkante meter per jaar te komen.

8.4 Rekenvoorbeeld ondergrondse leiding



Figuur 25: Schematisch bovenaanzicht van de voorbeeldberekening: een gasleiding doorkruist het effectgebied van de gondel, mast en blad van een windturbine. De gasleiding wordt gerepresenteerd door een reeks x en y coördinaten en bijbehorende dekking, waarvan drie opvolgende sets coördinaten in de figuur met stippen zijn weergegeven

Beschouw bovenstaand bovenaanzicht van het effectgebied rondom een windturbine. De cirkel representeert het effectgebied van de gondel, welke de kleinste effectafstand heeft van gondel, mast en afworp van het blad (dus zowel mast, gondel als bladafworp zal in dit voorbeeld bijdragen aan het falen van de gasleiding). Gestippeld is het tracé van de gasleiding. Voor het middelste punt zullen de bijdragen van gondel, mast en blad worden bepaald.

In dit voorbeeld wordt uitgegaan van een windturbine met mast met hoogte 90m van 160 ton, een gondel van 50 ton en een blad met lengte 45m van 7 ton en een nominaal toerental van 18 rpm (omwentelingen per minuut). Voor de pijpleiding wordt uitgegaan van een diameter van 900mm, wanddikte 14mm, inwendige druk 6,6 MPa, elasticiteit 210 GPa, SMYS 414 MPa en een diepteligging van 1,3m.

Leidinggegevens worden doorgaans opgeslagen in tabelvorm, waarbij x en y coördinaten, diepteligging, druk en materiaalspecificaties zoals de SMYS, wanddikte en diameter van de leiding staan vermeld. In dit voorbeeld zijn drie opeenvolgende coördinaten weergegeven. Elk x,y punt van de leiding vertegenwoordigt een stukje leidinglengte, welke wordt bepaald door de halve afstand tot beide naburige punten. Op deze manier is de representatieve lengte van het middelste punt in Figuur 25 mee ingetekend. Voor dit voorbeeld wordt uitgegaan van x,y-coördinaten van (0,0) voor de plaats van de windturbine en (20,17), (20,20) en (20,22) voor de opeenvolgende punten. De onderlinge afstanden van deze punten zijn dus respectievelijk 3 en 2 meter. Het middelste punt vertegenwoordigt daarmee effectief een segmentlengte van 2,5 meter. Deze berekening moet worden herhaald voor die sectie van de buis die binnen het invloedgebied van de turbine ligt. \

8.4.1 Turbineblad

Uit de specificaties van het turbineblad en de leidingparameters kunnen de volgende waarden van de toelaatbare stress en de schokgolffenergieën worden bepaald:

$$\sigma_{toelaatbaar} = SMYS - \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} = 414 \cdot 10^6 - \frac{6,6 \cdot 10^6 \cdot 900}{2 \cdot 14} = 202 \text{ MPa}$$

$$E_{schok, nom} = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{4} \cdot m \cdot v^2 = 7000 \cdot 9,81 \cdot 90 + \frac{1}{4} \cdot 7000 + \left(\frac{18}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{45}{3} \right)^2 = 7,6 \text{ MJ}$$

$$E_{schok, 2 \cdot nom} = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{4} \cdot m \cdot v^2 = 7000 \cdot 9,81 \cdot 90 + \frac{1}{4} \cdot 7000 + \left(\frac{36}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{45}{3} \right)^2 = 11,8 \text{ MJ}$$

Met deze waarden kan de formule voor de kritische afstand worden ingevuld:

$$R_{nom} = 0,3048 \cdot \left(\frac{4,44 \cdot 210 \cdot 10^9}{202 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,925}} \cdot \left(\frac{2,03 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 7,6 \cdot 10^6}{\sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 14}} \right)^{\frac{1}{2,5}} = 1,48 \text{ m}$$

$$R_{2 \cdot nom} = 0,3048 \cdot \left(\frac{4,44 \cdot 210 \cdot 10^9}{202 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,925}} \cdot \left(\frac{2,03 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 11,8 \cdot 10^6}{\sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 14}} \right)^{\frac{1}{2,5}} = 1,76 \text{ m}$$

Omdat de leiding op 1,3 m diepte ligt is de breedte van de kritische strook ten aanzien van het blad $2 \cdot \sqrt{1,48^2 - 1,3^2} = 1,41 \text{ m}$ respectievelijk $2 \cdot \sqrt{1,76^2 - 1,3^2} = 2,37 \text{ m}$.

Voor het nominale toerental betreft de kansdichtheid op 28 meter (afstand tussen (0,0) en (20,20)) afstand ca. $3 \cdot 10^{-5} / \text{m}^2$, zie Figuur 14 (kansdichtheidsverdeling) Voor 2 x nominaal toerental betreft het ca. $2,5 \cdot 10^{-5} / \text{m}^2$.

De bijdrage van het turbineblad aan de faalfrequentie van dit punt van de leiding betreft per toerentalsituatie de vermenigvuldiging van de lengte van het leidingsegment, de breedte van de kritische strook, de kans afgelezen uit de kansdichtheidsverdeling en de faalfrequentie:

Bijdrage faalfrequentie nom. toerental = $2,5\text{m} * 1,41\text{m} * 3 \cdot 10^{-5}/\text{m}^2 * 8,4 \cdot 10^{-4}/\text{jaar} = 8,9 \cdot 10^{-8}/\text{jaar}$

Bijdrage faalfrequentie 2xnom toerental = $2,5\text{m} * 2,37\text{m} * 2,5 \cdot 10^{-5}/\text{m}^2 * 5,0 \cdot 10^{-6}/\text{jaar} = 7,4 \cdot 10^{-10}/\text{jaar}$

De autonome faalfrequentie (dus zonder invloed van buiten) van een gasleiding met deze parameters betreft circa (afhankelijk van de exploitant) $1 \cdot 10^{-9}/\text{m}/\text{jaar}$. Voor het beschouwde leidingstukje van 2,5 m is de toename van de faalfrequentie door de windturbine in dit voorbeeld dus significant. Dit is niet verwonderlijk omdat in dit voorbeeld het beschouwde punt van de leiding vrijwel onder de windturbine ligt en zich niet diep in de aarde bevindt.

8.4.2 Mastbreuk

Met betrekking tot het scenario van de mastbreuk wordt zowel naar de gondel als naar de massaverdeling van de mast zelf gekeken. Dit zijn twee aspecten die beide beschouwd dienen te worden.

Uit bovenstaande gondel- en leidingparameters volgen een kritische afstand van 2,99 m ten aanzien van de gondel. Omdat de leiding op 1,3 m diepte ligt is de breedte van de kritische strook ten aanzien van de gondel 5,39 m. In het mastbreuk scenario valt de gondel op een mastlengte afstand van de windturbine; in dit geval op 90 m. Het leidingpunt dat beschouwd wordt ligt op 28.3 m afstand en kan dus niet worden getroffen door de gondel.

Ten aanzien van de mast zelf kan de formule uit paragraaf 8.2 worden gebruikt, maar nu met de empirische coëfficiënten voor een lijnbron. Met de aanname dat de massa van de mast uniform verdeeld is over de hoogte, volgt een kritische afstand van 0,39 m. Deze afstand is kleiner dan de diepteligging van de leiding. Hierdoor ligt de leiding veilig voor dit scenario en is de bijdrage van de mast aan de faalkans voor het beschouwde punt eveneens nul.

8.4.3 Gondel en rotorafworp

Zoals bij mastbreuk aan de orde is gekomen is de breedte van de kritische strook van de gondel 5,39 m. In paragraaf 8.3 is de kansdichtheidsverdeling van de gondel weergegeven. Deze kansdichtheid is geschaald ten opzichte van de bladlengte van de windturbine. Voor het beschouwde leidingpunt is de afstand tot de locatie van de windturbine 28 m, wat overeenkomt met $28/45 \approx 0,63$ bladlengte. Uit Figuur 24 (kansdichtheidsverdeling) blijkt dat de kans dat het middelpunt van de gondel op $0,63 \cdot$ bladlengte terechtkomt gelijk is aan $0,23 / 452 = 1,14 \cdot 10^{-4}/\text{m}^2$.

De bijdrage van de gondel aan de faalfrequentie van dit punt van de leiding betreft nu de vermenigvuldiging van de representatieve lengte, de breedte van de kritische strook, de kansdichtheidsverdeling en de faalfrequentie:

Bijdrage faalfrequentie door gondel = $2,5 \text{ m} * 5,39 \text{ m} * 1,14 \cdot 10^{-4}/\text{m}^2 * 4,0 \cdot 10^{-5}/\text{jaar} = 6,1 \cdot 10^{-8}/\text{jaar}$

Samenvattend zijn voor het voorbeeld de bijdrages van de turbine weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Samenvatting van additionele faalfrequenties

| Additionele faalfrequenties voorbeeldberekening per jaar | | |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| | <i>Faalfrequentie component (p95)</i> | <i>Bijdrage aan leidingsegment</i> |
| Bladbreuk | 8,4E-04 | 9.0E-8 |
| <i>normaal bedrijf</i> | <i>8,4E-04</i> | <i>8.9E-8</i> |
| <i>tijdens overtoeren</i> | <i>5,0E-06</i> | <i>7.4E-10</i> |
| Mastbreuk | 1.3E-04 | 0 |
| Afvallen van gondel en/of rotor | 4.0E-05 | 6.1E-8 |

BIJLAGE D

Risicocriteria

Versie 3.0, december 2012
Bewerkt door DNV KEMA

Versie 2.0, januari 2005
Bewerkt door H. Braam (ECN)

Auteursversie 1.0, mei 2002:
L. Rademarkers, H. Braam (ECN)
H. Brinkman (NRG)
K. Ham (TNO-Mep)

INHOUD

| | Pagina |
|---------|--|
| 1 | Inleiding.....3 |
| 1.1 | Directe Risico's.....4 |
| 1.2 | Indirecte Risico's5 |
| 2 | Criteria externe veiligheid inrichtingen8 |
| 2.1 | Inleiding.....8 |
| 2.2 | Plaatsgebonden risico (PR) en Groepsrisico (GR).....9 |
| 2.2.1 | Toelichting op PR.....9 |
| 2.2.2 | Toelichting op Groepsrisico (GR)9 |
| 2.2.2.1 | Groepsrisico voor Inrichtingen10 |
| 2.2.2.2 | Groepsrisico voor Transportroutes10 |
| 2.2.3 | Kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten11 |
| 2.3 | Interpretatie voor Windturbines.....12 |
| 2.3.1 | Omvang Inrichting bij een Windturbinepark.....12 |
| 2.4 | Toetsingscriteria voor Windturbines.....12 |
| 2.4.1 | Plaatsgebonden risico volgens het Activiteitenbesluit.....13 |
| 2.4.2 | Groepsrisico14 |
| 3 | Risiconormering volgens ProRail en Rijkswaterstaat.....15 |
| 3.1 | Aanleiding.....15 |
| 3.2 | Veiligheidsfilosofie en Criteria.....16 |
| 3.2.1 | Individueel Passanten Risico16 |
| 3.2.2 | Maatschappelijke Risico17 |
| 3.2.3 | Beslisregel.....18 |
| 3.3 | Beleidsregel voor het Plaatsen van Windturbines op, in of over Rijkswaterstaatswerken20 |
| 4 | Indirecte risico's29 |
| 4.1 | Niet-categoriale inrichtingen30 |
| 4.2 | Categoriale Inrichtingen31 |
| 4.3 | Vervoer Gevaarlijke Stoffen32 |
| 4.4 | Generieke Databases.....32 |
| 5 | Referenties34 |

1 INLEIDING

Deze Bijlage geeft de actuele wetgeving weer ten aanzien van publieke veiligheid van windturbines.

