



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Handleiding Omgevingsveiligheid

Versie juli 2020

Module IV: Specifieke rekenvoorschriften voor activiteiten D.1 en
E.1.

Colofon

© RIVM 2020

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Contact:

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
Centrum Veiligheid
Postbus 1
3720 BA Bilthoven

Helpdesk Omgevingsveiligheid
omgevingsveiligheid@rivm.nl

Inhoudsopgave

- 1 Inleiding 5**
- 2 Bladbreuk 9**
- 3 Mastbreuk 34**
- 4 Incidenten binnen de rotordiameter 40**
- 5 Incidenten met buisleidingen 44**
- 6 Referenties 56**

1 Inleiding

Voor het berekenen van de risico's van windturbines werd het Handboek Risicozonering Windturbines gebruikt. Dit Handboek Risicozonering Windturbines (versie 3.1, 2014) is opgesplitst in twee delen: de Handreiking Windturbines en de Handleiding Risicoberekeningen Windturbines. Deze opsplitsing is gemaakt om de rekenmethode voor de risicoberekening te scheiden van een aantal andere onderwerpen waarmee rekening mee moet worden gehouden bij het plaatsen van windturbines op land. In de handreiking¹ is beschreven met welke objecten rekening moet worden gehouden bij het plaatsen van windturbines en hoe hiermee moet worden omgegaan in de risicoanalyse. In de handleiding, dit document, staat beschreven hoe de risico's van windturbines en hoe de trefkansen moeten worden bepaald.

Voor het berekenen van het plaatsgebonden risico (PR) en de trefkansen van objecten zijn verschillende gegevens nodig. De afstanden waar verschillende onderdelen van een windturbine terecht kunnen komen zijn beschreven in Hoofdstuk 2 (bladbreuk), Hoofdstuk 3 (mastbreuk) en Hoofdstuk 4 (afvallen gondel en rotor en overige scenario's). De faalfrequenties voor elk van deze scenario's zijn beschreven in Hoofdstuk 6 (laatste kolom van Tabel 15). Met deze gegevens kan vervolgens het totale risico worden berekend door de risico's van de verschillende scenario's op te tellen. De methoden om de trefkansen van objecten te bepalen zijn beschreven in de hoofdstukken van het betreffende scenario. De trefkansen van ondergrondse en bovengrondse buisleidingen zijn beschreven in Hoofdstuk 5.

1.1 Welke risico's vormen windturbines voor hun omgeving?

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

- breuk van een windturbineblad (Hoofdstuk 2)
- omvallen van een windturbine door mastbreuk (Hoofdstuk 3)
- naar beneden vallen van een gondel en/of rotor (Hoofdstuk 4)
- het naar beneden vallen van kleine onderdelen (Hoofdstuk 4)

De faalfrequentie van het naar beneden vallen van kleine onderdelen (bouten, blad- en tipdelen, ijs) dient niet kwantitatief maar kwalitatief te worden bepaald. Het naar beneden vallen van kleine turbine-onderdelen of ijs zijn incidenten die voornamelijk 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 overtoeren situatie. In dit laatste geval kan het blad verder weggeslingerd worden.

1.2 Welke personen en objecten lopen gevaar?

De activiteiten en objecten in de nabijheid van windturbines moeten in kaart worden gebracht. In principe worden alle activiteiten en objecten beschouwd die een mogelijk door een afbrekend onderdeel getroffen kunnen worden. De maximale afstand die door een afbrekend rotorblad tijdens overtoeren situatie overbrugd kan worden, wordt de maximale werpafstand genoemd. Bevindt er zich geen object of activiteit binnen de berekende maximale werpafstand, dan is het verder uitvoeren van een risicoanalyse niet noodzakelijk.

De maximale werpafstand is afhankelijk van het type turbine en wordt onder andere bepaald door de diameter van de turbine, het rotortoerental en de ashoogte. Als richtlijn kunnen de generieke waarden uit de toelichting op het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid worden gebruikt. De werpafstanden kunnen ook berekend worden zoals beschreven in Hoofdstuk 2.

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. De trefkans voor objecten wordt per object bepaald.

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, Kabels en Leidingen Informatie Centrum (KLIC) 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 meer gedetailleerde beschrijving over hoe om te gaan met het plaatsen van windturbines in de nabijheid van deze categorieën is te vinden in de Handreiking Windturbines.

1.3 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. Deze handleiding maakt onderscheid tussen personen en objecten (zoals gebouwen en infrastructuur). De trefkans voor objecten wordt in de volgende hoofdstukken per scenario beschreven.

1.3.1 Generieke gegevens

Het uitvoeren van een kwantitatieve risicoanalyse volgens de methode die in deze handleiding is beschreven kan arbeidsintensief zijn. Over het algemeen kan met een eenvoudige aanpak en conservatieve uitgangspunten worden aangetoond dat de veiligheidscriteria, zoals beschreven in de handreiking¹ niet worden overschreden. Daarom zijn in de toelichting op het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid, generieke conclusies afgeleid voor wat betreft trefkansen van personen en objecten. Met deze conclusies kan in veel gevallen het arbeidsintensieve analysewerk worden vermeden.

1.3.2 Rekenmethode

In Hoofdstuk 2 tot en met 4 worden de methodes en procedures beschreven om de werpafstanden van turbineonderdelen te berekenen en de daarbij horende risico's te bepalen. Hierbij kunnen specifieke turbinegegevens worden gebruikt.

1.3.3 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 fallende windturbine. Rondom een windturbine kunnen risicocontouren worden getekend voor het plaatsgebonden risico. In het gebied direct rondom de windturbine ligt de 10^{-5} per jaar contour. De kans op overlijden is op deze contour gelijk aan één op de honderdduizend per jaar. Op een grotere afstand van de windturbine ligt de 10^{-6} per jaar contour, waar de kans op overlijden één op een miljoen per jaar is.

Voor de risicocontouren met generieke gegevens gelden de volgende vuistregels. Dit zijn conservatieve waarden:

1. De $PR = 10^{-6}$ per jaar contour is gelijk aan de hoogste waarde van of de ashoogte plus een halve rotordiameter of de maximale werpafstand bij nominaal rotortoerental.
2. De $PR = 10^{-5}$ per jaar contour is gelijk aan de halve rotordiameter.

2 Bladbreek

2.1 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 dit hoofdstuk 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 kansen van de verschillende faalscenario's worden beschouwd in Hoofdstuk 6. In dit hoofdstuk is beschreven hoe deze gegevens moeten worden gebruikt om de trefkans te berekenen in het geval van bladbreek. Ten aanzien van de gevolgen van bladbreek wordt voor personen verondersteld dat treffen fataal is. Ook voor objecten (bijvoorbeeld opslagtanks) wordt aangenomen dat het object faalt bij treffen door een blad.

Er zijn drie werpmodellen beschikbaar voor het bepalen van de trefkans als gevolg van bladbreek. De modellen 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. De keuze voor een van de modellen is vrij. Echter het ballistische model zonder luchtkrachten is het meest simpel in gebruik. De drie modellen worden hieronder beschreven.

Werpmodellen

De drie modellen die beschikbaar zijn voor het berekenen van de baan die een afgebroken blad zal afleggen.

1. Ballistisch model zonder luchtkrachten².
Dit is in wezen het klassieke kogelbaanmodel.
2. Ballistisch model met luchtkrachten (luchtweerstand)^{3,4}.
Ook dit model is gebaseerd op het klassieke kogelbaanmodel. Echter naast de zwaartekracht worden ook de luchtkrachten in het vlak van de rotor (dit is het vlak waarin het afgebroken blad(deel) wegvliegt) en de luchtkrachten loodrecht op het vlak

van de rotor in rekening gebracht. Ten gevolge van de luchtkrachten 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 luchtkrachten gecombineerd met zweefvlucht⁵.

