

Bijlage C:

Rekenmethodiek Werpafstanden en Trefkansen

Versie 3.1, september 2014

Bewerkt door DNV GL

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 ROTORDIAMETER.....	36
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 ELEKTRISCHE

INFRASTRUCTUUR	39
----------------------	----

7	Bovengrondse buisleidingen 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	42
7.1.3	Horizontaal of verticaal oppervlak?.....	45
7.1.4	Hoogspanningslijnen (langwerpige objecten).....	45
7.2	Mastbreuk	47
7.3	Gondel en rotorafworp.....	48
8	Ondergrondse buisleidingen en ondergrondse hoogspanningskabels.....	50
8.1	Ondergrondse Buisleidingen.....	50
8.1.1	Raakfrequentie tracé	50
8.1.2	Kritische strook.....	52
8.1.3	Rekenvoorbeelden ondergrondse buisleidingen	54
8.2	Ondergrondse hoogspanningskabels.....	60

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 instantie 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]

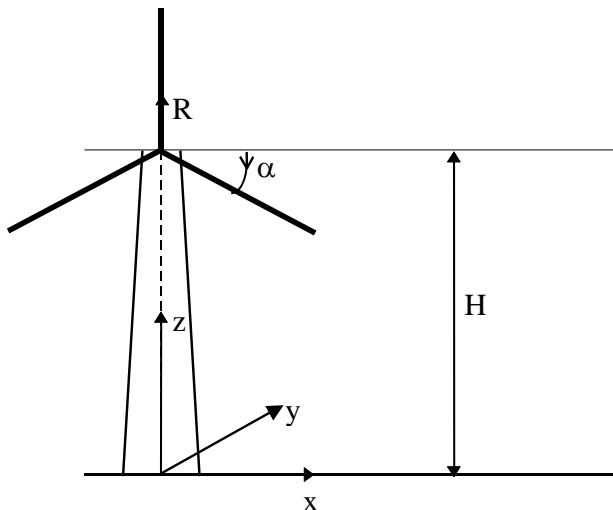
Ω : toerental van de rotor [rad/s]

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_{ZWPT} 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_{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 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

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

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

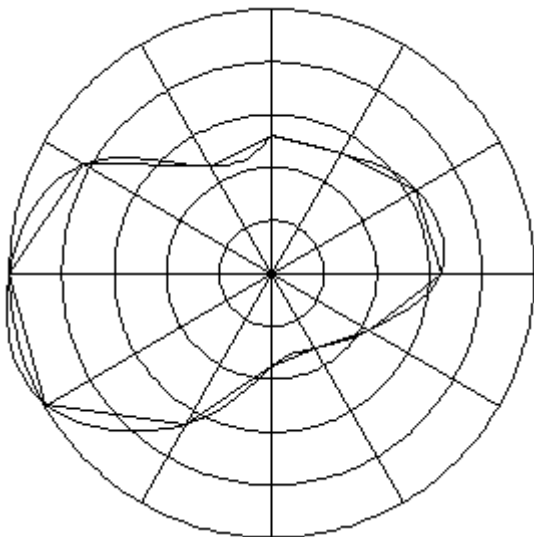
θ_w de windrichting

v_w de windsnelheid.

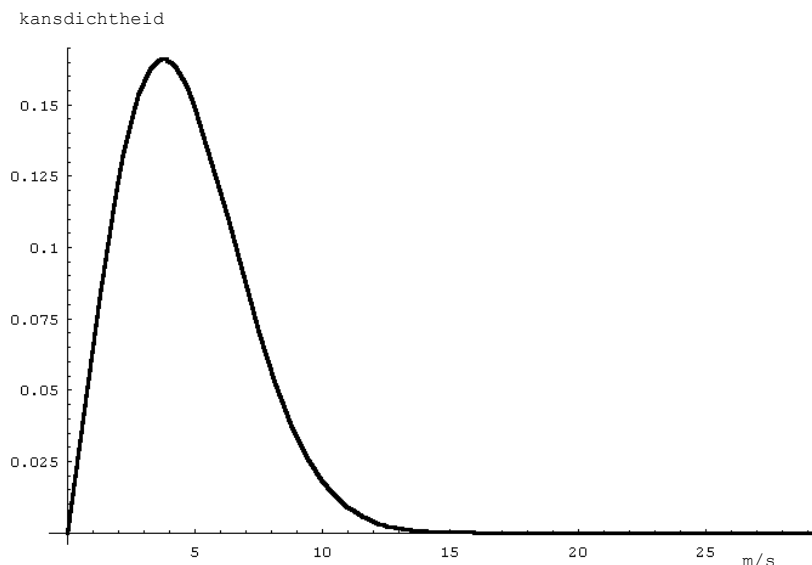
De kansverdelingsfunctie wordt gecompliceerder als ook de additionele parameters als stochasten worden behandeld. In de praktijk zal dit betekenen dat op simulatie moet worden overgegaan.

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), Vlissingen [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_{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

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

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

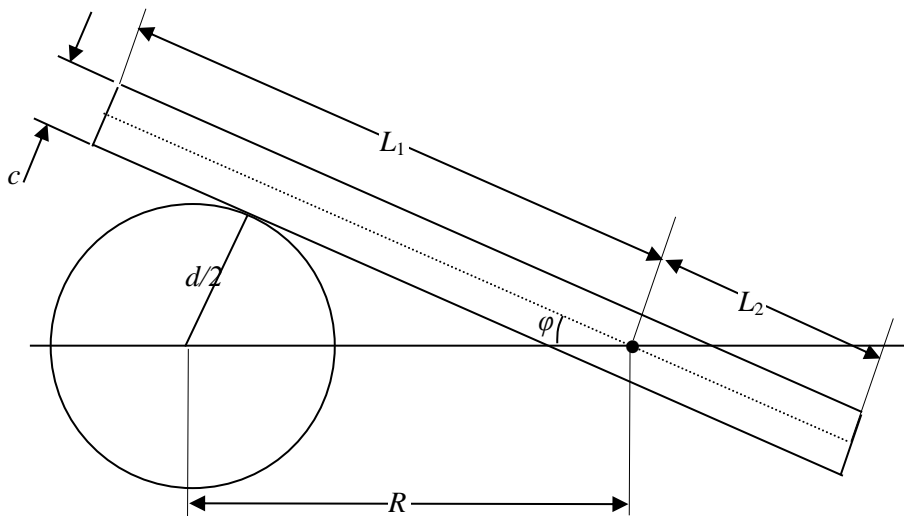
$$p = \frac{2\varphi}{2\pi} \quad (3.1.6)$$