Windturbines vormen een risico voor hun omgeving door afbreken van onderdelen (bijvoorbeeld bladen), ijsafwerping of het omvallen van de gehele constructie. Het is dus van belang om er voor te zorgen dat deze risico's beneden een acceptabel niveau liggen. Onderscheid kan worden gemaakt tussen *directe risico's* en *indirecte risico's*. Directe risico's ontstaan doordat een omwonende of passant wordt getroffen. Indirecte risico's ontstaan doordat een nabijgelegen bedrijf met gevaarlijke stoffen wordt getroffen. In dit geval kan bijvoorbeeld een opslagtank beschadigd raken die op zijn beurt weer een risico voor de omgeving veroorzaakt¹. In alle gevallen geldt dat het risico wordt bepaald door de kans dat iets of iemand door een onderdeel wordt getroffen en de gevolgen van dit treffen.

Een risicoanalyse heeft tot doel om vast te stellen of een windturbine een risico vormt voor zijn omgeving en indien dit het geval is, vervolgens na te gaan of dit risico toelaatbaar is. Een risicoanalyse kan dan ook opgedeeld worden in twee onderdelen:

1. Het kwantificeren van de aanwezige risico's;
2. Het toetsen van de aanwezige risico's aan criteria vastgelegd in wetgeving, normen, codes, et cetera.

In deze bijlage wordt uiteengezet welke criteria van toepassing zijn voor windturbines en op welke wijze deze moeten worden geïnterpreteerd. Waar nodig:

- worden de risicocriteria toegelicht;
- wordt een onderbouwing gegeven waarom bepaalde criteria van toepassing zijn; en
- op welke manier aan de criteria getoetst kan worden.

(Voor het kwantificeren van de risico's wordt verwezen naar de Bijlagen A, B en C.)

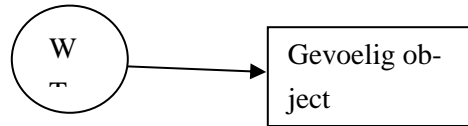
Voor wat betreft het formele toetsingskader door de vergunningverlener onderscheidt het Handboek vier situaties. Twee situaties waarbij sprake is van directe risico's (er kunnen slachtoffers ontstaan, doordat windturbineonderdelen personen treffen) en twee waarbij sprake is van indirecte risico's, ook wel het domino effect genoemd.

¹ Dit wordt ook wel domino-effect genoemd

1.1 Directe Risico's

Directe risico's zijn van toepassing op de situaties I en II.

I. Windturbine in de nabijheid van een gevoelig object: direct risico voor object



De windturbine kan in deze situatie een direct risico opleveren voor het gevoelige object, bijvoorbeeld een woonwijk.

Voor de toetsing van het risico voor gevoelige objecten wordt gebruik gemaakt van de criteria voor het Plaatsgebonden Risico (PR) zoals gedefinieerd in het Activiteitenbesluit en het Groepsrisico (GR), zoals gedefinieerd in “*Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen*” (BEVI) [1,2]. In tegenstelling tot het Activiteitenbesluit wordt in het BEVI namelijk wel rekening gehouden met het groepsrisico. Dit besluit is van toepassing op vergunningplichtige (op grond van de wet milieubeheer) risicovolle bedrijven (inrichtingen) en de nabijgelegen gevoelige objecten. De gevoelige objecten worden verdeeld in beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten. Deze verdeling is gemaakt om bepaalde groepen mensen in het bijzonder te beschermen. In beginsel is BEVI opgesteld voor bedrijven in Nederland die werken met gevaarlijke stoffen. Windturbines vallen formeel niet onder dit besluit.

Hoewel windturbines niet onder het besluit vallen is de strekking van het besluit zodanig dat deze ook geïnterpreteerd *kan* worden voor windturbines. In Hoofdstuk 3 van deze bijlage wordt de achtergrond van het besluit externe veiligheid inrichtingen met de gedefinieerde criteria voor het PR en GR toegelicht. Tevens is uiteengezet op welke wijze de criteria geïnterpreteerd en gehanteerd kunnen worden indien het risico van windturbines moet worden beschouwd.

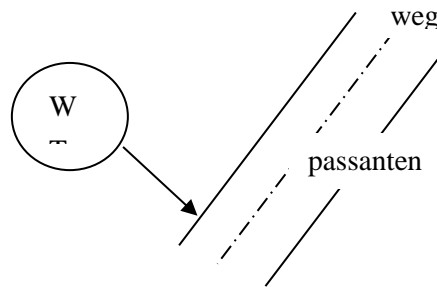
In Activiteitenbesluit is opgenomen dat kwetsbare objecten buiten de PR 10-6 contour moeten blijven en dat beperkt kwetsbare objecten buiten de 10-5 moeten zijn gelegen. De definities voor kwetsbare en beperkt kwetsbare zijn gepubliceerd in BEVI

Kenmerk van het besluit is dat met name het risico dat optreedt in kwetsbare en minder kwetsbare bestemmingen als gevolg van de risicobron, aan de risiconormen wordt getoetst. Tot de kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten behoren geen wegen of andere transportroutes. Het besluit geldt niet voor aangewezen bedrijventerreinen. Voor aangewezen industrieterreinen is bepaald dat activiteiten met een verhoogd risico in sommige gevallen kunnen plaatsvinden.

Personen die direct door turbineonderdelen kunnen worden getroffen, kunnen in beginsel worden getoetst aan de normen die zijn vastgelegd in het Activiteitenbesluit.

In Hoofdstuk 2 worden de geldende criteria nader toegelicht.

II. Windturbine in de nabijheid van een weg, spoorweg of vaarweg: direct risico voor passanten



Windturbines kunnen een direct risico opleveren voor passanten over de weg. Zoals reeds beschreven in situatie I behoren wegen, vaarwegen en spoorwegen niet tot kwetsbare of beperkt kwetsbare objecten. Met uitzondering van rijkswegen en spoorwegen van ProRail zijn voor wegen geen algemene externe veiligheidsnormen van toepassing.

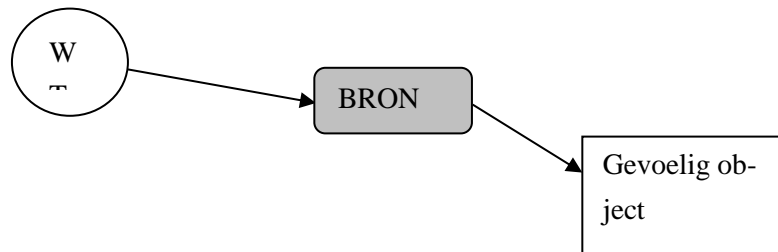
In aanvulling op het externe veiligheidsbeleid dat algemeen van toepassing is, hanteert ProRail voor het vervoer over spoorwegen interne risicocriteria voor passanten, opgesteld in [3] en [4] “*Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen – Beoordeling van veiligheidsrisico’s*”. Het betreft het individueel passanten risico, IPR, en het maatschappelijk risico, MR. Het gaat hier om een intern beleid ter bescherming van passanten op spoorwegen. Voor het vervoer over rijkswegen en rijksvaarwegen heeft het ministerie van I&M een beleidsregel opgesteld, gebaseerd op het IPR en het MR [7]. Deze beleidsregel is niet algemeen voor alle wegen van toepassing. In beginsel kan elk bevoegd gezag aanvullende eisen stellen met betrekking tot de hoogte van het risico. Logischerwijs zouden voor verschillende typen risicobronnen evenwel dezelfde normen moeten gelden.

In Hoofdstuk 3 worden de geldende criteria ontwikkeld door ProRail/Rijkswaterstaat nader toegelicht.

1.2 Indirecte Risico’s

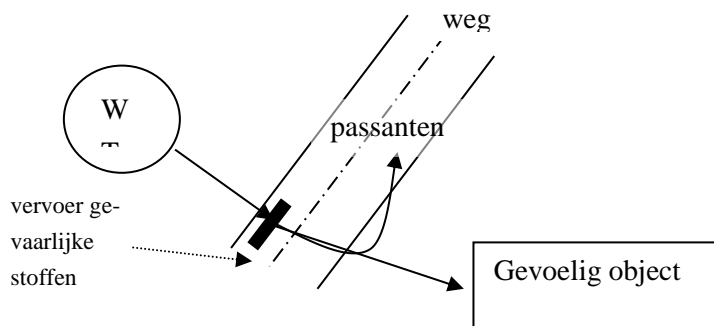
Indirecte risico’s zijn van toepassing op de situaties III en IV.

III. Windturbine in de nabijheid van een risicobron (bijvoorbeeld opslag gevaarlijke stof): indirect risico voor gevoelig object



Wanneer een windturbine wordt geplaatst in de nabijheid van een risicovolle inrichting, dan bestaat er kans op een domino effect. Het falen van de windturbine kan indirect tot slachtoffers leiden. Een onderdeel van de windturbine kan de installatie treffen en vervolgschade initiëren, bijvoorbeeld vrijkomen van toxisch of brandbaar gas, waarbij in het laatste geval nog een explosie zou kunnen optreden. Op de risicovolle inrichting zijn de risiconormen van toepassing zoals beschreven in het “*Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen*” [1,2]. Indien het risico van een inrichting wordt verhoogd door plaatsing van een windturbine, kunnen aan de plaatsing van deze windturbine, gelet op de algemene principes van de Wet algemene bepalingen omgevingsrecht (Wabo) en het “*Besluit externe veiligheid inrichtingen*” [1], eisen worden gesteld. In deze bijlage wordt aangegeven in Hoofdstuk 4 op welke wijze aan de geldende criteria getoetst kan worden.

IV. Windturbine in de nabijheid van een weg, spoorweg of vaarweg: indirect risico voor gevoelig object ten gevolge van ongeluk met vervoer gevaarlijke stoffen



Wanneer een windturbine wordt geplaatst in de nabijheid van een gevaarlijk transport, dan bestaat ook in deze situatie de kans op een domino effect. Een onderdeel van de windturbine kan bijvoorbeeld een tankauto treffen en vervolgschade initiëren. Voor vervoer gevaarlijke stoffen zijn de risiconormen van toepassing zoals beschreven in de “*Circulaire Risiconormering Vervoer Gevaarlijke Stoffen*” (nota RNVGS) [9] en de “*Handreiking Externe Veiligheid Vervoer Gevaarlijke Stoffen*” [8]. In de circulaire “*Risiconormering vervoer gevaarlijke stoffen*” [10] wordt het beleid zoals omschreven in de nota RNVGS verder geoperationaliseerd en verduidelijkt. Indien het risico van een transport wordt verhoogd door plaatsing van een windturbine, kunnen aan de plaatsing van deze windturbine, gelet op de

algemene principes van de Wet algemene bepalingen omgevingsrecht (Wabo) en het “*Besluit externe veiligheid inrichtingen*” [1], eisen worden gesteld. In deze bijlage wordt aangegeven in Hoofdstuk 4 op welke wijze aan de geldende criteria getoetst kan worden.

Economische en maatschappelijke risico's

Naast directe veiligheidsrisico's in de omgeving kunnen bij de situaties III en IV ook economische risico's (directe schade en vervolgschade) ontstaan of andere maatschappelijke belangen worden geschaad. Beheerders of eigenaren van inrichtingen of transportleidingen kunnen op grond daarvan bezwaar aantekenen bij de vergunningverleners tegen de bouw van één of meer windturbines in de nabijheid van zijn inrichting of transportleiding. Dit kan te maken hebben met kritieke bedrijfsprocessen, maar ook met leveringsplicht zoals bijv. bij waterleidingbedrijven. Bezwaren op basis van economische risico's zijn veelal gebaseerd op interne bedrijfsvoering en staan geheel los van de veiligheidsrisico's.