Bij dit model wordt de vlucht van het afgebroken blad(deel) in eerste instantie beschreven met bovenstaand ballistisch model met luchtkrachten, waarbij na verloop van tijd het blad in een stabiele zweefvlucht terechtkomt, waarbij de liftkrachten bepalend zijn en niet de luchtkrachten. In de referentie⁵ 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 profieigenschappen), 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

$$f_{Z_{WPT}}(x, y; \Omega) \cdot \Delta x \cdot \Delta y = P\{x < X_{Z_{WPT}} < x + \Delta x, y < Y_{Z_{WPT}} < y + \Delta y\} \quad (2.1)$$

De kansverdelingsfunctie $f_{Z_{WPT}}$ 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, $p_{Z_{WPT}}(x, y)$, 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 paragraaf 6.3.2 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,

$$p_b = f_b(\Omega), \Omega_{\min} < \Omega < \Omega_{\max} \quad (2.2)$$

of voor een aantal discrete waarden van het toerental

$$p_{b,i} = p_b(\Omega_i), i = 1, \dots, N_S \quad (2.3)$$

met N_S het aantal scenario's waarbij bladbreuk kan optreden. Ook is een combinatie van beide mogelijk, bijvoorbeeld voor de toerentallen 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:

$$p_{ZWPT}(x, y) = \int_{\Omega_{\min}}^{\Omega_{\max}} f_{ZWPT}(x, y; \Omega) \cdot f_b(\Omega) \cdot d\Omega + \sum_{i=1}^{N_S} f_{ZWPT}(x, y; \Omega_i) \cdot p_{b,i} \quad (2.4)$$

In paragraaf 2.2 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 terecht komt, $p_{ZWPT}(x, y)$, 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 paragraaf 2.3 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 paragraaf 2.2 zijn twee werpmodellen beschreven waarmee de kansverdelingsfunctie f_{ZWPT} , en de kans op inslag p_{ZWPT} kan worden berekend.

2.2 Werpmodellen

In deze sectie worden de vergelijkingen behorende bij het ballistisch model *zonder* luchtkrachten en het ballistisch model *met* luchtkrachten 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 luchtkrachten is gebaseerd op het kogelbaanmodel, maar hierbij worden de luchtkrachten 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 verwaarloosd⁶.

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 is⁵.

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 luchtkrachten 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 luchtkrachten erg groot kan worden.

Weerstandskrachten loodrecht op rotorvlak

De luchtkracht 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 luchtkrachten. Bij het kogelbaanmodel wordt dus impliciet aangenomen dat de invloed van de windrichting is te verwaarlozen. Daarnaast wordt voor de positie van de

rotor wordt aangenomen dat deze uniform verdeeld is. 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.

2.2.1 Ballistisch model zonder luchtkrachten

2.2.1.1 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]

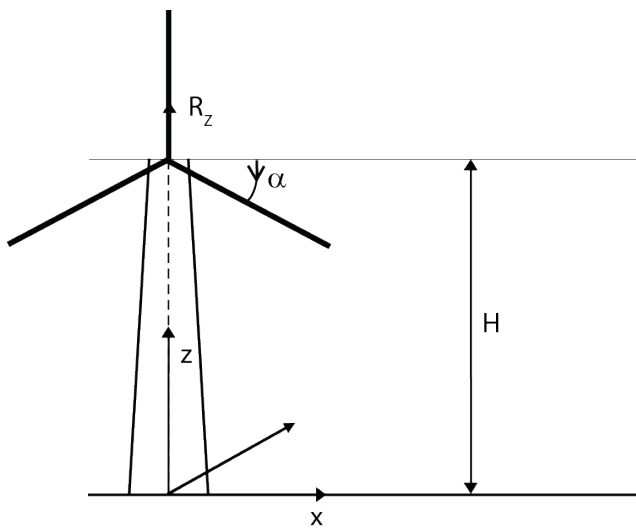
Ω : toerental van de rotor [rad/s]

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

α : azimuthhoek [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

$$\ddot{x}(t) = 0, \ddot{y}(t) = 0, \ddot{z}(t) = -g \quad (2.5)$$

Met de beginvoorwaarden

$$\begin{aligned} x(0) &= R_z \cos \alpha, y(0) = 0, z(0) = H - R_z \sin \alpha, \\ \dot{x}(0) &= -\Omega R_z \sin \alpha, \dot{y}(0) = 0, \dot{z}(0) = -\Omega R_z \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

$$\begin{aligned} x(t) &= R_z \cos \alpha - \Omega R_z t \sin \alpha \\ y(t) &= 0 \\ z(t) &= H - R_z \sin \alpha - \Omega R_z t \cos \alpha - \frac{gt^2}{2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

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

$$t_i = -\frac{\Omega R_z \cos \alpha}{g} + \sqrt{\frac{2}{g} \left(H - R_z \sin \alpha + \frac{\Omega^2 R_z^2 \cos^2 \alpha}{2g} \right)} \quad (2.8)$$

Substitutie van (2.8) in (2.7) geeft voor een bepaald toerental de afgelegde afstand, r , als functie van de azimuthhoek ten tijde van bladbreuk, ofwel

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = x = h(\alpha; \Omega) \quad (2.9)$$

De werpafstand r 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.

2.2.1.2 Verdelingsfuncties

De kansverdelingsfunctie f_{ZWPT} geeft de kans per m^2 dat het zwaartepunt op een bepaalde plek terechtkomt 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_{ZWPT} 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 terechtkomt, is gegeven door:

$$\begin{aligned} f_R(r; \Omega)dr &= P\{r < R < r + dr\} \\ &= P\{h^{-1}(r; \Omega) < \alpha < h^{-1}(r + dr; \Omega)\} \\ &= F_A(h^{-1}(r + dr; \Omega)) - F_A(h^{-1}(r; \Omega)) \end{aligned} \quad (2.10)$$

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

$$f_A(\alpha) = \frac{d}{d\alpha} F_A(\alpha) = \frac{1}{2\pi}, 0 \leq \alpha \leq 2\pi \quad (2.11)$$

Geldt nu

$$f_R(r; \Omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dr} h^{-1}(r; \Omega) \quad (2.12)$$

Opmerking: 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

$$f_{ZWP}(x, y; \Omega) = f_{ZWP}(r; \Omega) = \frac{1}{2\pi r} f_R(r; \Omega) \quad (2.13)$$

2.2.2 Ballistisch model met luchtkrachten

2.2.2.1 Uitgangspunten

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

- Zwaartekracht
- Luchtkrachten.

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

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 weggeworpen object (bijvoorbeeld 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:

$$D = \frac{1}{2} \rho v_z^2 A C_D \quad (2.14)$$

Waarin:

ρ = luchtdichtheid [kg/m³]

v_z = snelheid zwaartepunt van blad t.o.v. de lucht [m/s]

A = oppervlakte van blad in richting van stroming [m²]

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 varieert⁶. 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 variëren⁶. 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.

2.2.2.2 Bewegingsvergelijking

Het algemene beeld van een worp is dat een blad wegvliegt in het vlak van de rotor. Het blad zal in de richting van het rotorvlak, door de kwadratisch toenemende luchtweerstand, minder ver komen dan zonder luchtweerstand het geval zou zijn geweest. Bovendien zorgt de wind ervoor dat het blad dwars op de richting van het rotorvlak gaat afwijken van de oorspronkelijke werprichting.

Introductie van de luchtkrachten in het ballistische model leidt er toe dat de enkelvoudige baanvergelijking (2.5–2.6) 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:

$$\begin{aligned}
 |u(t)| &= \sqrt{u_x^2(t) + u_y^2(t) + u_z^2(t)} & (2.15) \\
 \frac{du_x}{dt} &= -\mu_x u_x |u(t)| \\
 \frac{du_y}{dt} &= -\mu_{yz} u_y |u(t)| \\
 \frac{du_z}{dt} &= -g - \mu_{yz} u_z |u(t)| \\
 \frac{dx}{dt} &= u_x + w_x \\
 \frac{dy}{dt} &= u_y + w_y \\
 \frac{dz}{dt} &= u_z
 \end{aligned}$$

De volgende randvoorwaarden gelden:

$$\begin{aligned}
 u_y(0) &= -rot u_0 \sin \varphi \\
 u_x(0) &= -rot u_0 \cos \varphi \\
 x(0) &= 0 \\
 y(0) &= cg \cos \varphi \\
 z(0) &= h - cg \sin \varphi
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

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

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

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

Waarin:

$C_{D,i}$	luchtweerstand- of dragcoëfficiënt in richting x of y
A	oppervlakte van weggeworpen blad(deel)
m	massa van weggeworpen (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 ruwheidheidslengte (0,03 m)
γ	kruihoeck
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
g	valversnelling zwaartekracht (9.81 m/s ²)

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.