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

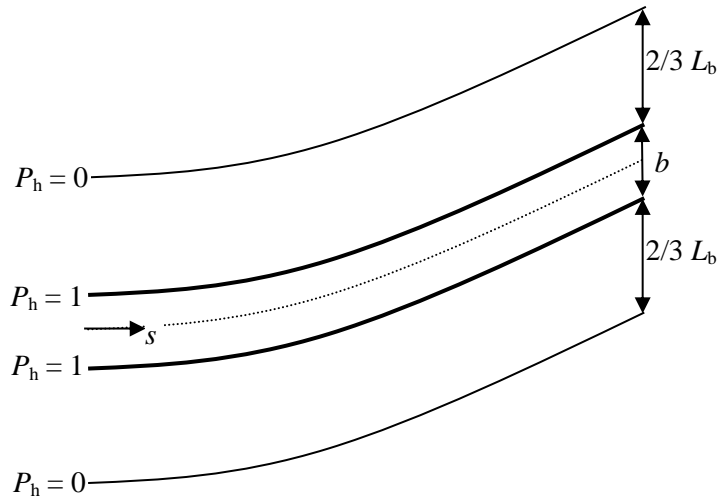
De kans dat een weg met breedte b wordt getroffen door een afgebroken blad is (zie Figuur 5)

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

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].

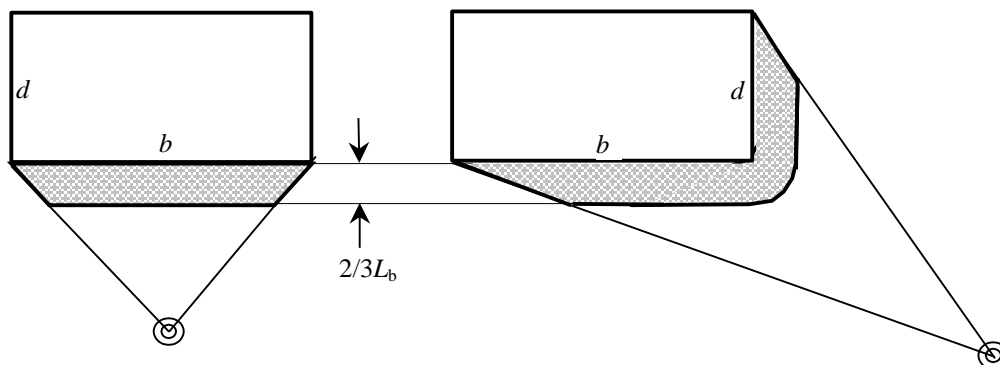
3.3 Ruimtelijke objecten

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

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

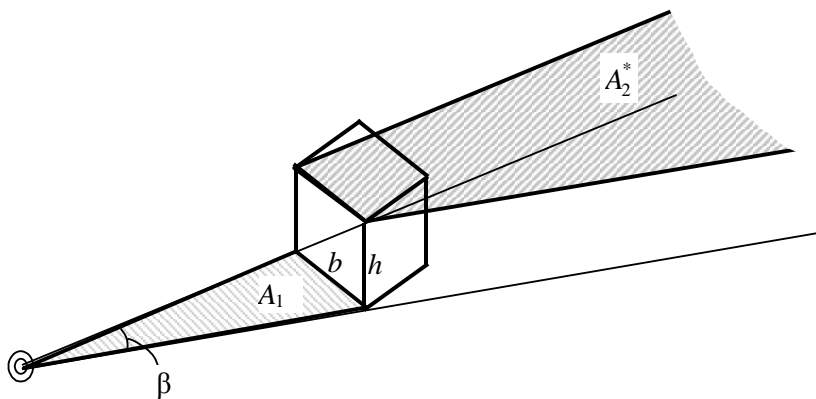
Met de veronderstelling, dat p_{ZWPT} constant is in het gebied A_R voor de gevel, gaat (3.3.1) over in

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

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

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

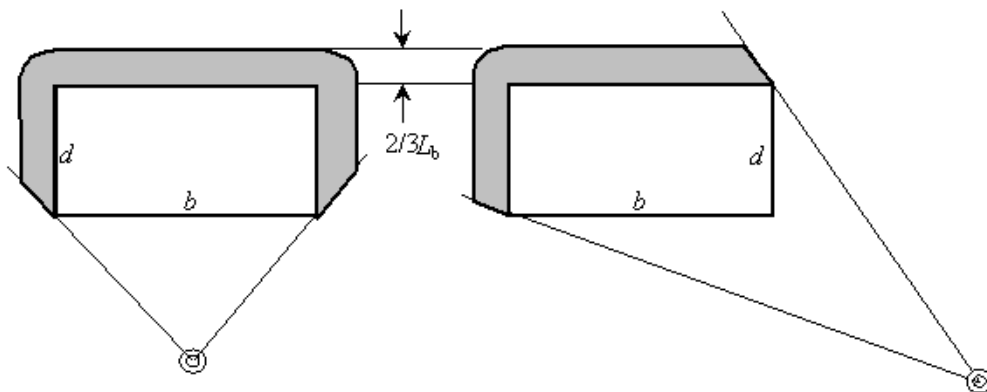
waarbij p_β de kans geeft dat het zwaartepunt in het cirkelsegment met hoek β terechtkomt.