2 CRITERIA EXTERNE VEILIGHEID INRICHTINGEN

2.1 Inleiding

Veel bedrijven in Nederland werken met gevaarlijke stoffen, met als gevolg dat de omgeving een risico loopt. Om omwonenden van deze bedrijven, ook wel inrichtingen genoemd, zoveel mogelijk tegen ongevallen te beschermen heeft de rijksoverheid een extern veiligheidsbeleid geformuleerd en normen opgesteld waaraan de risico's van gevaarlijke activiteiten moeten worden getoetst. Voor gedetailleerde informatie over het omgaan met risico's en de plaats van externe veiligheid in vergunningverlening en ruimtelijke planning wordt verwezen naar [1,2] In de risicobenadering vanuit de rijksoverheid worden twee risicomaten gebruikt, namelijk het *plaatsgebonden risico* (PR) en het *groepsrisico* (GR).

Voor beide risicomaten zijn normen vastgesteld, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen grenswaarden en richtwaarden voor het plaatsgebonden risico en oriëntatiewaarde voor het groepsrisico. Grenswaarden mogen niet worden overschreden. Van een richtwaarde mag worden afgeweken, echter slechts om gewichtige redenen. Voor de oriëntatiewaarde van het groepsrisico geldt een verantwoordingsplicht.

Voor de berekening en de beoordeling van risico's wordt in BEVI onderscheid gemaakt tussen twee categorieën inrichtingen, niet-categoriale inrichtingen en categoriale inrichtingen. Voor niet-categoriale inrichtingen kan uitsluitend via een berekening worden bepaald welke afstand tot kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten moet worden aangehouden om aan de geldende normen te voldoen. Deze inrichtingen worden ook wel aangeduid als QRA-inrichtingen. Voor de categoriale inrichtingen is een systematiek ontwikkeld waarbij per type inrichting uit een tabel kan worden afgelezen bij welke afstand wordt voldaan aan de norm (bijvoorbeeld LPG-tankstations). Hiervoor hoeft geen QRA te worden uitgevoerd.

In het Activiteitenbesluit is aangegeven dat een risicobeoordeling in termen van PR moet worden uitgevoerd. In het Activiteitenbesluit is echter niets opgenomen over het Groepsrisico (GR), dit in tegenstelling tot het BEV, waar groepsrisico wel onderdeel van uitmaakt

In paragraaf 2.3. is beschreven op welke wijze voor het specifieke geval van een windturbine het PR en GR moeten worden berekend en beoordeeld in relatie tot de aanwezige kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten.

2.2 Plaatsgebonden risico (PR) en Groepsrisico (GR)

2.2.1 Toelichting op PR

Het Plaatsgebonden Risico (PR) is in [2] gedefinieerd als: Risico op een plaats buiten een inrichting, uitgedrukt als een kans per jaar dat een persoon die onafgebroken en onbeschermd op die plaats zou verblijven, overlijdt als een rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval binnen die inrichting.

Op een kaart kunnen plaatsen met een gelijke PR waarde door een lijn verbonden worden. Hierdoor ontstaat een risicocontour. Deze PR-contour is geheel onafhankelijk van het al dan niet feitelijk aanwezig zijn van personen rond de inrichting. Binnen de PR-contouren 10^{-5} en 10^{-6} worden door het Activiteitenbesluit eisen gesteld aan de aanwezigheid van bebouwing.

Voor kwetsbare objecten geldt een grenswaarde van $PR = 10^{-6}$ en voor beperkt kwetsbare objecten een grenswaarde van $PR = 10^{-5}$. Dit wil zeggen dat kwetsbare objecten buiten de 10^{-6} contour moeten liggen, en beperkt kwetsbare objecten buiten de 10^{-5} contour moeten liggen. In overleg met het bevoegd gezag mag hiervan worden afgeweken indien hier gewichtige redenen voor zijn. De term “nieuwe situaties” zoals hierboven genoemd wil zeggen:

- het oprichten van een installatie;
- de bouw van nieuwe (beperkt) kwetsbare objecten rond een bestaande inrichting;
- uitbreiding van een bestaande inrichting of aanpassing van de activiteiten van een bestaande inrichting.

2.2.2 Toelichting op Groepsrisico (GR)

Het Groepsrisico (GR) is in [2] gedefinieerd als: *"de cumulatieve kans per jaar dat tenminste 10, 100 of 1.000 personen overlijden als rechtstreeks gevolg van hun aanwezigheid in het invloedsgebied van een inrichting en een ongewoon voorval binnen die inrichting waarbij een gevaarlijke stof of gevaarlijke afvalstof betrokken is".*

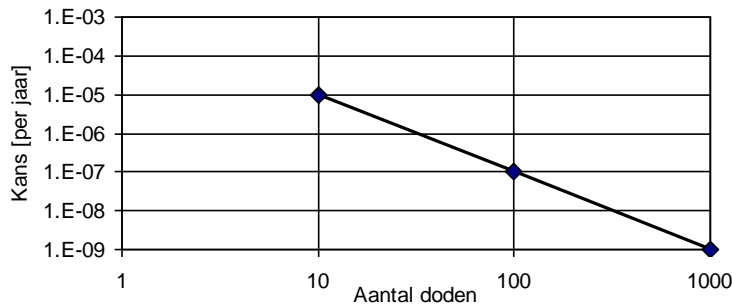
In het GR is de kans op groepen slachtoffers verwerkt. Het is gekoppeld aan de personendichtheid binnen het invloedsgebied van een ongeval met gevaarlijke stoffen. Het resultaat van een groepsrisicoberekening is een grafiek (Fn-curve) met op de horizontale as het aantal dodelijke slachtoffers en op de verticale as de cumulatieve kansen per jaar.

De toetsingswaarde voor het groepsrisico is een oriëntatiewaarde. Dit betekent dat het bevoegd gezag hiervan mag afwijken als daar gewichtige redenen (motivatiebeginsel) voor zijn. Er moet dan een politieke afweging worden gemaakt van de risico's tegen de maatschappelijke baten en kosten van

een risicovolle activiteit. Voor het invullen van de verantwoordingsplicht wordt verwezen naar de “Handreiking verantwoordingsplicht groepsrisico”.

Hoe meer mensen in de omgeving van het bedrijf, des te groter het GR. De norm voor GR is verschillend voor inrichtingen en transportroutes. Dit wordt uitgewerkt in de volgende paragrafen.

Figuur 1: Grafische weergave van de norm voor GR_I



2.2.2.1 Groepsrisico voor Inrichtingen

De toetsingswaarde voor het groepsrisico voor inrichtingen (GR-voor-inrichtingen; GR_I) [1,2] is dat een ongeval met 10 doden slechts met een kans van één op de honderdduizend per jaar mag voorkomen (10^{-5} per jaar) en een ongeval met 100 doden slechts met een kans van één op de 10 miljoen jaar (10^{-7} per jaar), etc. waarbij ook de tussenliggende aantallen slachtoffers moeten worden getoetst. De norm is grafisch weergegeven in

2.2.2.2 Groepsrisico voor Transportroutes

Voor transportroutes, waar ook ondergrondse en bovengrondse leidingen onder vallen, is de norm van groepsrisico anders dan voor inrichtingen (GR-voor-transportroutes; GR_T). Deze norm is opgesteld door de ministeries van VROM en Verkeer en Waterstaat samen [8]. (Merk op dat deze norm niet van toepassing is op de directe risico's van windturbines, maar op de indirecte risico's. De toepassing van deze norm wordt in Hoofdstuk 4 verder uitgewerkt.)

De norm voor GR-voor-transportroutes is dat een ongeval met tien doden slechts met een kans van één op de tienduizend per jaar mag voorkomen (10^{-4} per jaar) en een ongeval met 100 doden slechts met een kans van één op de miljoen jaar (10^{-6} per jaar) per kilometer transportroute.

2.2.3 Kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten

In BEVI [1,2] wordt onderscheid gemaakt tussen kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten. Het besluit geeft een opsomming van objecten die als beperkt kwetsbaar of als kwetsbaar moeten worden beschouwd, zie Tabel 1: *Kwetsbare en minder kwetsbare objecten volgens “Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen” [2]* in Tabel 1. Deze opsomming geeft het bevoegd gezag de ruimte om voor niet genoemde objecten een eigen afweging te maken. Tevens mag het bevoegd gezag een beperkt kwetsbaar object als een kwetsbaar object behandelen.

Tabel 1: *Kwetsbare en minder kwetsbare objecten volgens “Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen” [2]*
”

Beperkt kwetsbaar object:

- a 1°. verspreid liggende woningen van derden met een dichtheid van maximaal twee woningen per hectare, en
2°. dienst- en bedrijfswoningen van derden
- b kantoorgebouwen, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen
- c hotels en restaurants, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen
- d winkels, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen
- e sporthallen, zwembaden en speeltuinen
- f sport- en kampeerterreinen en terreinen bestemd voor recreatieve doeleinden, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder d, vallen
- g bedrijfsgebouwen, voorzover zij niet onder onderdeel m, onder c, vallen
- h objecten die met de onder a tot en met e en g genoemde gelijkgesteld kunnen worden uit hoofde van de gemiddelde tijd per dag gedurende welke personen daar verblijven, het aantal personen dat daarin doorgaans aanwezig is en de mogelijkheden voor zelfredzaamheid bij een ongeval, voorzover die objecten geen kwetsbare objecten zijn, en
- i objecten met een hoge infrastructurele waarde, zoals een telefoon- of elektriciteitscentrale of een gebouw met vluchtleidingsapparatuur, voorzover die objecten wegens de aard van de gevaarlijke stoffen die bij een ongeval kunnen vrijkomen, bescherming verdienen tegen de gevolgen van dat ongeval.

Kwetsbaar object

- a woningen, niet zijnde woningen als bedoeld in onderdeel a, onder a
- b gebouwen bestemd voor het verblijf, al dan niet gedurende een gedeelte van de dag, van minderjarigen, ouderen, zieken of gehandicapten, zoals:
 - 1°. ziekenhuizen, bejaardenhuizen en verpleeghuizen
 - 2°. scholen, of
 - 3°. gebouwen of gedeelten daarvan, bestemd voor dagopvang van minderjarigen

- c gebouwen waarin doorgaans grote aantallen personen gedurende een groot gedeelte van de dag aanwezig zijn, zoals:
 - 1°. kantoorgebouwen en hotels met een bruto vloeroppervlak van meer dan 1500 m² per object, of
 - 2°. complexen waarin meer dan 5 winkels zijn gevestigd en waarvan het gezamenlijk bruto vloeroppervlak meer dan 1000 m² bedraagt en winkels met een totaal bruto vloeroppervlak van meer dan 2000 m² per winkel, voorzover in die complexen of in die winkels een supermarkt, hypermarkt of warenhuis is gevestigd, en
- d kampeer- en andere recreatieterreinen bestemd voor het verblijf van meer dan 50 personen gedurende meerdere aaneengesloten dagen.

2.3 Interpretatie voor Windturbines

2.3.1 Omvang Inrichting bij een Windturbinepark.

Elke turbine vormt een potentieel risico voor zijn omgeving. Wanneer meerdere windturbines langs bijvoorbeeld wegen of in de nabijheid van bebouwing worden geplaatst neemt de kans op bladbreuk lineair toe met het aantal windturbines. Het risico voor de weg, de passanten of voor de bebouwing neemt nagenoeg lineair toe met het aantal turbines. Bij veiligheidsanalyses die bijvoorbeeld in de petrochemische industrie worden uitgevoerd worden de risico's van gevaarlijke activiteiten binnen één bedrijf gecumuleerd. De risico's van twee gelijksoortige bedrijven hoeven niet te worden gecumuleerd. Wel moet rekening worden gehouden met het "domino-effect".

Voor windturbines geldt dat de omvang van een inrichting zich moet beperken tot één park, ook als een park uit slechts één turbine bestaat. Deze aanpak is in overeenstemming met de aanpak die ook voor andere inrichtingen gangbaar is.