2.2.2.3 Verdelingsfuncties

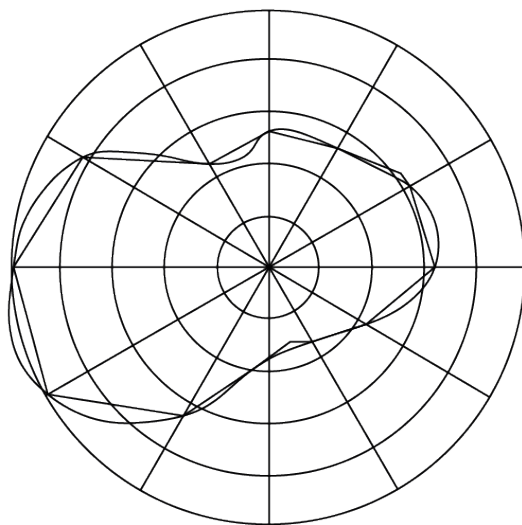
De kansverdelingsfunctie f_{ZWPT} geeft opnieuw de kans dat het zwaartepunt van het blad op een bepaalde plek terechtkomt gegeven bladbreuk. Worden de additionele parameters die de luchtkrachten op het blad bepalen constant genomen dan geldt de afleiding die in paragraaf 2.2.1.2 is gemaakt nog steeds, zij het dat de afstand r niet gegeven wordt door de daar gedefinieerde $h(a, \Omega)$, maar volgt uit de oplossing van het stelsel $U'_{xyz}(a, \Omega, \theta_w, v_w, C_D)$. Hierin zijn:

C_D	de luchtweerstand- of dragcoëfficiënt
θ_w	de windrichting
v_w	de windsnelheid.

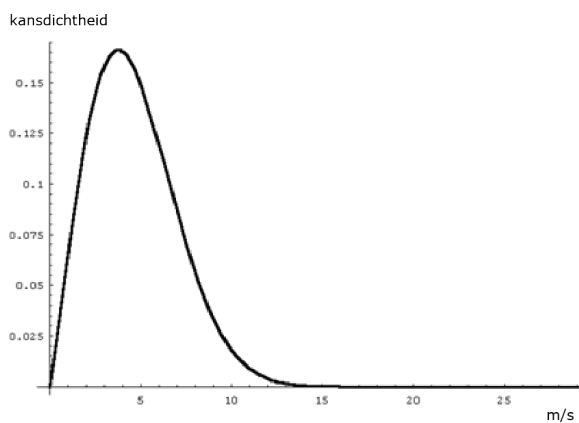
De kansverdelingsfunctie wordt gecompliceerder als ook de additionele parameters als stochasten worden behandeld. In de praktijk zal dit betekenen dat op simulatie moet worden overgegaan.

De luchtweerstand coëfficiënt wordt in het algemeen constant verondersteld. De windrichtingverdeling en windsnelheidsverdeling zijn voor een groot aantal plaatsen in Nederland bekend⁷ of te berekenen⁸.

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



Figuur 2: Relatieve windrichtingverdeling Vlissingen⁷.



Figuur 3: Windsnelheidsverdeling (noord), Vlissingen⁷.

2.2.3 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 vergelijking 2.4).

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 tussen 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 de in Hoofdstuk 6 beschreven statistiek zeer klein.

1. Bladbreuk tijden 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. Bladbreuk tijden 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 1⁹.

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

$$p_{ZWPT}(x, y) = \sum_{i=1}^2 f_{ZWPT}(x, y; \Omega_i) \cdot p_{b,i} \quad (2.17)$$

Aangenomen wordt dat het toerental bij overtoeren gelijk is aan twee keer het nominale toerental.

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 vrijlooptoerental⁹.

2.3 Trefkansberekeningen

2.3.1 *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). 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.

2.3.2 *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_{ZWPT} constant is in het gebied rondom de persoon, is de trefkans van een persoon die permanent aanwezig is op positie (x^*, y^*) , gegeven door

$$p_p(x^*, y^*) = 1,5 \cdot A_c \cdot p_{ZWPT}(x^*, y^*) \quad (2.18)$$

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

$$R \leq \frac{d}{2} + \frac{c}{2} \quad (2.19)$$

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:

$$-\arcsin\left(\frac{c+d}{2R}\right) \leq \varphi \leq \arcsin\left(\frac{c+d}{2R}\right) \quad (2.20)$$

Waarbij

$$\frac{d}{2} + \frac{c}{2} \leq R \leq L_1 \quad (2.21)$$

Voor het tipsegment en

$$\frac{d}{2} + \frac{c}{2} \leq R \leq L_2 \quad (2.22)$$

Voor het wortelsegment.

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

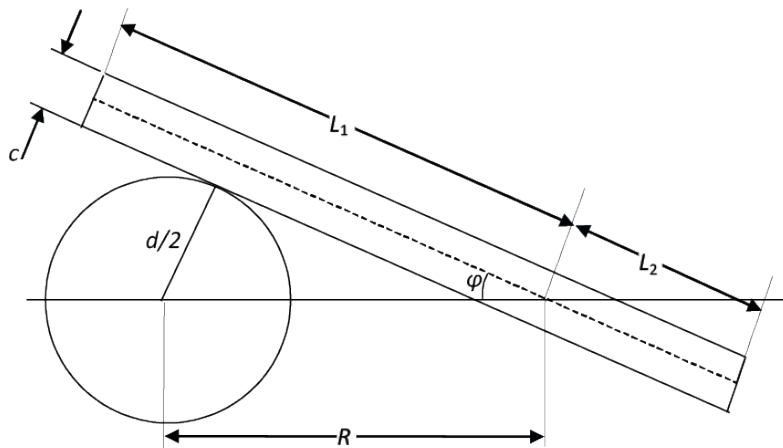
$$p = \frac{2\varphi}{2\pi} \quad (2.23)$$

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

$$p(R) = \frac{2\varphi(r)}{2\pi} \cdot 2\pi \cdot dR \quad (2.24)$$

zodat het kritiek oppervlak gelijk is aan

$$A_c = \pi \left(\frac{d}{2} + \frac{c}{2} \right)^2 + \int_{\frac{d+c}{2}}^{\frac{d}{2}+L_1} 2\varphi(r)rdr + \int_{\frac{d+c}{2}}^{\frac{d}{2}+L_2} 2\varphi(r)rdr \quad (2.25)$$



Figuur 4: Berekening kritiek oppervlak.

2.3.3 Wegen

2.3.3.1 Infrastructuur

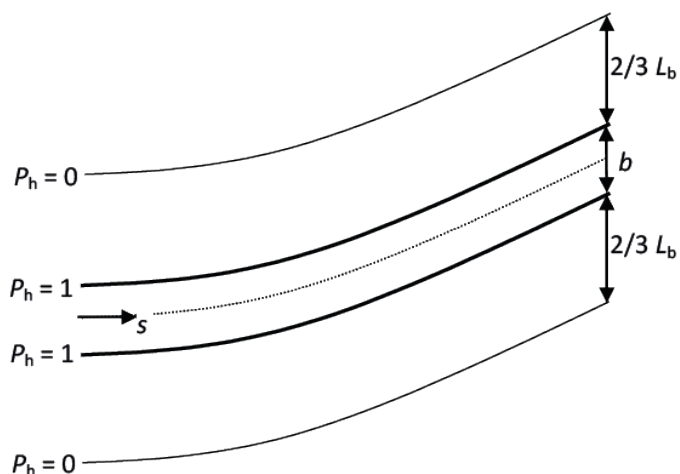
De kans dat een weg met breedte b wordt getroffen door een afgebroken blad is (zie Figuur 5):

$$p_w = F_a \int_s p_{ZWP_T}(s) ds \quad (2.26)$$

Waarbij s de contour langs de weg weergeeft en:

$$F_a = \left(b + \frac{2}{3} L_b \right) \quad (2.27)$$

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



Figuur 5: Overzicht parameters infrastructuur.