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

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

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

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

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)

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

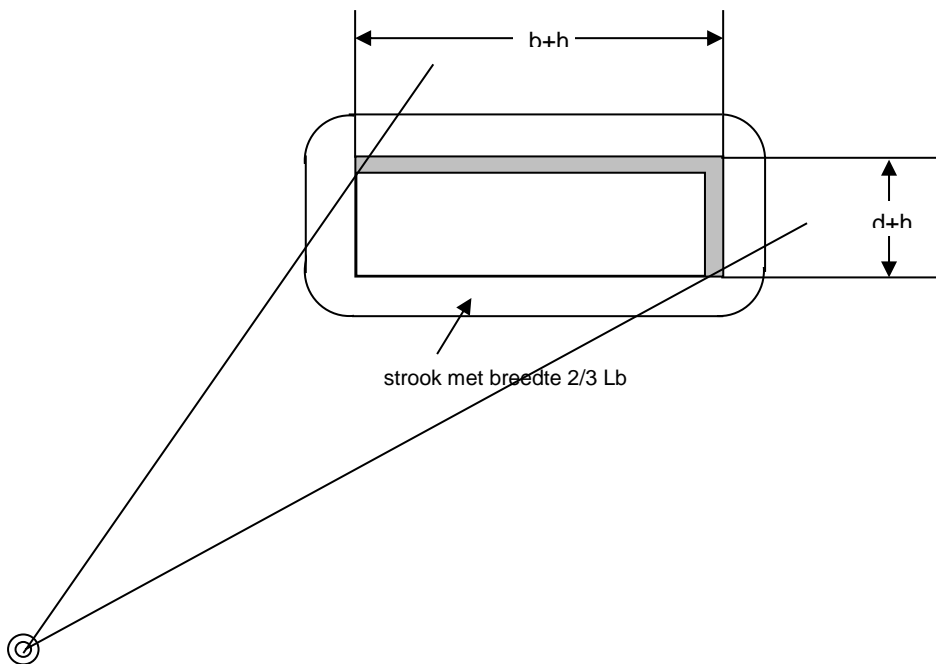
waarmee de hoogte van het object wordt verdisconteerd.

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 $p_{z_{wpt}}$ 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

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

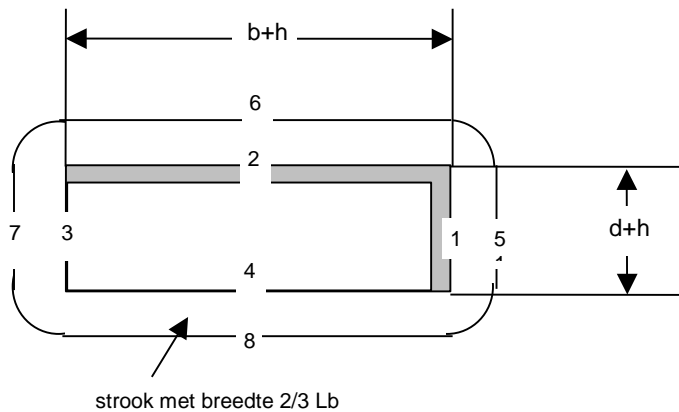
$$p_{o_i} = \bar{p}_{z_{wpt,b}} \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot L_b + \bar{p}_{z_{wpt,d}} \cdot d \cdot \frac{2}{3} \cdot L_b + \frac{\pi}{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L_b\right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{p}_{z_{wpt,b}} + \bar{p}_{z_{wpt,d}}}{2}\right)$$

waarbij:

$\bar{p}_{z_{wpt}}$: 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);

$\bar{p}_{z_{wpt,b}}$: 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);

$\bar{p}_{z_{wpt,d}}$: 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

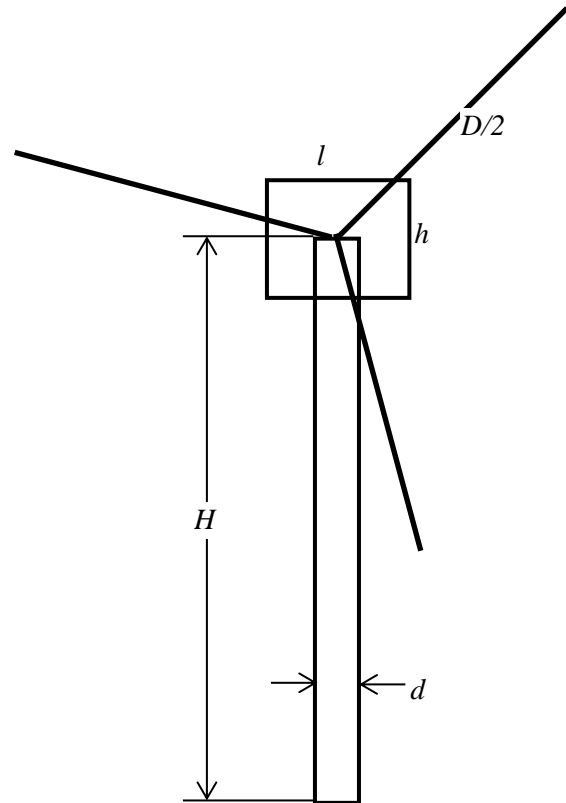
5 TREFKANSBEREKENINGEN

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

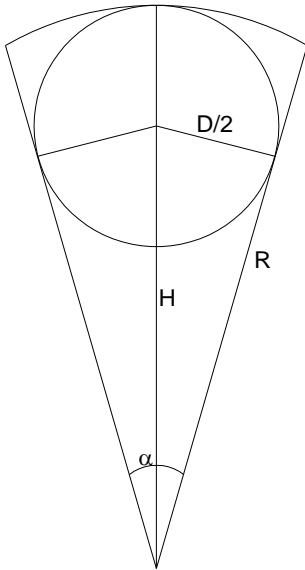
$$\alpha = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{D}{2H} \right) \quad (5.2.2)$$

waarbij

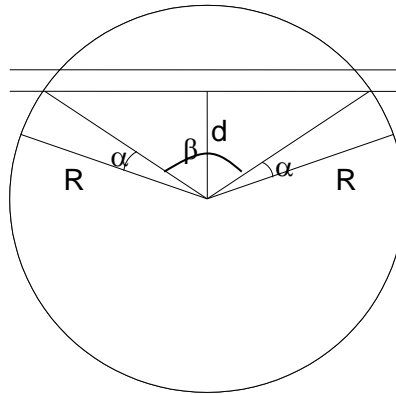
D : Diameter van de rotor [m]