2.4 Toetsingscriteria voor Windturbines

In deze paragraaf zijn de risicocriteria geformuleerd die van toepassing zijn op de directe risico's van windturbines. Deze zijn gebaseerd op het *PR* en het *GR voor inrichtingen*. Wanneer windturbines worden geplaatst in de buurt van transportleidingen, kunnen de windturbines een indirect gevaar vormen voor personen. Vandaar dat de norm voor transportleidingen wordt beschouwd in Hoofdstuk 4 bij de *indirecte risico's*.

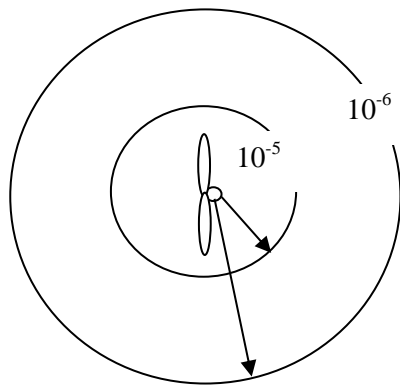
2.4.1 **Plaatsgebonden risico volgens het Activiteitenbesluit**

Het PR wordt zichtbaar gemaakt door het trekken van risicocontouren rond de inrichting, in dit geval een windturbine(park). Het PR wordt berekend conform bijlage C. Normaal gesproken neemt het risico van een inrichting af naarmate de afstand tot de inrichting groter wordt.

Voor het PR is in het Activiteitenbesluit opgenomen:

1. Het plaatsgebonden risico voor een buiten de inrichting gelegen kwetsbaar object, veroorzaakt door een windturbine of een combinatie van windturbines, is niet hoger dan 10^{-6} per jaar.
2. Het plaatsgebonden risico voor een buiten de inrichting gelegen beperkt kwetsbaar object, veroorzaakt door een windturbine of een combinatie van windturbines, is niet hoger dan 10^{-5} per jaar.

Voor een windturbine zien de contouren voor het PR er uit, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Schematische weergave van de PR-contouren

2.4.2 Groepsrisico

De gevolgen van een ongeval voor een groep is wezenlijk anders voor een ongeval met gevaarlijke stoffen dan met een ongeval met een windturbine. Bij een ongeval met gevaarlijke stoffen kunnen slachtoffers vallen verspreid over een groot gebied afhankelijk van de wijze waarop de gevaarlijke stof zich verspreidt in de omgeving. Tevens zijn ook de elementen zelfredzaamheid en hulpverlening wezenlijk anders. Bij een ongeval met een windturbine zullen alleen slachtoffers vallen op de plekken waar afgebroken onderdelen van een windturbine terecht komen, hetgeen een beperkt gebied is. Om bij een ongeval met een windturbine een groep slachtoffers te krijgen moet er dus een grote personendichtheid zijn ter plaatse waar een onderdeel terecht kan komen.

In het Activiteitenbesluit is het groepsrisico niet opgenomen, in BEVI wel maar windturbines vallen niet onder BEVI en dus zal de wijze waarop het GR_I voor windturbines berekend moet worden geen onderdeel zijn van wettelijke besluitvorming.

Indien het bevoegd gezag eist dat het GR_1 berekend moet worden zal overeenstemming bereikt moeten worden op welke wijze het GR_1 berekend zal worden. Hierbij zal een keuze worden gemaakt of bij de berekening ook werknemers van het windturbinepark en verkeersdeelnemers (buiten de inrichting) moeten worden meegenomen. Uitgangspunt voor de oriëntatiewaarde voor het GR_1 is dat ongeval met tien doden slechts met een kans van één op de honderdduizend per jaar mag voorkomen, een ongeval met honderd doden met een kans van één op de tien miljoen per jaar etc. Deze oriëntatiewaarde is grafisch weergegeven in . De berekening van het GR_1 gebeurt met behulp van een kwantitatieve risicoanalyse.

3 RISICONORMERING VOLGENS PRORAIL EN RIJKSWATER-STAAT

Zowel ProRail als Rijkswaterstaat hanteren IPR en be beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken die is opgenomen in paragraaf 3.3.

3.1 Aanleiding

In 1998 is op initiatief van NS Railinfrabeheer en Rijkswaterstaat Directie Zuid-Holland de werkgroep Windenergie opgericht met als doel te komen tot een richtlijn voor het beoordelen van de veiligheidsrisico's van windturbines langs auto-, spoor-, en vaarwegen. De aanleiding hiervoor was dat beide partijen steeds vaker werden benaderd met aanvragen voor plaatsing van windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen, of langs dijken, deltadammen, sluiscomplexen en strekdammen. Het beheersen van de veiligheidsrisico's voor passanten is een aspect waarmee rekening moet worden gehouden bij de beoordeling van deze aanvragen. Deze werkgroep heeft een veiligheidsfilosofie uitgewerkt voor het plaatsen van windturbines vanuit het oogpunt van bladbreuk² [3]. Op basis van deze veiligheidsfilosofie zijn normen opgesteld die zijn verwerkt in een beslisregel. De op deze veiligheidsfilosofie gebaseerde normen en beslisregel zijn samengevat in paragraaf 3.2.

Bij ProRail is deze richtlijn omgezet in beleid en wordt als uitgangspunt gebruikt bij de beoordeling van de risico's van windturbines in de buurt van spoorlijnen.

² Voortschrijdend inzicht heeft ertoe geleid dat naast bladbreuk ook de ongevallenscenario's mastbreuk en afvallen van gehele gondel (zie Bijlage A) moeten worden beschouwd. Vandaar dat deze veiligheidsfilosofie en de daarmee samenhangende normen en beslisregel moeten worden gebaseerd op alle relevante ongevallen scenario's.

Mede op basis van bovengenoemde richtlijn heeft het ministerie van Verkeer en Waterstaat Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat de beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken opgesteld [7]. Deze beleidsregel dient ertoe de aanvragers inzicht te geven in de afwegingen die RWS maakt alvorens al dan niet vergunning te verlenen en in enkele voorschriften die daaraan in elk geval worden verbonden. Het voldoen aan hetgeen in deze beleidsregel is bepaald leidt echter niet automatisch ook tot vergunningverlening. Bijzondere en specifieke lokale situaties kunnen RWS doen besluiten niet tot vergunningverlening over te gaan. Uiteraard brengt dit extra motiveringsvereisten met zich mee.

De beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken is opgenomen in paragraaf 3.3.

3.2 Veiligheidsfilosofie en Criteria

In [3] wordt een veiligheidsfilosofie beschreven voor het plaatsen van windturbines vanuit het oogpunt van rotorbladbreuk². Op basis van deze filosofie zijn een tweetal risicomaten geformuleerd, namelijk het *Individueel Passanten Risico (IPR)* en het *Maatschappelijk Risico (MR)* en is een beslisregel opgesteld.

Het IPR is een risicomaat voor de individuele beleving van een passant, namelijk de overlijdenskans per passant per jaar. Het MR is een maat voor het verwachte aantal doden per jaar en is een risicomaat voor de maatschappelijke beleving.

3.2.1 Individueel Passanten Risico

Voor de passant is een risicomaat gekozen die aansluit bij de individuele beleving van de passant, namelijk de overlijdenskans per passant per jaar. Hierbij wordt de passant gevolgd gedurende zijn bezigheden in de nabijheid van het windturbinepark. Dit zogenaamde *Individueel Passanten Risico (IPR)* houdt dus rekening met de *aanwezigheidsfractie* van de passant; dit is de procentuele verblijfsduur in de “gevaarlijke” omgeving gedurende een jaar. Een aanwezigheidsfractie van 0,01 betekent dat een passant zich elk jaar 1% van de tijd binnen de effectafstand van de risicobron bevindt. Aangezien de kans om getroffen te worden door een afgebroken onderdeel of omvallende windturbine varieert met de afstand tot de windturbine, is het IPR gelijk aan de som van alle producten van:

- de aanwezigheidsfractie $P_{a,i}$ van een passant nabij de windturbine in het gebied op afstand r_i met trefkans $P_{T,i}$;
- de kans om getroffen te worden door een rotorblad ($P_{T,i}$); en
- de kans om te overlijden ($P_{D|T}$) aan de gevolgen van een klap met een rotorblad.

In formulevorm: $IPR = \sum P_{a,i} \cdot P_{T,i} \cdot P_{D|T}$.

Indien wordt aangenomen dat iedere klap dodelijk is (een veilige aanname), geldt dat $P_{D|T} = 1$ en dus $IPR = \sum P_{a,i} \cdot P_{T,i}$. Indien de passant zich met snelheid nul langs de windturbine begeeft geldt $P_{a,i} = 1$ en convergeert het IPR-concept naar de situatie waarbij de passant zich continu en onbeschermd in het effectgebied van de windturbine bevindt. De uitkomst van de berekende IPR en het *Plaatsgebonden risico* (PR), uit het externe veiligheidsbeleid vallen dan samen.

De voorgestelde risicomaat IPR is dus in overeenstemming met het externe veiligheidsbeleid van VROM en V&W. Samenvattend, geldt dus:

| |
|---|
| Risicomaat IPR = \sum (Trefkans – Aanwezigheidsfractie per passant) |
|---|

Merk op dat het hoogste IPR wordt bepaald door de passant met de hoogste verblijfstijd. De verblijfstijd is een combinatie van het aantal passages en de passeersnelheid. In Bijlage C is uitgezet op welke wijze het risico voor passanten moet worden berekend.

Maximaal toelaatbaar Individueel Passanten Risico (IPR)

Het maximaal toelaatbare Individueel Passanten Risico is afhankelijk van *de toegestane snelheid op de infrastructuur*. De reden hiervoor is dat op sommige spoorwegen hoge snelheden worden voorgenomen of al zijn toegestaan.

De initiatiefnemer die een of meerdere windturbines wil plaatsen dient aan te tonen dat het maximale toelaatbare Individueel Passanten Risico IPR_m niet wordt overschreden op de infrastructuur in de nabijheid van de turbine. Een generiek IPR_m van 10^{-6} wordt aangehouden voor alle infrastructuur waarop de wettelijk toelaatbare snelheden de honderdzesig kilometer per uur niet overschrijden, en een generiek IPR_m van 10^{-7} op infrastructuur waarop wettelijk toelaatbare snelheden boven de honderdzesig kilometer per uur bestaan.

3.2.2 Maatschappelijke Risico

De maatschappij is geïnteresseerd in het jaarlijks aantal slachtoffers ten gevolge van een windturbinepark dat in bedrijf is. Onderscheid wordt gemaakt naar de mate van vrijwilligheid en het persoonlijk voordeel. Daarnaast speelt de omvang van de ongevallen een rol.

Er zijn verschillende maten te kiezen voor het maatschappelijk risico. In het externe-veiligheidsbeleid voor stationaire installaties of vervoersactiviteiten wordt uitgegaan van *groepsrisicocurven* of *FN-curven*. Groepsrisicocurves hebben alleen betekenis voor “kleine-kans-groot-gevolg”-ongevallen met slachtofferaantallen groter dan 10 per ongeval. Uit studies is gebleken dat bij windturbineparken in de nabijheid van rijkswegen altijd ruimschoots aan de groepsrisiconorm wordt voldaan. Ontsporingrisico's zijn in deze studies niet meegenomen. In dit kader is het MR de verwachtingswaarde van het aantal doden per jaar een goede risicomaat.

Risicomaat MR = gemiddeld aantal doden per passage x aantal passages per jaar

Dit is gelijk aan het verwachte aantal dodelijke slachtoffers per jaar per windturbine(park). Een individuele passant kan meerdere keren per dag langskomen. Het *gemiddeld aantal doden per passage* is gelijk aan het quotiënt van het *IPR* en het *aantal passages per passant per jaar*.