2.3.3.2 Passanten

De kans dat een passerende auto, trein of schip wordt geraakt kan uit (2.26) 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:

$$F_a = \frac{L_0}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \left(1,5 \cdot b_0 + \frac{2}{3} L_b \right) \quad (2.28)$$

Met

- L_0 : lengte van het passerende object [m]
- v_0 : snelheid van het passerende object [m/s]
- b_0 : breedte van het passerende object [m].

De factor 1,5 in bovenstaande vergelijking is weer de schaduwfactor, 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 RWS¹⁰ dient een persoon te worden beschouwd die onbeschermd voorbij komt. Op basis van vergelijking (2.26) en vergelijking (2.18) kan dus worden

afgeleid dat de kans dat een passerend individu wordt geraakt, kan worden berekend met:

$$F_a = \frac{1}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} 1,5 \cdot A_c \quad (2.29)$$

Met

v_0 : snelheid van de passant [m/s]

A_c : kritiek oppervlak van het afgebroken blad [m²].

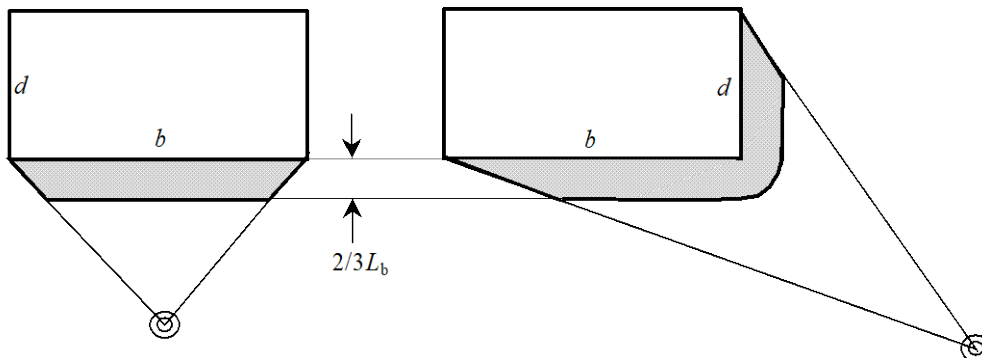
2.3.4 *Ruimtelijke objecten*

In het vervolg zullen ruimtelijke objecten (gebouwen en bouwwerken) worden aangegeven als "gebouwen", maar hiermee worden ook andere objecten bedoeld, zoals 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 paragraaf 2.3.3.1. Indien de breedte van de gebouwen zich beperkt tot enkele meters dan kan de vereenvoudigde aanpak zoals beschreven in paragraaf 2.3.3.2 worden toegepast.

2.3.4.1 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 van een gebouw worden getroffen. Komt het zwaartepunt op de binnenrand van het gearceerde gebied, AR, terecht 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 $2/3L_b$ van de gevel ligt. Het verloop van de kans p_h 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

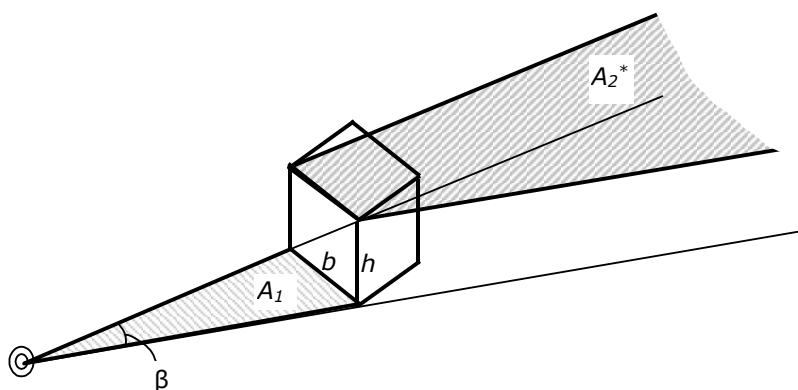
$$p_{gi} = \int_{A_R} p_h(x, y) \cdot p_{ZWPT}(x, y) dA \quad (2.30)$$

Met de veronderstelling, dat p_{ZWPT} constant is in het gebied A_R voor de gevel, gaat (2.30) over in

$$p_{gi} = b \cdot \frac{L_b}{3} p_{ZWPT}(x^*, y^*) \quad (2.31)$$

$$p_{gi} = (b + d) \cdot \frac{L_b}{3} p_{ZWPT}(x^*, y^*) \quad (2.32)$$

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



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:

$$p_{gd} = p_{\beta} - \int_{A_1} p_{ZWTP}(x, y) dA - \int_{A_2^*} p_{ZWTP}(x, y) dA \quad (2.33)$$

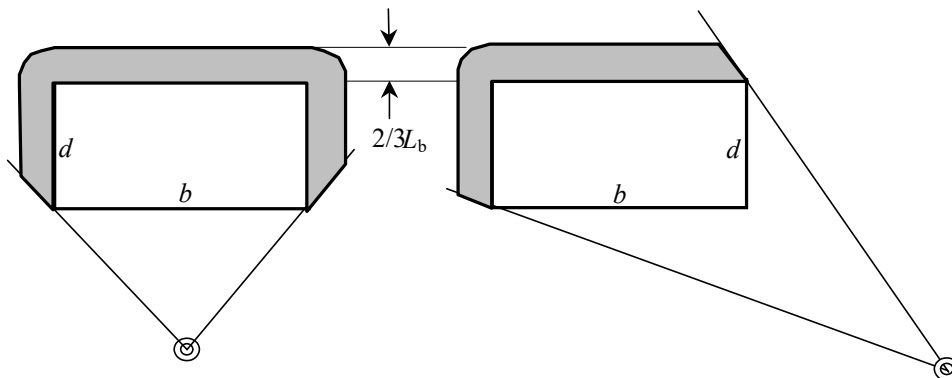
waarbij p_{β} de kans geeft dat het zwaartepunt in het cirkelsegment met hoek β terechtkomt.

De kans dat het zwaartepunt in gebied A_2^* terechtkomt, 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 .

Vergelijking (2.33) kan nu worden herschreven als

$$\begin{aligned} p_{gd} &= p_{\beta} - \int_{A_1} p_{ZWTP}(x, y) dA - \int_{A_2} p_{ZWPT}^h(x, y) dA \\ &= p_{\beta} - \int_{A_1} p_{ZWTP}(x, y) dA - \left(p_{\beta} - \int_{A_1} p_{ZWPT}^h(x, y) dA \right) \\ &= \int_{A_1} p_{ZWPT}^h(x, y) dA - \int_{A_1} p_{ZWTP}(x, y) dA \end{aligned} \quad (2.34)$$

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 terechtkomt is

$$p_{d_d} = \int_{A_d} p_{ZWTP}^h(x, y) dA \quad (2.35)$$

waarbij A_d het dakoppervlak weergeeft.

Met de veronderstelling, dat p_{ZWTP}^h constant is in het gebied A_d gaat (2.35) over in

$$p_{d_d} = p_{ZWTP}^h(x^*, y^*) \cdot A_d \quad (2.36)$$

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

$$p_{d_i} = \int_{A_R} p_{ZWTP}^h(x, y) dA \quad (2.37)$$

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_{ZWTP}^h constant is in het gebied voor de gevel gaat (2.37) over in:

$$p_{d_i} = (b + 2d) \cdot \frac{L_b}{3} \cdot p_{ZWTP}^h(x^*, y^*) \quad (2.38)$$

Of:

$$p_{d_i} = (b + d) \cdot \frac{L_b}{3} \cdot p_{ZWTP}^h(x^*, y^*) \quad (2.39)$$

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:

$$p_O = p_{O_d} + p_{O_i} \quad (2.40)$$

Met:

$$\begin{aligned} p_{O_d} &= p_{g_d} + p_{d_d} \\ p_{O_i} &= p_{g_i} + p_{d_i} \end{aligned} \quad (2.41)$$

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.