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

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

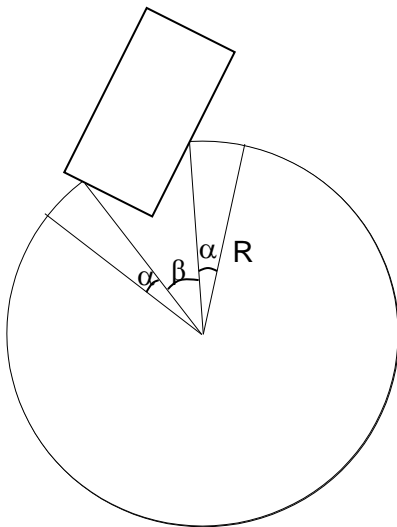
met

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 ELEKTRISCHE INFRASTRUCTUUR

7 BOVENGRONDSE BUISLEIDINGEN EN HOOGSPANNINGSLIJNEN

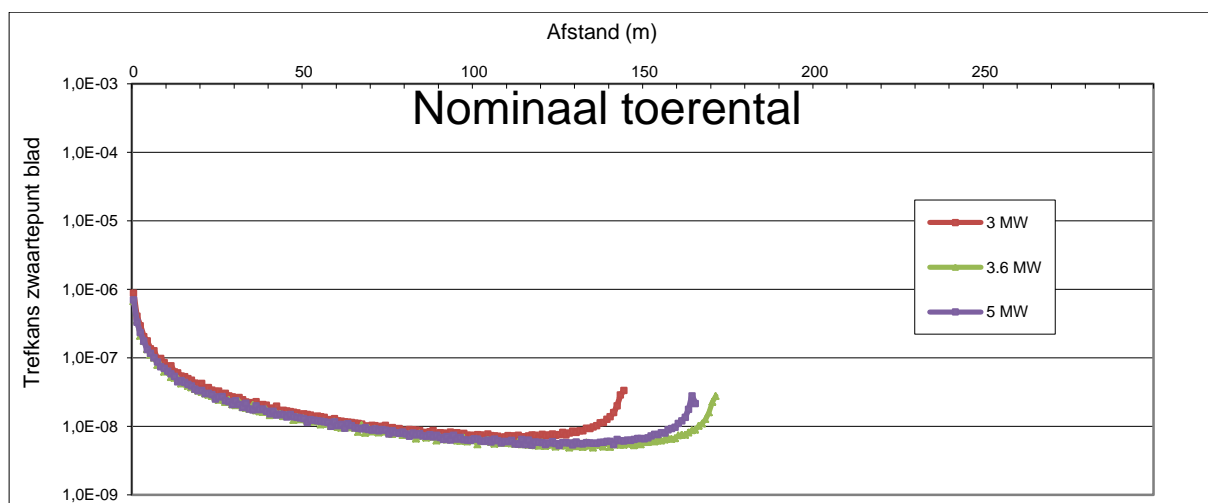
Om de impact van de windturbine op bovengrondse leidingen en hoogspanningslijnen te bepalen, worden de ongeval scenario's van de windturbine afzonderlijk behandeld. In de methode bestaat geen verschil tussen bovengrondse elektriciteits- of gasinfrastructuur. De verschillende bovengrondse infrastructurale werken kunnen op identieke wijze worden doorgerekend.

7.1 Bladafworp

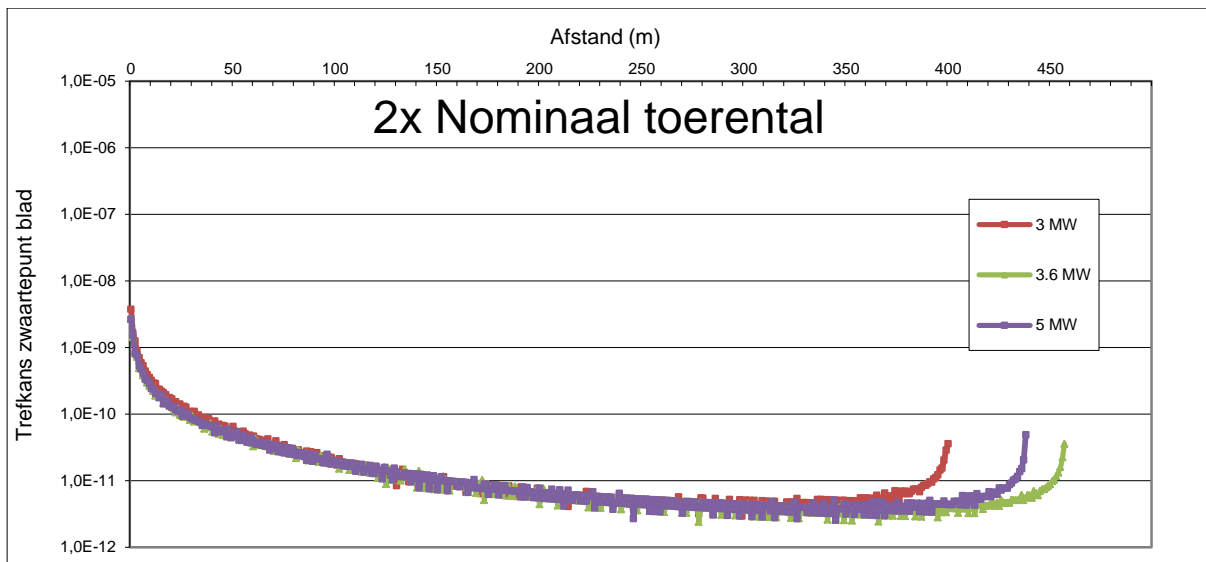
Voor bladafworp gaat het model uit van kansdichtheidsverdelingen over het grondoppervlak. Voor hoge objecten dicht bij de windturbine is deze methode niet geschikt en moet een andere methode worden toegepast op basis van een verticaal oppervlak.