Dus geldt dat:

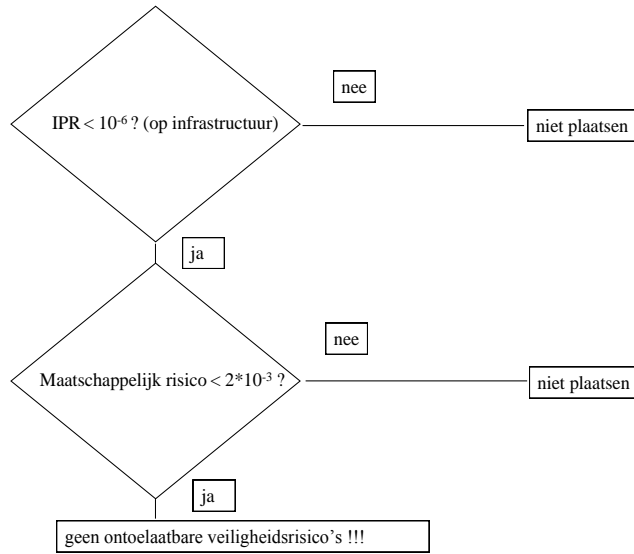
Risicomaat MR = (IPR/ aantal passages per passant per jaar) x aantal passages per jaar

Maximaal toelaatbaar Maatschappelijk Risico

Uit de definitie van het groepsrisico [1,2] kan worden afgeleid dat door VROM per industriële installatie een maximaal aanvaardbaar risiconiveau wordt aangehouden van $2 \cdot 10^{-3}$ doden per jaar. Dus een maximaal toelaatbaar maatschappelijk risico van $2 \cdot 10^{-3}$ doden per jaar per windturbinepark sluit aan bij het externe veiligheidsbeleid bij VROM. Deze waarde wordt door de werkgroep aangehouden.

3.2.3 Beslisregel

De beslisregel om te beoordelen of plaatsen van een windturbine toelaatbaar is vanuit het oogpunt “veiligheidsrisico's bij rotorbladbreek” staat in Figuur 3.



Figuur 3: Beslisregel wel of niet plaatsen van een windturbine(park)

3.3 **Beleidsregel voor het Plaatsen van Windturbines op, in of over Rijkswaterstaatswerken**

De Minister van Verkeer en Waterstaat,
Gelet op de artikelen 2 en 3 van de Wet beheer rijkswaterstaatswerken en artikel 4.81, eerste lid, van de Algemene wet bestuursrecht;

Besluit:

Artikel 1 Begripsomschrijvingen

In deze beleidsregel wordt verstaan onder:

- a. *territoriale zee*: de Noordzee binnen de grenzen die zijn vastgesteld in de Wet grenzen Nederlandse territoriale zee (Stb. 1985, 129);
- b. *vaarweg*: het voor de doorgaande vaart bestemde en meestal als zodanig gemarkeerde of betonde deel van het vaarwater.

Artikel 2 Reikwijdte

Deze beleidsregel is niet van toepassing op de exclusieve economische zone.

Artikel 3 Wegen

1. Langs rijkswegen wordt plaatsing van windturbines toegestaan bij een afstand van ten minste 30m uit de rand van de verharding of bij een rotordiameter groter dan 60m, ten minste de halve diameter.
2. Binnen 30m uit de rand van de verharding en op parkeerplaatsen en tankstations gelegen langs autowegen of autosnelwegen als bedoeld in het Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 artikel 1c,d met een directe aansluiting op de autoweg of autosnelweg, die primair bestemd zijn voor een kort oponthoud van de weggebruiker, wordt plaatsing van windturbines slechts toegestaan indien uit een aanvullend onderzoek blijkt dat er geen onaanvaardbaar verhoogd veiligheidsrisico bestaat.

3. In afwijking van het bepaalde in lid 1 wordt nabij een knooppunt of aansluiting of op locaties waarbij de rotorbladen zich boven de verharding zullen bevinden plaatsing van windturbines slechts toegestaan indien uit aanvullend onderzoek blijkt dat er geen onaanvaardbaar verhoogd risico is voor de verkeersveiligheid.

Artikel 4 Kanalen, rivieren en havens

1. Langs kanalen, rivieren en havens wordt plaatsing van windturbines toegestaan bij een afstand van ten minste 50m uit de rand van de vaarweg.
2. Binnen 50m uit de rand van de vaarweg wordt plaatsing slechts toegestaan indien uit aanvullend onderzoek blijkt dat er geen hinder voor wal- en scheepsradar optreedt. De minimale afstand tot de rand van de vaarweg is altijd ten minste de helft van de rotordiameter.
3. Het bepaalde onder het eerste en tweede lid laat onverlet de toepassing van de Beleidslijn ruimte voor de rivier.
4. Plaatsing mag geen visuele hinder opleveren voor het scheepvaartverkeer en bedienend personeel van kunstwerken. Het zicht op vaarwegmarkeringstekens mag niet door plaatsing van windturbines worden afgeschermd.

Artikel 5 De territoriale zee

1. Plaatsing van windturbines in het gemeentelijk ingedeelde deel van de territoriale zee wordt slechts toegestaan op locaties waarvoor geldt dat windturbines:
 - a geen negatieve invloed hebben op de veiligheid van de kust;
 - b geen negatieve morfologische ontwikkeling van de bodem veroorzaken;
 - c geen negatieve effecten op de natuurlijke dynamiek van de bodem hebben;

d niet leiden tot verweking van de bodem;
e geen negatieve invloed hebben op de kustlijn-
ligging;
f het uitvoeren van zandsuppleties en onderwa-
tersuppleties niet in onaanvaardbare mate be-
moeilijken;
g niet de veiligheid van het scheepvaartverkeer
aantasten.

2. Plaatsing van windturbines in het niet gemeen-
telijk ingedeelde deel van de territoriale zee
wordt slechts toegestaan voor zover een plan,
vastgesteld op grond van de Wet op de Ruimte-
lijke Ordening, zodanige plaatsing toelaat.

3. Voor vaarwegen in de territoriale zee is artikel
4 van overeenkomstige toepassing.

Artikel 6 Grote wateren

1. Plaatsing van windturbines wordt slechts toe-
gestaan in het IJsselmeer, het Markermeer en de
randmeren, het Haringvliet, Hollandsch Diep, de
Biesbosch, de Oosterschelde, de Westerschelde,
het Veerse meer, het Grevelingenmeer, het
Zoommeer, het Krammer-Volkerak, de Wadden-
zee, de Eems, en de Dollard op locaties waar
voldaan wordt aan het bepaalde in artikel 5, eer-
ste lid onder b, c, d, g, waar de kans op erosie
van de oever niet wordt vergroot en voor zover
windturbines geen feitelijke belemmering vor-
men voor het waterkwantiteitsbeheer.

2. Voor vaarwegen die lopen door de in het eer-
ste lid genoemde wateren, is artikel 4 van over-
eenkomstige toepassing.

Artikel 7 Primaire waterkeringen

1. Plaatsing van windturbines wordt niet toege-
staan in de kernzone van de primaire waterke-
ring. Onder kernzone wordt verstaan het eigen-
lijke dijk-, duin- of damlichaam zijnde de
primaire waterkering als bedoeld in de Wet op de
waterkering.

2. Plaatsing van windturbines buiten de kernzone
van de primaire waterkering, wordt slechts toe-
gestaan mits dit geen negatieve gevolgen heeft

voor de waterkerende functie van de primaire
waterkering conform de veiligheidsnorm van
artikel 3 van de Wet op de waterkering.

3. Het bepaalde in het eerste en tweede lid geldt
onverminderd het bepaalde in de artikelen 3, 4, 5
en 6.

Artikel 8 Termijn

1. De vergunning op grond van de Wet beheer
rijkswaterstaatswerken zal worden verleend voor
een bepaalde termijn.

2. Indien van de vergunning op grond van de
Wet beheer rijkswaterstaatwerken niet binnen
een in de vergunning bepaalde termijn gebruik
wordt gemaakt, wordt de vergunning ingetrok-
ken.

Artikel 9 Inwerkingtreding

Deze beleidsregel treedt in werking met ingang
van de tweede dag na dagtekening van de Staats-
courant waarin zij wordt geplaatst.

Artikel 10 Citeertitel

Deze beleidsregel wordt aangehaald als: Beleids-
regel voor het plaatsen van windturbines op, in
of over rijkswaterstaatswerken.

Deze beleidsregel zal met de toelichting in de
Staatscourant worden geplaatst.

De Minister van Verkeer en Waterstaat

Namens deze,

*De plv. Directeur Generaal van de Rijkswater-
staat*

drs. L.H.M. Kohsiek

Toelichting

A Algemeen

Het stimuleren en faciliteren van het gebruik van duurzame energie is een belangrijk onderdeel van het huidige regeringsbeleid. De Rijksoverheid heeft in zijn beleid de doelstelling vastgelegd om in 2020 tien procent van het totale energieverbruik te laten bestaan uit duurzame energie. Windenergie maakt hiervan deel uit. Voor het plaatsen van windturbines zijn geschikte locaties nodig. In dit kader hebben de betrokken ministeries, het IPO en de VNG een bestuursovereenkomst afgesloten. Ook Rijkswaterstaat (RWS) wordt verzocht toestemming te verlenen voor het plaatsen van windturbines op, in en over de bij het Rijk in beheer zijnde waterstaatswerken. Deze beleidsregel dient ertoe de aanvragers inzicht te geven in de afwegingen die RWS maakt alvorens al dan niet vergunning te verlenen en in enkele voorschriften die daaraan in elk geval worden verbonden. Het voldoen aan hetgeen in deze beleidsregel is bepaald leidt echter niet automatisch ook tot vergunningverlening. Bijzondere en specifieke lokale situaties kunnen RWS doen besluiten niet tot vergunningverlening over te gaan. Uiteraard brengt dit extra motiveringsvereisten met zich mee. Omgekeerd geldt dat technische ontwikkelingen ertoe kunnen leiden dat plaatsing vanuit waterstaatkundig oogpunt mogelijk wordt, daar waar het voordien niet kon worden toegestaan. In dat geval zal van deze beleidsregel worden afgeweken. Daarnaast moet door de aanvrager rekening worden gehouden met ondermeer de Wet op de Ruimtelijke Ordening, de Natuurbeschermingswet, de Woningwet, de Wet milieubeheer, en de Vogel- en Habitatrichtlijn. Naast een publiekrechtelijke vergunning voor de windturbine en de daarbij behorende bekabeling, infrastructuur en bijgebouwen sluit het Rijk (Directie Domeinen van het Ministerie van Financiën) als eigenaar van de waterstaatswerken een privaatrechtelijke overeenkomst. Ook kan het Rijk een recht van opstal en of een recht van erfpacht vestigen. Hiervoor worden retributies respectievelijk

een canon bedongen. De termijn van het zakelijke recht zal overeenkomen met de termijn die is opgenomen in de publiekrechtelijke vergunning. Deze beleidsregel zal over vijf jaar worden geëvalueerd.

Wet beheer rijkswaterstaatswerken.

Deze beleidsregel is gebaseerd op de Wet beheer rijkswaterstaatswerken (Wbr). Op grond van het bepaalde in artikel 2 lid 1 onder a van de Wbr is het verboden zonder vergunning van de minister van Verkeer en Waterstaat gebruik te maken van een waterstaatswerk door anders dan waartoe het is bestemd, daarin, daarop, daaronder of daarover werken te maken of te behouden. Onder waterstaatswerken worden verstaan wateren, waterkeringen en wegen.