2.3.4.2 Raakfrequentie: Vereenvoudigde aanpak

In paragraaf 2.3.3.1 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 genomen:

$$h > 10 \cdot l \cdot \frac{r^2}{R^2} \quad (2.42)$$

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 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).

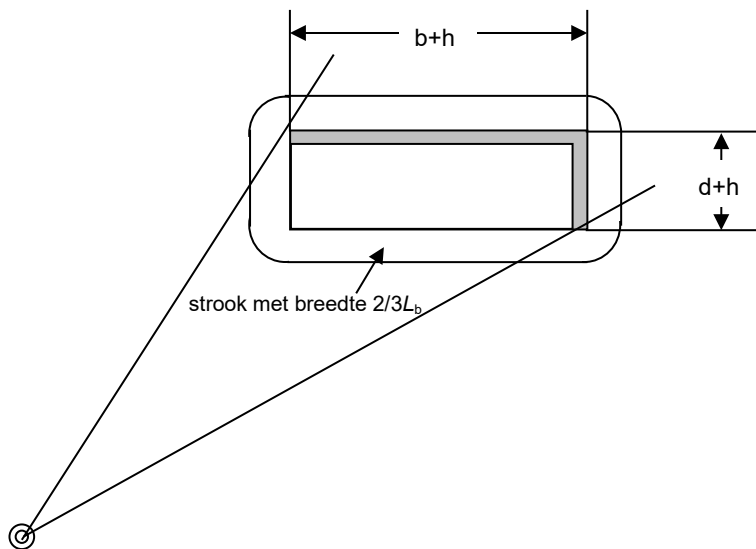
$$A_{pr} = (b + h) \cdot (d + h) \quad (2.43)$$

waarmee de hoogte van het object wordt verdisconteerd. Analoog aan vergelijking (2.36) is de kans dat het zwaartepunt van het blad op het geprojecteerde oppervlak terechtkomt.

$$p_{O_d} = \int_{A_{pr}} p_{ZWPT}(x, y) dA \quad (2.44)$$

Met de veronderstelling, dat p_{ZWPT} constant is in het gebied A_{pr} gaat (2.44) over in

$$p_{O_d} = p_{ZWPT}(x^*, y^*) \cdot A_{pr} \quad (2.45)$$



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:

$$p_{O_i} = p_{ZWPT}(x^*, y^*) \left((2b + 2d) \cdot \frac{1}{3} \cdot L_b + \frac{\pi}{2} \left(\frac{2}{3} L_b \right)^2 \right) \quad (2.46)$$

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

$$p_0 = p_{O_d} + p_{O_i} \quad (2.47)$$

Bij vergelijking (2.45) en (2.46) is verondersteld dat p_{ZWPT} constant is over het oppervlak A_{pr} en de strook met breedte $2/3L_b$ ook. Indien dit niet het geval is kunnen de trefkansen als volgt worden berekend

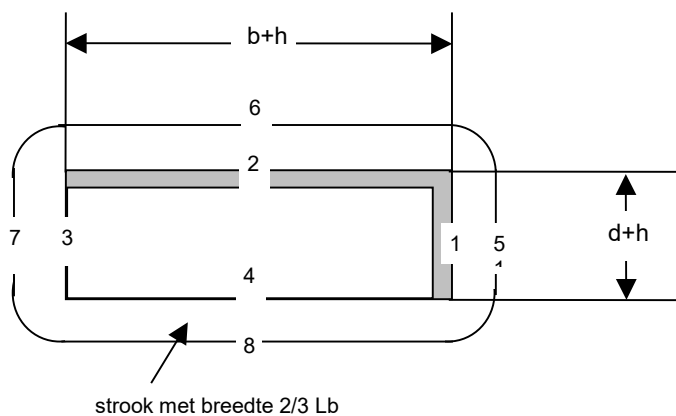
$$p_{O_d} = \bar{p}_{ZWPT} \cdot A_{pr} \quad (2.48)$$

$$p_{O_i} = \bar{p}_{ZWPT,b} \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot L_b + \bar{p}_{ZWPT,d} \cdot d \cdot \frac{2}{3} \cdot L_b + \frac{\pi}{2} \left(\frac{2}{3} \cdot L_b \right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{p}_{ZWPT,b} + \bar{p}_{ZWPT,d}}{2} \right) \quad (2.49)$$

\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).



NB: Deze methode is niet geschikt voor hele grote objecten.

2.3.4.3 Kritieke raakfrequentie

Vergelijking (2.47) of (2.49) 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

$$p_{kr} = (1 - f_{b,d}) \cdot p_{O_d} + (1 - f_{b,i}) \cdot p_{O_i} \quad (2.50)$$

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 ontwerpspecificaties 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.

2.3.5 Gebieden

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

$$p_A = \int_A p_{ZWPT}(x,y) dA \quad (2.51)$$

3 Mastbreuk

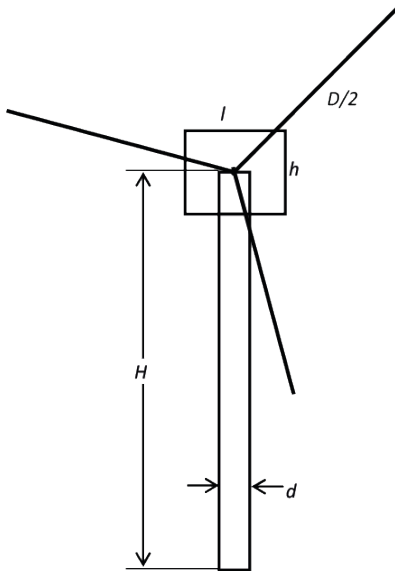
In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de trefkans als gevolg van mastbreuk kan worden bepaald. Als gevolg van mastbreuk kan een persoon of object getroffen worden door de mast of door de gondel met rotor die op de grond terecht komen. Het risico van dit scenario kan worden berekend door de trefkans te vermenigvuldigen met de betreffende faalfrequentie voor deze scenario's. De faalfrequenties zijn te vinden in Hoofdstuk 6.

3.1 Trefkansberekeningen

3.1.1 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.



Figuur 10: Afmetingen windturbine.

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

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:

$$P_p = P_{mb} \cdot \frac{d}{2\pi r} \quad (3.1)$$

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

$$P_n = P_{mb} \cdot \frac{l}{2\pi r} \quad (3.2)$$

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:

$$P_r = P_{mb} \cdot \frac{D}{2\pi r} \cdot s \quad (3.3)$$

waarbij s de solidity aangeeft, ofwel de verhouding tussen het totale bladoppervlak en het oppervlak van de rotor. In Tabel 23 staan algemene waarden voor de solidity gegeven.

3.1.2 *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 11) met straal:

$$R = H + D/2 \quad (3.4)$$

en hoek:

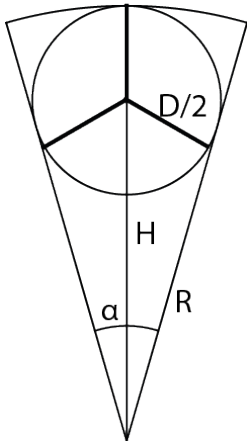
$$\alpha = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{D}{2H} \right) \quad (3.5)$$

waarbij

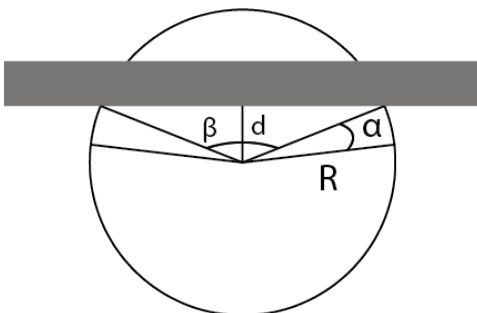
D : Diameter van de rotor [m]

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, wat is geïllustreerd in Figuur 11.