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 , over het object oppervlak binnen de effectafstand te berekenen.

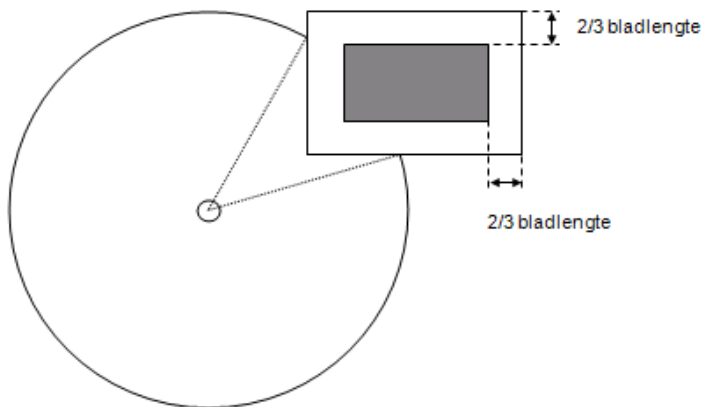


Figuur 14: Kansdichtheidsverdeling bij nominaal toerental



Figuur 15: Kansdichtheidsverdeling bij tweemaal 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

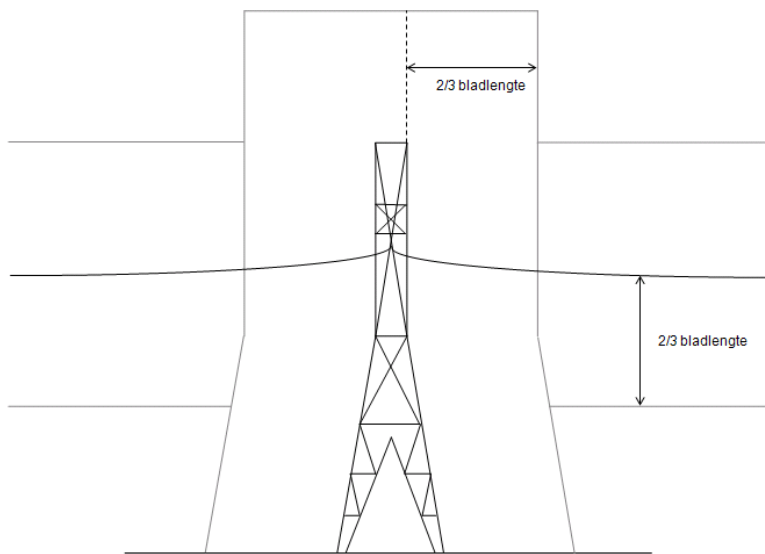
Voor hoge objecten (zoals hoogspanningsmasten) dicht bij de windturbine is bovenstaande aanpak (op basis van een horizontaal objectoppervlak) minder geschikt. Voor hoge objecten dicht bij de windturbine is een aanpak op basis van een verticaal (geprojecteerd) oppervlak beter. Voor deze objecten is de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

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 $2/3$ 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.

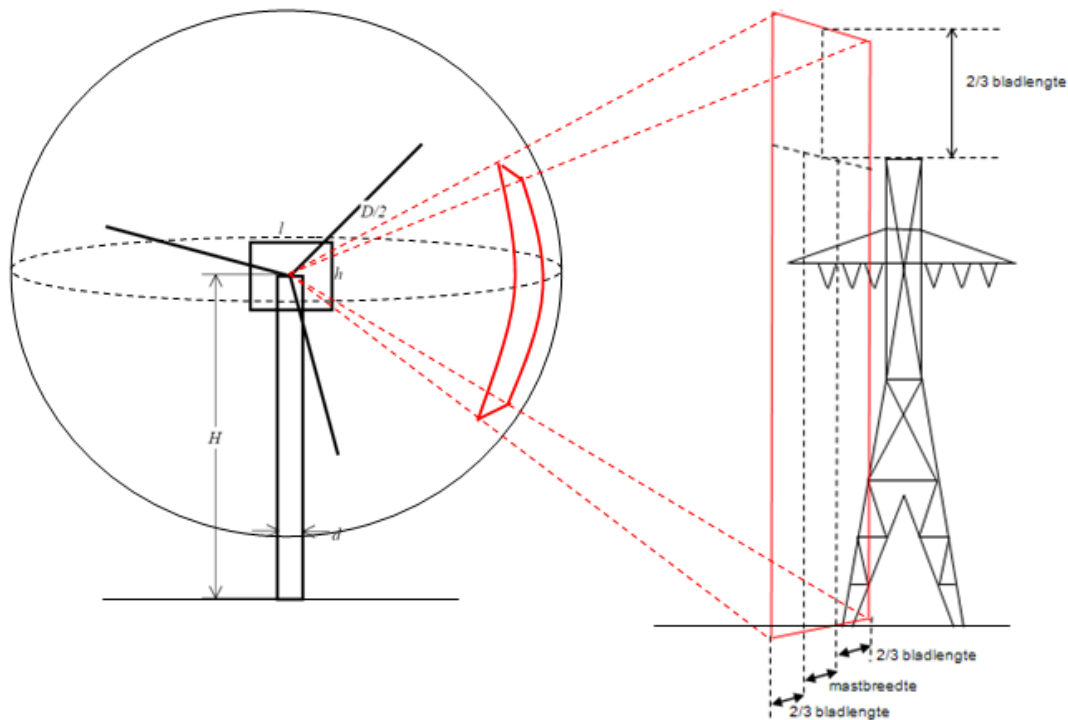


Figuur 16: Geprojecteerd oppervlak rondom een hoogspanningsmast in zijaanzicht, inclusief hoogspanningslijnen