Het afwegingskader van de Wbr richt zich in eerste instantie op het beschermen en het veilig en doelmatig gebruik van het waterstaatswerk. Ook kunnen op grond van artikel 3, tweede lid, van de wet andere dan waterstaatkundige aan het waterstaatswerk verbonden belangen worden beschermd. Hierbij moet met name gedacht worden aan belangen van landschap, natuur en cultuurhistorie voor zover die niet door andere regelgeving wordt beschermd, hetgeen meestal wel het geval zal zijn. Deze beleidsregel heeft daardoor alleen betrekking op de waterstaatkundige belangen. Alleen ten aanzien van het gedeelte van de territoriale zee, dat niet gemeentelijk is ingedeeld, is het ruimere afwegingskader van toepassing. De beleidsregel knoopt voor dit gedeelte aan bij het ruimtelijk beleid. Omdat naast de vergunning op grond van de Wbr vaak meer vergunningen nodig zijn, zal RWS, gezien het beperkte belangenkader van de Wbr, indien daar aanleiding toe is, trachten zoveel mogelijk in de voorfase van de aanvraag in overleg te treden met de aanvrager. Dit geldt met name ten aanzien van de benodigdheid van een bouwvergunning op grond van de Woningwet en de milieu-

vergunning op grond van de Wet milieubeheer. Op deze wijze kan voorkomen worden dat aanvragers onnodig middelen besteden aan aanvullende onderzoeken ten aanzien van de geschiktheid van een locatie.

De grenzen van het waterstaatswerk bepalen de reikwijdte van de Wbr. Het waterstaatswerk omvat 'al hetgeen daar in functionele dan wel fysieke zin toe behoort'. In deze beleidsregel worden afstanden genoemd die niet in alle situaties ter plekke vallen binnen de grenzen van het waterstaatswerk. In die situaties waarin de afstanden de grenzen van het werk overschrijden, verzoekt RWS het bevoegde gezag rekening te houden met de afstanden zoals in deze beleidsregel vermeld. De Wbr staat vergunningverlening onder beperkingen toe. Eén van die beperkingen kan zijn een beperking in tijd. Om de mogelijkheden voor toekomstig gebruik niet teveel te beperken en rekening houdend met de te verwachte gebruiksduur van windturbines, verleent RWS vergunningen voor een bepaalde termijn. Deze kan per aanvraag verschillend zijn maar zal ter indicatie gelegen zijn tussen de 10 en 20 jaar. Daarnaast kan in de vergunning de voorwaarde opgenomen worden dat binnen een bepaalde periode de windturbines ook geplaatst moeten worden. Dit om reservering van schaarse ruimte te voorkomen en ondoelmatigheid tegen te gaan die zou kunnen ontstaan bij 'slapende' vergunningen.

Veilig en doelmatig gebruik van het waterstaatswerk

Bij zowel de plaatsing als bij het beheer en onderhoud van de windturbine moet rekening worden gehouden met de belangen die de Wbr beoogt te beschermen.

Dit betekent dat plaatsing en beheer en onderhoud van de windturbines niet tot gevolg mag hebben:

- een aanwijsbaar risico op overstroming;
- een substantiële toename van congestie op vaar-en hoofdwegen;

- een afname van de veiligheid van het (scheepvaart)verkeer;
- een feitelijke belemmering van het waterkwantiteitsbeheer.

De Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV) heeft in 1992 een onderzoek uitgevoerd naar de invloed van windturbines op de verkeersveiligheid. De risico's zijn onderverdeeld in afleiding, slagschaduw en reflectie, afvallend ijs en botsing. De algemene conclusie uit het rapport is, dat deze risico's verwaarloosbaar zijn. Daarnaast is het risico op bladbreuk onderzocht door de Bouwdienst van RWS. De resultaten zijn neergelegd in het rapport 'Veiligheidsrisico's voor passanten langs windturbines 1999'. De beide onderzoeksresultaten hebben tezamen met de ARBO 'beleidsregelen voor beheer en onderhoud' geleid tot een voorkeursafstand van minimaal 30m en 50m uit de rand van de verharding van het hoofdwegenet respectievelijk de rand van de vaarweg tot aan de as van de windturbine. Indien er sprake is van parallelwegen en of fietspaden in beheer bij het Rijk, geldt de afstand uit de rand van de verharding van de parallelweg/fietspad. De voorkeursafstand is geen absolute minimumafstand. Dichterbij de rand van de verharding of de rand van de vaarweg is alleen toegestaan indien aan nadere voorwaarden wordt voldaan met ondermeer het oog op de verblijfstijd van - en risico's voor medewerkers bij beheer van - en onderhoud aan de (vaar)weg. Hiertoe moet aanvullend onderzoek gedaan worden conform het rapport van de Bouwdienst van RWS. Hetzelfde geldt ten aanzien van verzorgingsplaatsen, zoals parkeerplaatsen en tankstations, met het oog op de gebruikers daarvan en degenen die daar werken zoals personeel van een restaurant of benzinstation. In situaties waarbij de rotorbladen boven de weg draaien en bij knooppunten bestaat het gevaar dat de weggebruikers hierdoor worden afgeleid. Dit risico hangt ondermeer af van de verkeerssituatie ter plaatse, de overzichtelijkheid

van de locatie en mogelijke andere aanwezige afleiding. Uit aanvullend onderzoek moet blijken dat

plaatsing van windturbines geen onaanvaardbaar risico voor de verkeersveiligheid ter plekke met zich meebrengt. De bewijslast terzake rust op de vergunningaanvrager.

Naast deze algemeen geldende veiligheidsrisico's gelden voor de drie soorten waterstaatswerken apart nog specifieke aspecten waar rekening mee gehouden wordt bij vergunningverlening. Deze worden in de toelichting artikelsgewijs behandeld.

Tot slot geldt dat plaatsing en het beheer en onderhoud van de windturbines zo min mogelijk hinder mogen opleveren voor RWS in de uitvoering van haar beheers- en onderhoudstaken. Dit houdt in dat er voldoende ruimte moet worden vrijgehouden bij de bouw van windturbines, bekabeling, infrastructuur en bijgebouwen zodat deze geen belemmering vormen bij de werkzaamheden van personeel van RWS en aannemers. Daarnaast mag het beheer en onderhoud van de windturbine zelf geen negatieve effecten hebben op het waterstaatswerk. Dit kan betekenen dat in de vergunning nadere eisen worden gesteld met betrekking tot de bereikbaarheid van de windturbine zoals de aanleg van een schouwpad.

B Wegen

Onderzoeksresultaten hebben geleid tot een voorkeursafstand van minimaal 30m vanaf de rand van de verharding of indien de rotordiameter groter is dan 60m, ten minste de afstand van de halve rotordiameter vanaf de rand van de verharding. Conform artikel 3 lid 2 en 3, kan zich de situatie voordoen dat de rotorbladen boven de verharding draaien. In een dergelijk geval is een specifieke risico-analyse ten aanzien van de verkeersveiligheid vereist, uitgevoerd door een onafhankelijk onderzoeksinstituut. In geval van

plaatsing nabij knooppunten en aansluitingen is een risico-analyse te allen tijde verplicht, gezien de zwaarte van de rijtaak aldaar en het mogelijk afleidend karakter van windturbines.

Om het verkeer zo min mogelijk te hinderen worden in de vergunningvoorwaarden ook bepalingen opgenomen omtrent het tijdstip van de bouw van de windturbine en het onderhoud.

C Wateren

Enkele overwegingen zijn in het bijzonder van belang voor de wateren. Windturbines langs, in of nabij wateren kunnen onveilige situaties opleveren voor het scheepvaartverkeer. Dit kan veroorzaakt worden door hinder aan wal- en scheepsradarapparatuur en overige telecommunicatiemiddelen. Daarnaast kunnen schippers en bedienend personeel van kunstwerken en verkeersposten ook visuele hinder ondervinden van windturbines, zoals slagschaduw.

Hieronder wordt uiteengezet hoe deze hinder zoveel mogelijk kan worden geëlimineerd.

Voor de rivieren geldt dat deze hun functie van afvoer van water, ijs en sediment optimaal kunnen blijven vervullen. Dit belang wordt beschermd door de Beleidslijn ruimte voor de rivier (Staatscourant 12 mei 1997, 87). De Beleidslijn ruimte voor de rivier is van toepassing op alle nieuwe activiteiten, waaronder wijziging van bestaande activiteiten, in het rivierbed van de Rijn en de Maas (inclusief de onbedijkte Maas) en grote zijrivieren voor zover in beheer bij het Rijk. Het Besluit rijksrivieren (Stb. 2001, 255) geeft aan waar de vergunningplicht op grond van de Wbr geldt aan de hand van kaarten.

Ten aanzien van het plaatsen van windturbines in het rivierbed zal RWS toetsen aan de Beleidslijn ruimte voor de rivier. Indien toetsing op basis van de Beleidslijn ruimte voor de rivier tot een ander resultaat leidt dan bij toepassing van artikel 4 lid 1 en 2, geldt nadrukkelijk dat de Beleidslijn ruimte voor de rivier prevaleert. Wind-

turbines vallen daarbij niet onder het begrip 'kleine ingrepen'. De Beleidslijn ruimte voor de rivier maakt onderscheid in een stroomvoerend - en een waterbergend rivierbed. In het stroomvoerend rivierbed zijn activiteiten, die leiden tot waterstandsverhoging, alleen toegestaan voor zover ze aan de rivier gebonden zijn. Dit geldt niet voor windmolens. Voor het waterbergend rivierbed geldt dat plaatsing alleen toegestaan is indien er sprake is van een zwaarwegend maatschappelijk belang en er geen andere geschikte locaties beschikbaar zijn.

Ten aanzien van windturbines in de Noordzee geldt dat deze beleidsregel niet van toepassing is op het gedeelte van de Noordzee buiten de territoriale zee, de zogenaamde exclusieve economische zone (EEZ).

De Noordzee bestaat voor het toepasselijke wettelijke regime uit drie delen. Het gedeelte dat gemeentelijk is ingedeeld (één kilometerzone), de overige territoriale zee en de EEZ.

Door een recente wetwijziging is de Wbr eveneens van toepassing op de EEZ. Aangezien de EEZ geen Nederlands territorium betreft en zodoende diverse wetten daar niet van toepassing zijn werkt de genoemde uitzondering van de vangnetbepaling van artikel 3, tweede lid, Wbr ten aanzien van de meeste belangen niet in de EEZ. Om deze reden is bij de parlementaire behandeling van de wetwijziging toegezegd beleidsregels op te stellen voor werken in de EEZ. De beleidsregels inzake de toepassing van de Wbr met betrekking tot installaties in de EEZ zijn gepubliceerd in de Staatscourant van 6 mei 2002, nr 85.

De begrenzing van de één kilometerzone is vastgesteld in de Wet regeling provincie- en gemeentegrenzen langs de Noordzeekust van de gemeente Den Helder tot en met de gemeente Sluis en de Wet gemeentelijke indeling van de Waddenzee. De begrenzing van de EEZ ligt vast in het Besluit grenzen exclusieve economische zone, dat is gebaseerd op de Rijkswet ter instelling van een

exclusieve economische zone van het Koninkrijk.

Vaarwateren; hinder aan wal- en scheepsradar

Ten aanzien van het plaatsen van windturbines langs, in of nabij wateren waar ook scheepvaartverkeer plaatsvindt, geldt dat de veiligheid van zowel de beroepsvaart als de recreatievaart niet mag worden aangetast. Windturbines kunnen hinder opleveren voor enerzijds de radarapparatuur aan boord van schepen en anderzijds voor radarinstallaties aan de wal ten behoeve van scheepvaartbegeleiding.

De Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) van RWS heeft in samenwerking met het Christiaan Huygens laboratorium enkele aanbevelingen gedaan ter voorkoming van radarhinder door windturbines. Deze aanbevelingen zullen door RWS betrokken worden bij het beoordelen van aanvragen voor een vergunning voor het plaatsen van windturbines. Het betreft de volgende punten:

1. Teneinde afscherming van het radarzicht in het vaarwater te voorkomen dienen windturbine masten achter de walradarstations geplaatst te worden. Hierbij moet echter rekening gehouden worden met het veroorzaken van valse echo's bij de walradarstations. Bij vergunningaanvraag zal de aanvrager in overleg met RWS een aanvullend onderzoek doen naar de mogelijke effecten van plaatsing van windturbines op de walradarstations.
2. In de zichtlijn tussen een walradarstation en het vaarwater, behorend tot het radardekkinggebied, mogen geen windturbines geplaatst worden. Voor sluiscomplexen betekent dit concreet dat slechts dan windturbines op sluis en havendammen geplaatst kunnen worden indien geen vaarwater voor de radarpost van het sluiscomplex wordt afgeschermd.
3. Teneinde op een radarscherm aan boord van schepen de afbeelding van windturbines in het vaarwater te voorkomen moet een windturbine

op minimaal 50m uit de rand van de vaarweg worden geplaatst. Plaatsing van een windturbine op een afstand van minder dan 50m uit de rand van de vaarweg kan alleen als de aanvrager door middel van een aanvullend onderzoek kan aantonen dat geen radarhinder zal plaatsvinden. Dit doet zich bijvoorbeeld voor in de situatie waarbij windmolens geplaatst worden tussen of bij grote bomen op minder dan 50m uit de rand van de vaarweg. In dat geval veroorzaken de windturbines geen extra radarhinder ten opzichte van de radarhinder die wordt veroorzaakt door de bomen.

Vaarwateren; visuele hinder voor schippers en bedienend personeel van kunstwerken.

Teneinde de veiligheid te waarborgen mag bij plaatsing van windturbines het vrije zicht van schippers en bedienend personeel van kunstwerken en verkeersposten niet worden gehinderd. Dit geldt bij vaarwateren met name bij kruisingen en bochten, haveningangen, vaarwegsplitsingen en aftakkingen. Ook mogen vaarwegmarkeringen, zoals lichtenlijnen, sectorlichten, havenlichten en bakens niet worden afgeschermd door windturbines. In geval van plaatsing van windturbines binnen een afstand van 1km van splitsingen en kruisingen dient de aanvrager door middel van een aanvullend onderzoek aan te tonen dat er geen visuele hinder bestaat.

Om reflectiehinder als gevolg van bijvoorbeeld lichtschittering door zonnestrallen tegen te gaan worden niet reflecterende verfsystemen voorgeschreven.

Territoriale zee en grote wateren

Voor plaatsing van windturbines in de één kilometerzone en in de Waddenzee geldt dat windturbines de veerkracht van de kust beperken. In de Derde Kustnota staat dat er gezocht wordt naar mogelijkheden om meer in te spelen op natuurlijke processen; minder tegen de natuurkrachten inwerken, meer met de natuurkrachten meewerken. Er wordt gezocht naar minder inten-

sieve vormen voor kustonderhoud. Kustkenmerken zoals flexibiliteit, buffer, robuustheid en dynamiek beantwoorden hieraan. Dit wordt samengevat met de term 'veerkracht'. Deze benadering vraagt ruimte, ruimte om ook in de toekomst de veiligheid te kunnen garanderen bij zeespiegelstijging en klimaatverandering.

In de kustzone dient rekening te worden gehouden met diverse vormen van kustonderhoud.

Hierbij moet gedacht worden aan zandsuppleties met overslagputten, onderwatersuppleties, morfologische ingrepen en herinrichting van gebieden. De aanwezigheid van windturbines bemoeilijkt zandsuppleties met name zandsuppleties door middel van overslagputten.

Verder bestaat in dit gedeelte van de Noordzee en Waddenzee en ook in sommige grote wateren zoals de Westerschelde, een grote dynamiek van de bodem waaronder de verplaatsing van de natuurlijke vaarwegen. Hierdoor kan een vergunning niet voor een lange tijd worden afgegeven. Ook bevorderen obstakels de erosie- en sedimentatieprocessen.

In het overige gedeelte van de territoriale zee kunnen, zoals gezegd, mede belangen van ruimtelijke aard worden beschermd.

Het PKB NSW wijst één locatie aan in het niet gemeentelijk ingedeelde deel van de territoriale zee. Omdat de totale plaatsingsmogelijkheden op land en in zoete wateren niet voldoende is om de lange termijn doelstellingen voor duurzame energie, zoals neergelegd in de Derde Energienota, te kunnen bereiken, is het volgens het kabinet noodzakelijk de optie windenergie op zee tot ontwikkeling te brengen. Het NSW moet beschouwd worden als een demonstratieproject met als doel met de opgedane ervaring, over enige jaren grote windparken verder in zee te realiseren.

In de nog niet definitief vastgestelde Vijfde Nota Ruimtelijke Ordening worden drie locaties voor windturbineparken in de territoriale zee aange-

wezen, waarvan twee binnen gemeentelijk ingedeeld gebied.

Ten aanzien van de scheepvaart in de territoriale zee en de grote wateren geldt dat windturbines kansen op aanvaring en aandrijving met zich meebrengen. Om deze kans te verkleinen moeten de windturbines op een redelijke afstand staan van de vaarweg waar intensieve scheepvaart plaatsvindt. Ter bescherming van de scheepvaart moet een windturbinepark door markering voor scheepvaart worden afgesloten en moeten aanvullende maatregelen op grond van de Scheepvaartverkeerswet genomen worden.

Voor de Waddenzee is van belang de Verklaring van Stade 1997 waarin Nederland met Duitsland en Denemarken ondermeer heeft afgesproken geen windturbines te plaatsen in de Waddenzee en de Conventie van Ramsar. In Nederland vinden de afspraken van deze Verklaring hun neerslag in de PKB (Derde Nota) Waddenzee. Derhalve worden geen bouwvergunningen afgegeven.

Tot slot het IJsselmeergebied. Voor dit gebied zijn twee beleidsnota's van belang. In de 'Integrale Visie IJsselmeergebied', opgesteld door de betrokken ministeries, wordt een ruimtelijke afweging gemaakt ten aanzien van het plaatsen van windturbines. De Beleidslijn 'Buitendijkse ontwikkelingen IJsselmeergebied' wordt door RWS opgesteld om te voorkomen dat nieuwe ontwikkelingen in het IJsselmeergebied het uitvoeren van maatregelen in het kader van waterkwantiteitsbeheer belemmeren.

D Primaire Waterkeringen

Het overgrote deel van de primaire waterkeringen is in beheer bij waterschappen en slechts een klein deel bij het Rijk. Onder waterkeringen worden naast dijken en dammen eveneens duinen begrepen. De kernzone omvat tevens strekdammen welke van belang zijn voor de sterkte van de waterkering. Voor het beoordelen van vergun-

ningaanvragen voor bouwwerken waaronder windturbines in de kernzone (dit is het feitelijk dijk-duin of damlichaam inclusief het binnen-en buitentalud) en reservestrook, dit is het gebied aan land-en waterzijde van de kernzone dat dient voor toekomstige dijkverzwaringen, houdt RWS rekening met een versnelde zeespiegelstijging, een verhoogde afvoer van rivierwater in het winterseizoen en een toename van de stormfrequentie en intensiteit. Dit leidt ertoe dat voor aanvragen in de kernzone voor bouwwerken die niet functioneel aan de waterkering zijn gebonden RWS geen toestemming verleent. Dit ter waarborging van het waterkerend vermogen van de waterkering. De volgende studies liggen hieraan ten grondslag: 'Grondslagen voor waterkeringen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 1998' en 'Windmolens en waterkeringen, Dienst Weg en Waterbouwkunde RWS 2000'. Windturbines gelden als bouwwerken die niet functioneel aan de waterkering zijn verbonden. In het gebied van de reservestroken geldt dat plaatsing van windturbines is toegestaan voor zover dit geen negatieve gevolgen heeft voor de waterkerende functie van de waterkeringen conform de norm die is opgenomen in de Wet op de waterkering en voor het reguliere beheer en onderhoud.

In de Vierde Nota Waterhuishouding wordt gesteld dat permanente bebouwing in de kustzone - met name op de primaire waterkering - niet verenigbaar is met de hoofddoelstelling van het kustbeleid, het dynamisch handhaven van de kustlijn van 1990. Dat betekent dat natuurlijke processen zo min mogelijk worden belemmerd, maar dat ingegrepen wordt - veelal middels het suppleren van zand - als er land blijvend verloren dreigt te gaan. Een veerkrachtige kust is de beste garantie voor duurzame veiligheid, waarbij rekening wordt gehouden met een (versnelde) zeespiegelstijging en andere effecten van klimaatverandering. Een veerkrachtige kust heeft echter wel ruimte nodig.

Maar ook vanuit andere gebruiksfuncties (natuur - de duinen maken onderdeel uit van de Ecologische Hoofdstructuur -, recreatie/toerisme en economie) wordt een claim gelegd op de resterende ruimte in de kustzone. Het draait steeds meer om ruimtelijke keuzes. Het streven is gericht op een zonering van de kustzone waarbij bebouwde gebieden worden onderscheiden van gebieden waar natuur en veerkracht voorop staan. Over de wijze waarop deze zonering tot stand komt is door de regering overleg gevoerd met overheden. De uitwerking van de zonering vindt plaats onder regie van de provincies. De uitgangspunten van de zonering worden in het nationale ruimtelijke beleid verankerd middels de zogenaamde groene en rode contouren. Zolang de resultaten vervolgens nog niet zijn vastgelegd in streek- en bestemmingsplannen, blijft het interim-beleid, zoals verwoord in de Vierde Nota Waterhuishouding, van toepassing, hetgeen inhoudt dat nieuwe permanente bebouwing in de kustzone niet toegestaan wordt.

In de Derde Kustnota en de Vijfde Nota Ruimtelijke Ordening wordt ten aanzien van de kust opgemerkt dat bezien moet worden of extra ruimte om dijken en smalle duinen te versterken, in verband met de versnelde zeespiegelstijging, landinwaarts of zeewaarts moet worden gevonden.

Verder moet in het kustfundament voldoende ruimte beschikbaar blijven voor versterking van de zeekering. Het kustfundament bestaat uit het gedeelte van de zee dat bijdraagt aan de duinvorming (de zone van de feitelijke lijn van 20m NAP tot de landwaartse duinvoet).

Het voorgaande betekent beperkingen ten aanzien van de mogelijkheden om windturbines te plaatsen in de kustzone.

De Minister van Verkeer en Waterstaat

Namens deze,

De plv. Directeur Generaal van De Rijkswaterstaat

drs. L.H.M. Kohsiek

4 INDIRECTE RISICO'S

Indien een windturbineblad bijvoorbeeld een tank met een gevaarlijke stof treft is het denkbaar dat deze tank faalt, de stof deels ontsnapt en slachtoffers kan veroorzaken. Zelfs wanneer deze tank buiten de $PR = 10^{-6}$ contour ligt kan het risico voor de omgeving aanzienlijk zijn, doordat de gevolgen groot kunnen zijn. In dit hoofdstuk wordt aangegeven op welke manier omgegaan kan worden met de risico's die windturbines veroorzaken voor risicovolle inrichtingen. De aanpak die in dit hoofdstuk wordt beschreven is conform het vigerend veiligheidsbeleid. In [1] worden "naburige industriële activiteiten die zelf risico's veroorzaken, incidentele bedrijfswoningen en de verkeersstromen op de openbare weg" expliciet uitgesloten van de lijst met kwetsbare objecten voor het PR. Het fenomeen dat inrichtingen kunnen falen ten gevolge van incidenten bij naburige inrichtingen (inclusief windturbines) wordt ook wel het domino effect genoemd.

Er zijn grofweg drie categorieën risicovolle inrichtingen waarbij secundaire effecten denkbaar zijn:

1. Niet-categoriale inrichtingen ook wel aangeduid als QRA inrichtingen
2. Categoriale inrichtingen
3. Transport van gevaarlijke stoffen.