Figuur 11: Windturbine gemodelleerd als cirkelsegment.



Figuur 12: Turbine in aanraking met infrastructuur. De grijze balk stelt de betreffende infrastructuur voor.

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

$$\begin{aligned}
 P_r &= p_{mb} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[\beta + 2 \frac{\alpha}{2} \right] & (3.6) \\
 &= p_{mb} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{d}{H + D/2} \right) + 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{D/2}{H} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Waarbij:

D : Diameter van de rotor [m]
 H : Ashoogte [m]
 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:

$$\tau = \frac{L_0}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (3.7)$$

Met:

L_0 : lengte van het passerende object [m]
 v_0 : 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 ProRail en RWS¹⁰ 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. (3.7) te vermenigvuldigen met de verblijfsfactor

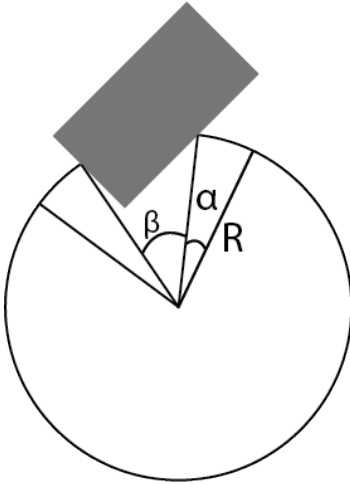
$$\tau = \frac{0,3}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (3.8)$$

Met:

v_0 : snelheid van passant [m/s]

3.1.3 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 wat 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:

$$P_g = P_{mb} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[\beta + 2 \frac{\alpha}{2} \right] \quad (3.9)$$

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

4 Incidenten binnen de rotordiameter

4.1 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 mast is geslagen
4. het naar beneden vallen van brokken ijs tijdens stilstand.

In het kader van deze handleiding 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 4.1.1. De scenario's ten gevolge van de overige incidenten worden in paragraaf 4.1.2 t/m 4.1.4 kwalitatief beschreven met aanbevelingen voor een kwantitatieve analyse.

4.1.1 *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 mast dat gelijk is aan de rotordiameter.

4.1.2 *Kleine Onderdelen uit de Gondel of de Rotor*

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

4.1.3 *Bladfragmenten na Botsing met Toren*

Nadat een turbine bijvoorbeeld in onbalans is gekomen of nadat een blad beschadigd is door blikseminslag kan het voorkomen dat een blad tegen de mast 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.

4.1.4 *IJsafwerping*

Uit ervaring is bekend dat in Nederland ijsafzetting op de bladen meestal ontstaat tijdens stilstand van de turbine. Bij kans op ijsvorming worden de turbines automatisch stilgezet (beveiliging), tot de oorzaak van het buiten werking stellen is opgeheven. Observaties van dit fenomeen hebben laten zien dat bij een kleine beweging of doorbuiging van het blad, wat 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 enkele 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 bijvoorbeeld 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. Volgens schattingen van de opstellers van het handboek (2005) komt de situatie in Nederland maximaal twee keer per jaar voor. 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.

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.

5 Incidenten met buisleidingen

5.1 Ondergrondse buisleidingen

5.1.1 Raakfrequentie tracé

Ondergrondse leidingen kunnen falen door de impact van een zwaar voorwerp op de grond.

De methodiek die gebruikt wordt om de raakkans te berekenen is afgeleid uit onderzoek naar de uitwerking van explosieven op ondergrondse pijpleidingen¹¹.

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.

$$R = 0,3048 \cdot \left(\frac{4,44E}{\sigma_{\text{toelaatbaar}}} \right)^{\frac{1}{k_5 k_6}} \cdot \left(\frac{2,03 \cdot 10^{-4} \cdot k_4 \cdot E_{\text{kinetisch}}}{\sqrt{E} \cdot t} \right)^{\frac{1}{k_5}} \quad (5.1)$$

Waarbij:

- R : de kritische afstand [m]
 E : elasticiteit [Pa]
 $\sigma_{\text{toelaatbaar}}$: toelaatbare extra stress voordat metaal gaat vloeien [Pa]
 t : wanddikte [mm]
 $E_{\text{kinetisch}}$: 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

De coëfficiënten voor een puntbron worden gebruikt bij het treffen van een leiding door de gondel, rotor of turbineblad. De coëfficiënten voor de lijnbron worden gebruikt voor het treffen van de leiding door de mast bij mastbreuk.

Opgemerkt wordt dat de empirische coëfficiënten k_4 , k_5 en k_6 wel een fysische eenheid hebben ook al zijn het constanten. De eenheid van de empirische coëfficiënten is verschillend voor puntbron en lijnbron.

Voor een pijpleiding is de nog toelaatbare extra stress voordat vervorming optreed gelijk aan de *SMYS* – de hoopstress:

$$\sigma_{\text{toelaatbaar}} = SMYS - \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \quad (5.2)$$

$\sigma_{\text{toelaatbaar}}$: 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 ($m \times g \times h$). 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 inslag van een blad met de grond zal onder een hoek zijn in plaats van volledig verticaal. De energie die de grond opneemt is hierdoor slechts een deel

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 feet. Door te corrigeren met deze factor wordt in de formule met dezelfde energiedichtheid gerekend.

van de kinetische energie. De resterende 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.

Aanbevolen wordt 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 ($m \times g \times h$) wordt, op enige wrijving na, volledig omgezet in kinetische energie. Hierdoor betreft bovenstaande correctiefactor alleen de initiële bewegingsenergie van het turbineblad.

$$E_{\text{schokgolf}} = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot f \cdot m \cdot v^2 \text{ met } v = \frac{2\pi\omega}{60} \cdot \frac{l}{3} \quad (5.3)$$

$E_{\text{schokgolf}}$:	de energie van de bron (effectieve kinetische energie van de schokgolf) [J]
m :	massa van het object [kg]
f :	fractie van de initiële kinetische energie opgenomen door de bodem (≤ 1)
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.

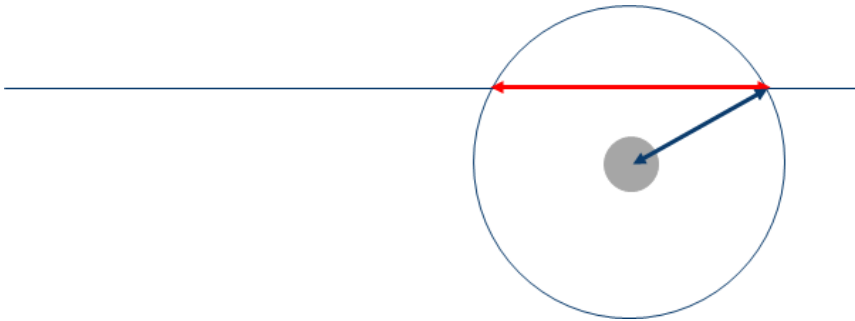
Voor de hoogte van het vallend object wordt voor zowel de gondel als het turbineblad de masthoogte gehanteerd. De hoogte van het massamiddelpunt van de gondel ofwel het turbineblad ten opzichte van deze masthoogte wordt hierbij verwaarloosd.

5.1.2 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 14. 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 14: 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:

$$\text{Breedte kritische strook} \begin{cases} 0 < d < R = 2 \cdot \sqrt{R^2 - d^2} \\ d \geq R = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

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 $2 \cdot R$ ($d = 0$; pijpleiding aan het aardoppervlak) tot 0 (pijpleiding dieper dan de kritische afstand R).

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.

$$P = \iint_{\text{Kritt. Opp}} F(x,y) dx dy \quad (5.5)$$

P : kans

$F(x,y)$: kansdichtheidsverdeling

Kritt. 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.