Voor elk van deze onderdelen kan de kans worden bepaald dat bij bladafbreuk het onderdeel geraakt wordt, door de hoekfractie in hoogterichting (ten opzichte van π) te vermenigvuldigen met de hoekfractie in horizontale richting (ten opzichte van 2π) 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**.



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 $\frac{1}{\pi} \cdot \frac{70}{60} = 0,371$.

De totale kans dat – gegeven bladafbreuk – het object wordt geraakt, wordt verkregen door de vermenigvuldiging van beide hoekfracties: $0,119 * 0,371 = 4,4 \cdot 10^{-2}$.

7.1.3 Horizontaal of verticaal oppervlak?

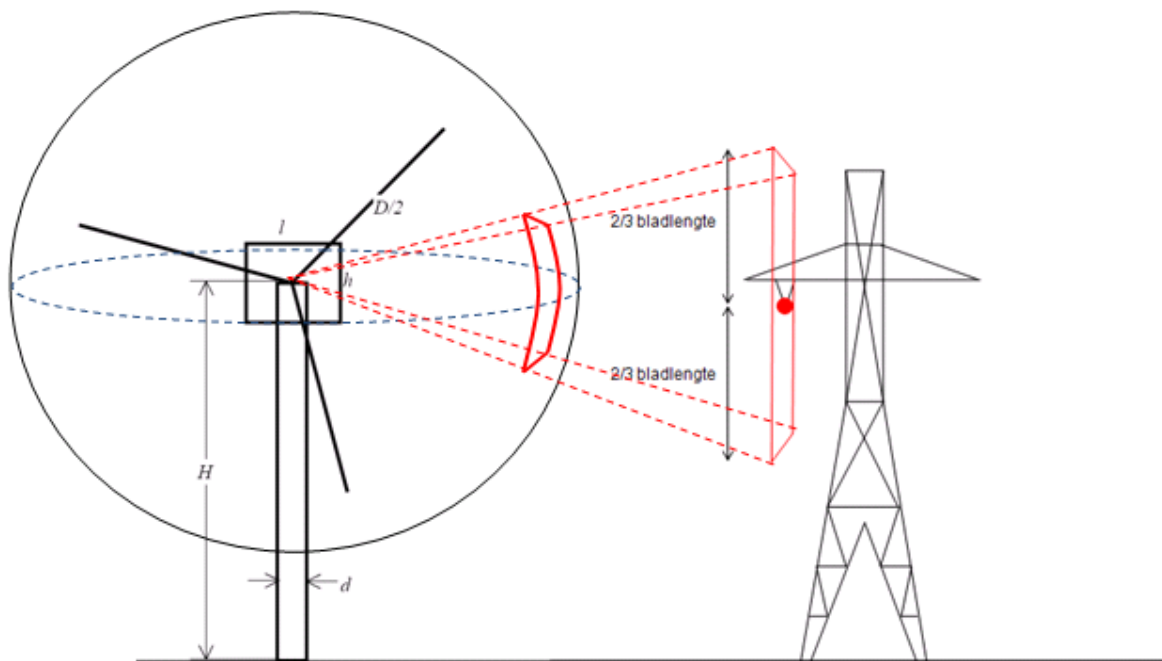
De keuze wanneer met het verticale of horizontale vlak dient te worden gerekend hangt af van de verhouding tussen lengte l en de hoogte h van het object en tevens de afstand r tussen object en windturbine in relatie tot de maximale werpafstand R . Als vuistregel kan de volgende vergelijking worden gehanteerd:

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

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 $\frac{2}{3}$ 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 $\frac{1}{\pi} \cdot \frac{56}{60} = 0,297$.

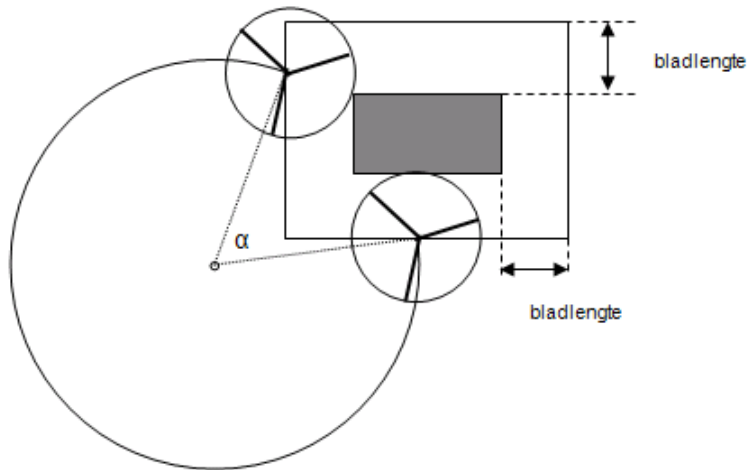
De totale kans dat dit segment door een afgeworpen blad wordt geraakt is nu het product van deze kansen: $2,65 \cdot 10^{-2} * 0,297 = 7,9 \cdot 10^{-3}$.

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.