Ad 1) Voor deze inrichtingen kan uitsluitend via een berekening worden bepaald welke afstand tot gevoelige objecten moet worden aangehouden om aan de geldende normen te voldoen.

Ad 2) Voor deze inrichtingen is een systematiek ontwikkeld waarbij per type inrichting uit een tabel kan worden afgelezen bij welke afstand wordt voldaan aan de norm (bijvoorbeeld LPG-tankstations).

Ad 3) Transport van gevaarlijke stoffen betreft transport van gevaarlijke stoffen over wegen, vaarwegen, spoorwegen en door transportleidingen.

In de volgende paragrafen wordt per inrichting aangegeven welke normen van toepassing zijn. In alle gevallen geldt dat de normen voor PR, GR-voor-inrichtingen (GR_I) en GR-voor-transportroutes (GR_T) ook na plaatsing van één of meerdere windturbines niet overschreden mogen worden. Vaak kan op verkorte wijze worden nagegaan of de normen niet overschreden worden en kan het voldoende zijn om aan te tonen dat de trefkans van een turbineonderdeel vele malen kleiner is dan de initiële faalfrequentie van de inrichting. Het toegenomen risico is dan verwaarloosbaar klein. Een volledige kwantitatieve risicoanalyse (ook wel QRA = Quantitative Risk Assessment genoemd) hoeft dan niet te worden uitgevoerd voor de inrichting.

4.1 Niet-categoriale inrichtingen

De normen voor PR en GR_I mogen na plaatsing van de windturbines niet overschreden worden. Voor deze inrichtingen kan uitsluitend via een berekening (QRA) worden bepaald welke afstand tot gevoelige objecten moet worden aangehouden om aan de geldende normen te voldoen. Om na te gaan of na plaatsing van een windturbine nog steeds wordt voldaan aan de normen voor PR en GR_I zal in de QRA rekening moeten worden gehouden met het treffen van de inrichting door een blad, mast of gondel. Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van de inrichting zullen de voor de inrichting geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen kan in eerste instantie naar de toename van de catastrofale faalfrequentie van risicovolle installaties behorende tot de inrichting gekeken worden. Indien deze toename een bepaalde richtwaarde niet overschrijdt dan is plaatsing van de windturbine uit oogpunt van risicobeoordeling toegestaan. Als uitgangspunt voor deze richtwaarde kan 10% worden gehanteerd (zie onderstaande kader). Indien de toename in de catastrofale faalfrequentie deze richtwaarde overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat

Richtwaarde toegevoegd risico

De richtwaarde van 10% is gebaseerd op een vergelijkbaar probleem van een neerstortend vliegtuig welke is opgenomen in de "questions and answers" van het Paarse Boek, CPR18 (nu PGS 3). Het ging hier om de vraag in hoeverre het scenario van een neerstortend vliegtuig in de QRA moest worden beschouwd van een bedrijf met opslagtanks met gevaarlijke stoffen gelegen onder de aanvliegroute (en binnen de risicocontour) van een vliegveld. Als antwoord werd gegeven dat wanneer de faalkans van de betreffende opslagtanks met meer dan 10% zou toenemen, deze van invloed zou zijn op de ligging van de risicocontour van het bedrijf en dus in de QRA moest worden meegenomen. Als de faalkans ten gevolge van het vliegtuig kleiner is dan 10% ten opzichte van de bestaande faalkans, dan kan de bijdrage van het vliegtuig worden verwaarloosd.

Genoemde richtwaarde van 10% heeft geen wettelijke status, en om gewichtige redenen kan er van worden afgeweken. Het is dus van belang dat de betrokken partijen (ontwikkelaar, vergunningverlener en eigenaar van een naburige inrichting) overeenstemming bereiken over het gebruik van deze richtwaarde.

door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde installatie ook na plaatsing van de windturbine(s) nog voldoet aan de normen voor PR en GR_I. Toename van het risico van een inrichting kan echter leiden tot een vergroting van de risicoruimte van de inrichting, waardoor toekomstige uitbreiding kan worden bemoeilijkt.

4.2 Categoriele Inrichtingen

De normen voor PR en GR_I mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden. Voor de categoriale inrichtingen waarvoor geen QRA is uitgevoerd kan, als rekening moet worden gehouden met treffen door een blad, mast of gondel, een veel zwaarder Most Credible Accident gaan gelden dan in de reeds beschreven ongevalsscenario's en de daarbijbehorende preventieve maatregelen. Dit soort inrichtingen kan dus kwetsbaar blijken voor windturbines. In deze gevallen kan een QRA alsnog noodzakelijk zijn.

Voor faalmechanismen die in de ongevalsscenario's van de inrichting wél zijn beschouwd, zijn de faalfrequenties per jaar vaak bekend uit generieke databases. Met de beheerder van de inrichting moet worden afgestemd of de uit de databases bekende generieke faalfrequenties voor de specifieke situatie van toepassing zijn. Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van de inrichting zullen de voor de inrichting geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen kan in eerste instantie naar de toename van de catastrofale faalfrequentie van risicovolle installaties behorende tot de inrichting gekeken worden. Indien deze toename een bepaalde richtwaarde niet overschrijdt dan is plaatsing van

Voorbeeld

Stel dat een tank een intrinsieke faalfrequentie heeft van $5 \cdot 10^{-4}$ per jaar waarbij een gevaarlijke stof vrijkomt. De kans dat een windturbineonderdeel de tank treft is bepaald op $3 \cdot 10^{-5}$ per jaar. Onder de conservatieve aanname dat iedere treffer van een windturbineblad tot lekkage van de tank zal leiden, is de toegevoegde faalfrequentie ten gevolge van de windturbine dus 6%. Op basis van een richtwaarde van 10% is plaatsing van de windturbine dus toegestaan.

Indien er zwaarwegende redenen zijn om een lagere richtwaarde te hanteren kan worden besloten om een verdere analyse uit te voeren van de gevolgschade, b.v. de kans dat de tank daadwerkelijk faalt tengevolge van de treffer, want niet iedere treffer hoeft daadwerkelijk tot catastrofale lekkage te leiden. Wanneer dit niet afdoende is, kan alsnog een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) worden uitgevoerd om na te gaan of na plaatsing van de windturbine de inrichting nog voldoet aan de normen voor het PR en GR.

de windturbine uit oogpunt van risicobeoordeling zondermeer toegestaan. Als uitgangspunt voor deze richtwaarde kan 10% worden gehanteerd (zie kader). Indien de toename in de catastrofale faalfrequentie deze richtwaarde overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde installatie ook na plaatsing van de windturbine nog voldoet aan de normen voor PR en GR_I.

4.3 Vervoer Gevaarlijke Stoffen

De normen voor PR en GR_T mogen na plaatsing van de windturbines niet worden overschreden.

Voor vervoer van gevaarlijke stoffen over wegen, vaarwegen, spoorwegen is meestal geen QRA uitgevoerd. De faalfrequenties per jaar van tankauto's, treinen en schepen zijn vaak bekend uit generieke databases. Ze worden vaak uitgedrukt in faalkans per kilometer. Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van de transportroute zullen de voor de transportroute geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen kan in eerste instantie naar de toename van de faalfrequentie van het transport gekeken worden. Indien deze toename een bepaalde richtwaarde niet overschrijdt dan is plaatsing van de windturbine uit oogpunt van risicobeoordeling zondermeer toegestaan. Als uitgangspunt voor deze richtwaarde kan 10% worden gehanteerd (zie kader paragraaf 4.2). Indien de toename in de catastrofale faalfrequentie deze richtwaarde overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde transportroute ook na plaatsing van de windturbine nog voldoet aan de normen voor PR en GR_T.

Voor leidinglekage en leidingbreuk zijn de faalfrequenties per jaar vaak bekend uit generieke databases. Met de beheerder van de leiding moet worden afgestemd of de uit de databases bekende generieke faalfrequenties voor de specifieke situatie van toepassing zijn. Indien de windturbine niet substantieel bijdraagt aan een hoger risico van de leidingen, zullen de voor de leiding geldende afstanden tot beperkt kwetsbare en kwetsbare objecten ook na plaatsing van de windturbine van kracht blijven. Om dit te toetsen kan in eerste instantie naar de toename van de faalfrequentie van de leiding gekeken worden. Indien deze toename een bepaalde richtwaarde niet overschrijdt, dan is plaatsing van de windturbine uit oogpunt van risicobeoordeling toegestaan. Als uitgangspunt voor deze richtwaarde kan 10% worden gehanteerd (zie kader paragraaf 4.2). Indien de toename in de catastrofale faalfrequentie deze richtwaarde overschrijdt, is plaatsing van de windturbine niet uitgesloten, maar wel kan worden geëist dat door middel van een QRA wordt aangetoond dat de beschouwde leiding ook na plaatsing van de windturbine nog voldoet aan de normen voor PR en GR_T. Toename van het risico van een transportleiding kan echter leiden tot een vergroting van de risicoruimte van de leiding, waardoor toekomstige uitbreiding kan worden bemoeilijkt.

4.4 Generieke Databases

Voor de verkorte manier van toetsen waarbij de trefkans van een object wordt vergeleken met de intrinsieke faalfrequentie van het object kan gebruik worden gemaakt van generieke faalfrequenties. In de Handleiding Risicoberekeningen Bevi 3.2 [11] en SAFETI-NL [12] zijn standaard faalfrequenties opgenomen voor inrichtingen die onder Bevi vallen. De standaard

faalfrequenties gelden voor een inrichting die voldoet aan de stand der techniek. Het is mogelijk dat op een inrichting technische maatregelen zijn genomen die de kans op een ongeval reduceren, zoals speciale warmtewerende coatings en hitteschilden bij de opslag van LPG om de kans op een BLEVE te reduceren en het gebruik van speciale slangen bij de verlading.

Wanneer de opsteller van de QRA gebruik wil maken van andere faalfrequenties, dient hij van tevoren een voorstel te doen voor de specifieke faalfrequenties in zijn situatie. Dit voorstel dient vergezeld te gaan van een onderbouwing in de vorm van bijvoorbeeld casuïstiek of een foutenboomanalyse.

5 REFERENTIES

- [1] Besluit van 27 mei 2004, houdende milieukwaliteitseisen voor externe veiligheid van inrichtingen milieubeheer (Besluit externe veiligheid inrichtingen), Staatsblad 2004, 250.
- [2] Externe veiligheid inrichtingen, InfoMil , juni 2004
- [3] *Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen; Beoordeling van veiligheidsrisico's*, Rijkswaterstaat en NS Railinfrabeheer, Doc. Nr. VRWP-99004, 15 april 1999.
- [4] H. Braam, *Het risico van bladbreuk voor passanten van windturbines*, Proceedings Duurzame Energie Conferentie
- [5] PGS 3, Guidelines for quantitative risk assessment, Ministerie van Buitenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, SZW en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, december 2005.
- [6] European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG): *4th EGIG Report 1970-1998*, December 1999
- [7] Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Directoraat-generaal Rijkswaterstaat, *“Beleidsregel voor het plaatsen van windturbines op, in of over rijkswaterstaatwerken*, Staatscourant 2 juli 2002, nr. 123 / pag. 13.
- [8] Ministeries van VROM en Verkeer en Waterstaat: *“Handreiking Externe Veiligheid Vervoer Gevaarlijke Stoffen”*, VNG Uitgeverij Den Haag, 1998, ISBN 90 322 7141 5
- [9] Nota Risiconormering vervoer gevaarlijke stoffen; Kamerstuk II, 1996, 24611, nrs 1-2.
- [10] Circulaire Risiconormering vervoer gevaarlijke stoffen, 04-08-2004, Staatscourant 2004, 147
- [11] Handleiding Risicoberekeningen Bevi, RIVM, juli 2009.
- [12] SAFETI-NL, Rekenmethodiek Bevi, DNV.