5.1.3 *Rekenvoorbeelden ondergrondse buisleidingen*

Voorbeeld gondel en/of rotorafworp

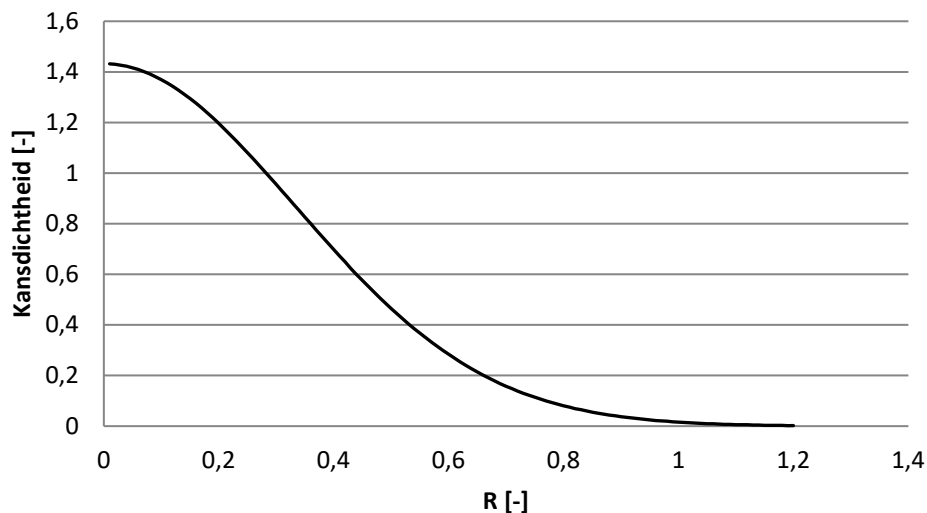
Om het scenario van gondel en/of rotorafworp in een risicoanalyse mee te kunnen nemen, dient een kansdichtheidsverdeling van de trefkanslocatie bekend te zijn. Er is echter onvoldoende casuïstiek bekend om een verdeling af te kunnen leiden van incidenten. Wel kunnen er foto's van dergelijke incidenten 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 de handleiding 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.

Het meest voor de hand liggende effectgebied is een cirkel rondom de voet van de windturbine. Er is niet genoeg data beschikbaar om een kansverdeling te kiezen voor dit tweedimensionale domein. Een bivariate normale verdeling lijkt, bij gebrek aan data, een acceptabele keuze aangezien hierbij 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 bivariate normale verdeling kan in beide richtingen x en y dezelfde standaarddeviatie σ gekozen worden en een verwachting van 0: waarden van constante kansverdeling zijn dan concentrische cirkels om de oorsprong.

In Figuur 15 staat de kansdichtheid tweedimensionaal aangegeven langs positieve x -as en $y=0$ om dit te illustreren. De afstand op de x -as is geschaald naar de bladlengte. Te zien is dat de kansverdeling hoger is bij de voet van de windturbine. Bij omzetting naar poolcoördinaten kan kans als volgt berekend worden met behulp van de kansdichtheid:

$$\iint_{\text{Kritt. Opp}} f(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi, \text{ waarbij } f(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5.6)$$

Waarbij $r \geq 0$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$



Figuur 15: Illustratie van kansdichtheid ($\frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$) van de val van de gondel/rotor.

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 (L_b). 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 1.5%) zodat deze verwaarloosd kan worden. Buiten de effectafstand van een bladlengte wordt voortaan dan ook de kans afgekapt op nul.

De bovenkans voor een klein element kan nu worden geschat door deze kansdichtheid, de minimale afstand van het element tot het centrum van de voet van de windturbine en de afmetingen van het element. Door een leiding in segmenten te verdelen, zou op deze manier dus de schatting van de trefkans benaderd kunnen worden voor ieder segment. De trefkansbenadering van de gehele leiding is dan de optelling van deze afzonderlijke kans-benaderingen.

Rekenvoorbeeld

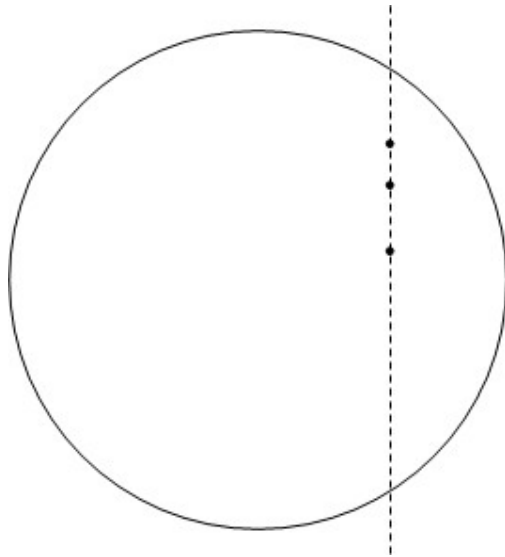
Ter verduidelijking volgt een voorbeeld. Stel, een windturbine heeft een bladlengte van 40m. Een buisleiding ligt op minimale afstand van 16 meter en heeft breedte b en lengte l , De kansdichtheid op 16 meter afstand kan uit de grafiek of tabel worden afgelezen bij $R= 16/40 = 0,4$ en betreft circa 0,7. De boven-kans voor het raken van dit element kan benaderd worden met deze genormaliseerde kansdichtheid maal het oppervlak van het kleine element met eveneens geschaalde breedte en lengte:

$$0,7 \cdot \frac{l}{L_b} \cdot \frac{b}{L_b} = 0,7 \cdot l \cdot b \cdot \frac{1}{40^2} \quad (5.7)$$

Om de kansbenadering per vierkante meter te vinden dient de kansdichtheid gedeeld te worden door de bladlengte in het kwadraat; dit is volgens bovenstaand voorbeeld voor een afstand van 16 meter van de windturbine gelijk aan $0,7 / (40^2) = 4,4 \times 10^{-4}$. Voor toepassing in een kwantitatieve risicoanalyse van een buisleiding kan de raakkans van de buisleiding dan worden afgeschat door de kritische oppervlakte te verdelen in kleine stukjes en afzonderlijk de raakkans per stukje te berekenen aan de hand van bovenstaande bovenafschatting. Deze afschatting dient dan nog te worden vermenigvuldigd met de frequentie van het afvallen van de gondel/rotor, om tot een frequentie per vierkante meter per jaar te komen.

Rekenvoorbeeld

Beschouw onderstaand 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.



Figuur 16: 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.

In dit voorbeeld wordt uitgegaan van een windturbine met mast met hoogte 90 m van 160 ton, een gondel van 50 ton en een blad met lengte 45 m van 7 ton en een nominaal toerental van 18 rpm (omwentelingen per minuut). Voor de pijpleiding wordt uitgegaan van een diameter van 900 mm, wanddikte 14 mm, 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 opvolgende coördinaten weergegeven. Elk x,y punt van de leiding vertegenwoordigt een stukje leidinglengte, welke wordt bepaald door de halve afstand tot beide naburige punten. De punten zijn aangegeven in Figuur 16. 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 opvolgende 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.

Rekenvoorbeeld turbineblad

Uit de specificaties van het turbineblad en de leidingparameters kunnen de volgende waarden van de toelaatbare stress en de schokgolffenergieën worden bepaald:

$$\sigma_{\text{toelaatbaar}} = SMSY - \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} = 414 \cdot 10^6 - \frac{6,6 \cdot 10^6 \cdot 900}{2 \cdot 14} = 202 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

Indien wordt uitgegaan van $f = 0,5$, worden E_{schok} voor het nominaal en 2x nominaal toerental als volgt berekend:

$$\begin{aligned} E_{\text{schok,nom}} &= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{4} \cdot m \cdot v^2 & (5.9) \\ &= 7000 \cdot 9,81 \cdot 90 + \frac{1}{4} \cdot 7000 \cdot \left(\frac{18}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{45}{3} \right)^2 \\ &= 7,6 \text{ MJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{schok,2-nom}} &= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{4} \cdot m \cdot v^2 & (5.10) \\ &= 7000 \cdot 9,81 \cdot 90 + \frac{1}{4} \cdot 7000 \cdot \left(\frac{36}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{45}{3} \right)^2 \\ &= 11,8 \text{ MJ} \end{aligned}$$

Met deze waarden kan de formule voor de kritische afstand worden ingevuld:

$$\begin{aligned} R_{\text{nom}} &= 0,3048 \cdot \left(\frac{4,44 \cdot 210 \cdot 10^9}{202 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,925}} \cdot \left(\frac{2,03 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 7,6 \cdot 10^6}{\sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 14}} \right)^{\frac{1}{2,5}} & (5.11) \\ &= 1,48 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{2\text{-nom}} &= 0,3048 \cdot \left(\frac{4,44 \cdot 210 \cdot 10^9}{202 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,925}} & (5.12) \\ &\quad \cdot \left(\frac{2,03 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 11,8 \cdot 10^6}{\sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 14}} \right)^{\frac{1}{2,5}} = 1,76 \text{ m} \end{aligned}$$

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. $3 \cdot 10^{-5}/\text{m}^2$, (berekende trefkans op 28 meter). Voor 2 x nominaal toerental betreft het circa $2,5 \cdot 10^{-5}/\text{m}^2$.