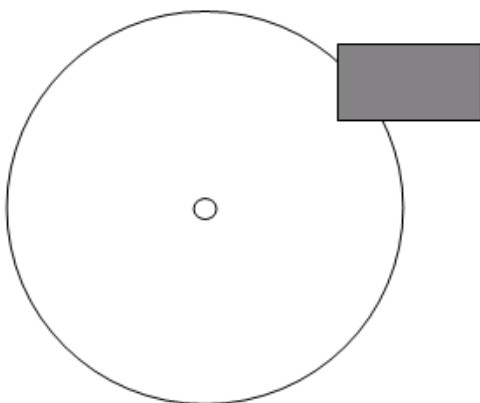
Figuur 19: Schematisch bovenaanzicht van het effectgebied van de mast van een windturbine in combinatie met een object (grijs gearceerd)

Voor het scenario van volledig falen van de mast betreft de kans dat het object getroffen wordt de hoekfractie van het geprojecteerde (vergrote) 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 BUISLEIDINGEN EN ONDERGRONDSE HOOGSPANNINGSKABELS

8.1 Ondergrondse Buisleidingen

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. Deze methodiek is gebaseerd op document “*Pipeline response to buried explosive detonations, volume I + II, E.D. Esparza, P.S. Westine, A. B. Wenzel, Southwest Research Institute, August 1981*”.

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

Opgemerkt wordt dat de empirische coëfficiënten K₄, K₅ en K₆ 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:

$$\sigma_{toelaatbaar} = SMYS - \frac{P * D}{2 * t}$$

$\sigma_{toelaatbaar}$: 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 241·10⁶ Pa (Grade B staal), 414·10⁶ Pa (X60 staal) en 483·10⁶ 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 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 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.

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.

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.

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

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

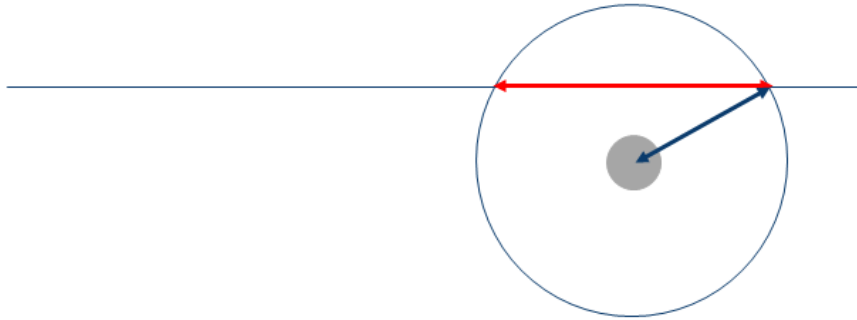
$E_{schokgolf}$:	de energie van de bron (effectieve kinetische energie van de schokgolf) [J]
m :	massa van het object [kg]
f :	fractie van de initiële kinetische energie opgenomen door de bodem (≤ 1)
g :	valversnelling (9,81 m/s ²)
h :	initiële hoogte van het vallend object [m]
ω :	toerental van de windturbine [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.

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:

$$\text{kritisch breedte} = \begin{cases} 2 * \sqrt{R^2 - d^2}, & 0 < d < R \\ 0 & d \geq R \end{cases}$$

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.

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

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 Rekenvoorbeelden ondergrondse buisleidingen

Voorbeeld gondel en/of rotorafworp

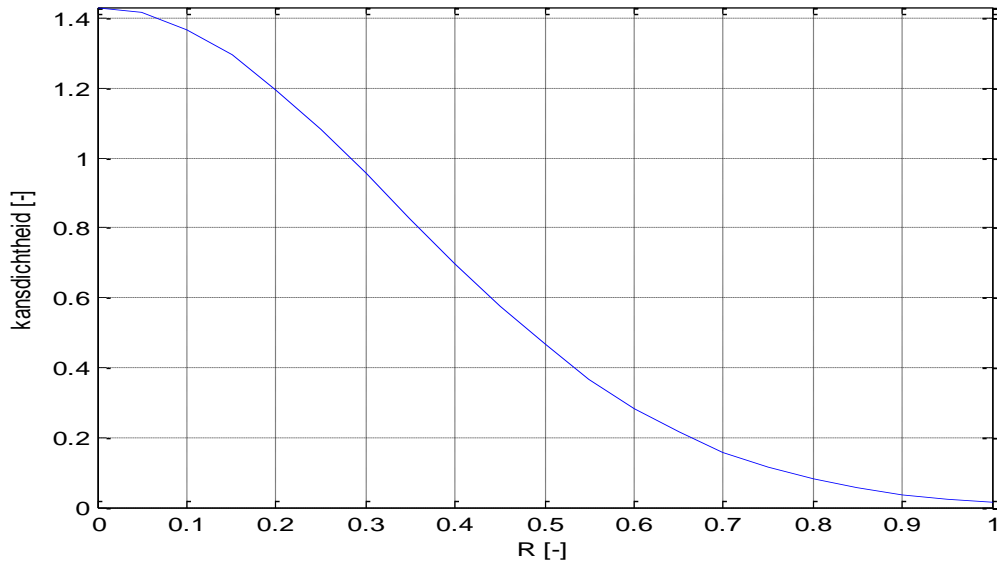
Om het scenario van gondel en/of rotorafworp in een risicoanalyse mee te kunnen nemen, dient een kansdichtheidsverdeling van de trefkanslocatie bekend te zijn. Er is echter onvoldoende casuïstiek bekend om een verdeling af te kunnen leiden van incidenten. Wel kunnen er foto's van dergelijke incidenten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

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 23 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:

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

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



Figuur 23: Illustratie van kansdichtheid 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. 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 afgekept 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 kansbenaderingen.