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 nominaal toerental
 $= 2,5 \text{ m} \times 1,41 \text{ m} \times 3 \times 10^{-5} / \text{m}^2 \times 8,4 \times 10^{-4} / \text{jaar} = 8,9 \times 10^{-8} / \text{jaar}$.

Bijdrage faalfrequentie 2x nominaal toerental
 $= 2,5 \text{ m} \times 2,37 \text{ m} \times 2,5 \times 10^{-5} / \text{m}^2 \times 5,0 \times 10^{-6} / \text{jaar} = 7,4 \times 10^{-10} / \text{jaar}$.

De autonome faalfrequentie (dus zonder invloed van buiten) van een gasleiding met deze parameters betreft circa (afhankelijk van de exploitant) $1 \times 10^{-9} / \text{m} / \text{jaar}$. 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.

5.2 Bovengrondse buisleidingen

Trefkans turbineblad

Beschouwd wordt een leiding met diameter D die zich op een hoogte h bevindt boven het peil ten opzichte waarvan de hoogte van de windturbine is gespecificeerd (zie Figuur 17)

Deze leiding kan direct door het zwaartepunt worden getroffen. Echter ook indien het blad in de buurt van de leiding terechtkomt, is er een kans dat de leiding wordt getroffen. Deze kans neemt af naarmate het blad verder van de leiding terechtkomt. Bij de huidige kunststofbladen ligt het zwaartepunt op circa $1/3$ van de bladlengte, zodat de kans nul wordt als het zwaartepunt verder dan $2/3$ keer de bladlengte van de leiding terechtkomt. Zoals in Figuur 17 is aangegeven kunnen drie gebieden worden onderscheiden:

1. Een strook, A_L , met breedte D , waarin de leiding ligt. Als het zwaartepunt hierop terechtkomt, is de leiding met zekerheid geraakt.
2. Twee stroken, A_R , aan weerszijden van de leiding met breedte $2/3 L_b$, waarbij L_b de lengte van het afgebroken blad is. Als het zwaartepunt op de binnenkant van deze stroken terechtkomt is de kans dat de leiding wordt getroffen $p_h = 1,0$. Deze kans zal verlopen naar $p_h = 0,0$ aan de buitenzijde. Het verloop van de kans p_h is ingewikkeld, maar wordt hier benaderd door een lineair verband.
3. Het gebied buiten de genoemde stroken waar de kans dat de leiding wordt geraakt gelijk aan nul is.

De kans dat een bovengrondse leiding wordt geraakt is nu

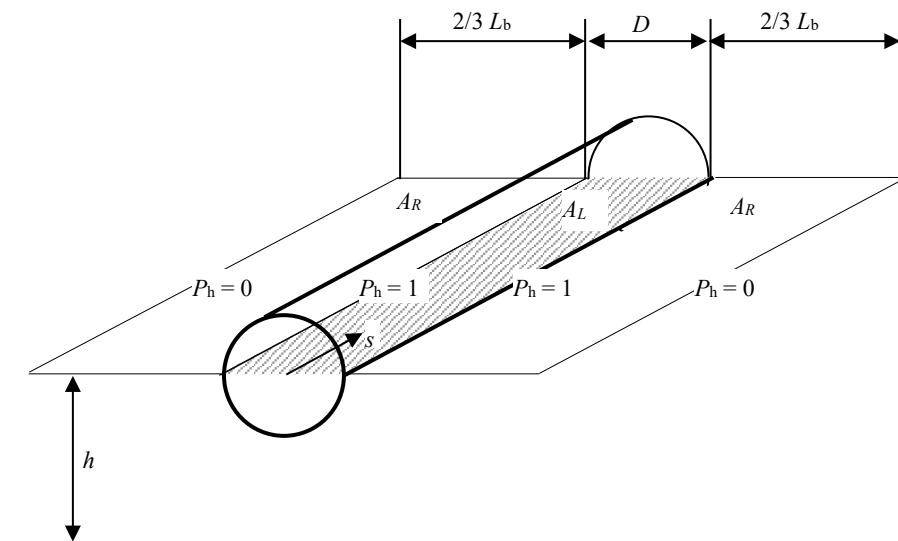
$$p_{ib} = \int_{A_L} p_{ZWPT}^h(x, y) dA + \int_{A_R} p_h(x, y) \cdot p_{ZWPT}^h(x, y) dA \quad (5.13)$$

waarbij $p_{ZWPT}^h(s)$ de kans van inslag geeft voor een windturbine waarvan de totale hoogte met h is verlaagd, ofwel de as-hoogte is gelijk aan $H-h$.

Met de veronderstelling dat p_{ZWPT} constant is over de breedte van de stroken gaat (5.13) over in

$$p_{ib} = \left(D + \frac{2}{3} L_b \right) \int_s p_{ZWPT}^h(s) ds \quad (5.14)$$

waarbij s de contour langs de leiding weergeeft.



Figuur 17: Overzicht parameters bovengrondse leiding.

Trefkans mastbreuk en afvallen gondel/rotor

De trefkans door mastbreuk kan berekend worden zoals beschreven in paragraaf 3.1.2 voor infrastructuur. De afstand d is nu de afstand tot de leiding.

Voor het berekenen van de trefkans van de gondel kunnen de gondel en de leiding op dezelfde hoogte worden verondersteld (zie ook paragraaf 4.1.1).

6 Referenties

¹ Handreiking Windturbines 2019

² H. Braam, "*Het risico van bladbreuk voor passanten van windturbines*", Nederlandse Duurzame Energie Conferentie, pp. 132 - 133, 25 - 26 nov. 1999.

³ Zadel, A. van, "*Werpafstand afgeworpen wiekdeel van een windturbine*", rapport 40297-NUC 93-4874, KEMA 1993

⁴ Zadel, A. van, "*Onderzoek betreffende de kwantificering van de risico's van windturbines*", rapport 40760-NUC 94-4350, KEMA 1994

⁵ A.J. Eggers et al, "*Exploratory study of HAWT blade throw risk to nearby people and property*", Proc. AIAA 2001, pp. 355-367

⁶ Turner, D.M., "*A Monte Carlo method for determining the risk presented by wind turbine blade failures*", Wind Engineering Vol 11, no 1, 1986

⁷ Wieringa, J Rijkoort, P.J., "*Windklimaat van Nederland*", SDU1983

⁸ "*Handboek energieopbrengsten van windturbines*", TNO/Novem, 1989.

⁹ J.F.Macqueen et al, "*Risks associated with wind turbine blade failures*", IEE proc., pp. 574 - 586, Vol. 130 dec 1983.

¹⁰ "*Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen; Beoordeling van veiligheidsrisico's, Rijkswaterstaat en NS Railinfrabeheer*", Doc. Nr. VRWP-99004, 15 april 1999.

¹¹ Pipeline response to buried explosive detonations, volume I + II, E.D. Esparza, P.S. Westine, A. B. Wenzel, Southwest Research Institute, August 1981