Rekenvoorbeeld

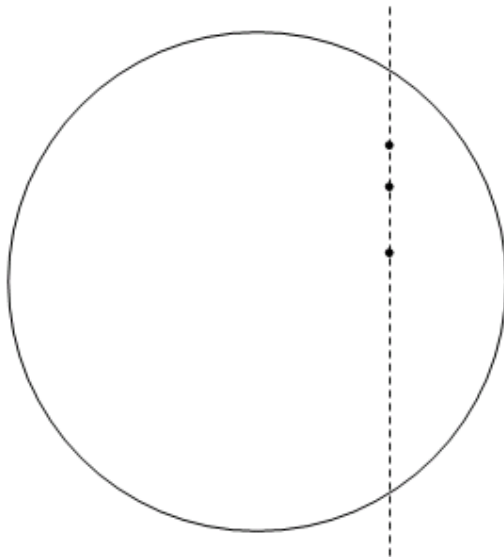
Ter verduidelijking volgt een voorbeeld. Stel, een windturbine heeft een bladlengte van 40m. Een kabelelement ligt op minimale afstand van 16 meter en heeft breedte b en lengte l . De kansdichtheid op 16 meter afstand kan uit de grafiek of tabel worden afgelezen bij $R = 16/40 = 0,4$ en betreft circa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

$$0.7 \cdot \frac{l}{R} \cdot \frac{b}{R} = 0.7 \cdot l \cdot b \cdot \frac{1}{40^2}$$

Om de kansbenadering per vierkante meter te vinden dient de kansdichtheid gedeeld te worden door de bladlengte in het kwadraat; dit is volgend bovenstaand voorbeeld voor een afstand van 16 meter

van de windturbine gelijk aan $0,7 / (40^2) = 4,4 \cdot 10^{-4}$. Voor toepassing in een kwantitatieve risicoanalyse van een buisleiding kan de raakkans van de buisleiding dan worden afgeschat door het kritische oppervlakte te verdelen in kleine stukjes en afzonderlijk de raakkans per stukje te berekenen aan de hand van bovenstaand 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 ondergrondse buisleiding



Figuur 24: 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 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. Op deze manier is de representatieve lengte van het middelste punt in Figuur 24 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 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:

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

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

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

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 (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:

$$\text{Bijdrage faalfrequentie nom. toerental} = 2,5 \text{ m} \cdot 1,41 \text{ m} \cdot 3 \cdot 10^{-5}/\text{m}^2 \cdot 8,4 \cdot 10^{-4}/\text{jaar} = 8,9 \cdot 10^{-8}/\text{jaar}$$

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

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

Rekenvoorbeeld 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 **Error! Reference source not found.** 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.

Rekenvoorbeeld 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 **Error! Reference source not found.** 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 23 (kansdichtheidsverdeling) blijkt dat de kans dat het middelpunt van de gondel op 0,63·bladlengte terechtkomt gelijk is aan $0,23 / 452 = 1,14 \cdot 10^{-4}/m^2$.

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 = $2,5 \text{ m} * 5,39 \text{ m} * 1,14 \cdot 10^{-4}/m^2 * 4,0 \cdot 10^{-5}/\text{jaar} = 6,1 \cdot 10^{-8}/\text{jaar}$
Samenvattend zijn voor het voorbeeld de bijdrages van de turbine weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: 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

8.2 **Ondergrondse hoogspanningskabels**

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", kabelexperts binnen DNV KEMA, een kritische afstand of breedte bepaald. Deze kritische breedte geeft, in combinatie met de kabellengte, het oppervlak aan waarbinnen een voorwerp dient te vallen om de kabel te doen beschadigen.

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.

In tabel 3 worden de windturbinegegevens samengevat die zijn gebruikt voor de door middel van "expert opinion" bepaalde kritische afstand.

Tabel 3: Uitgangspunten windturbine componenten

Vermogen [MW]	Masthoogte [m]	Massa gondel *1000 [kg]	Massa blad *1000 [kg]	Massa mast *1000 [kg]
1	60	40	3	80
3	100	120	10	250
5	120	400	20	400

Op basis van de uitgangspunten in tabel 2 zijn de volgende kritische afstanden bepaald voor gondelafworp en bladafworp.

De kritische afstanden zijn vermeld in tabel 3, voor de kwetsbaardere kabels zoals SCFF en PILC worden hogere afstanden aangehouden dan voor minder kwetsbare kabels waaronder UGD en XLPE.

Het referentiepunt uit de door "expert opinion" verkregen kritische afstanden is de 3 MW windturbine. Voor bepaling van de kritische afstand voor andere vermogens is het uitgangspunt dat de inslag op maaiveld een impact heeft van m.g.h. (potentiële energie) en de invloed afneemt met de afstand in het kwadraat. Dit is een conservatieve aanname omdat de werkelijke inslagenergie zich in drie richtingen zal uitbreiden. Voor het rotorblad wordt aangenomen dat de wijziging in kinetische energie bij afworp gelijke trend houdt met de potentiële energie.

De data voor de 1 en 5 MW is hier bij benadering als volgt afgeleid:

- Toename impact op maaiveld van een windturbine component is
factor = (Massa* hoogte [i MW]) / (Massa * hoogte [3 MW])
- De kritische afstand neemt met $\sqrt{\text{factor}}$ toe.

Als voorbeeld de kritische afstand voor gondel/rotor afworp tussen 3 en 5 MW windturbine

Voor een 3MW geldt voor een SCFF kabel 40 meter (tabel 3) op basis van "expert opinion".

Uit tabel 2 volgt voor de 3MW geldt een massa maal hoogte van 100*120 van 12.000. Voor de 5 MW is deze waarde 120*400 maakt 48.000. De factor tussen 48.000 en 12.000 is gelijk aan 4, de wortel hiervan is 2. De kritische afstand is wordt voor de 5 MW tweemaal groter (tabel 4).

Tabel 4: Kritische afstanden per type ondergrondse elektriciteitskabel

Kritische afstanden per type ondergrondse elektriciteitskabel						
Afstand gemeten vanaf zwaartepunt gondel/rotor of zwaartepunt blad.						
	Val gondel/rotor			Bladafworp		
	1MW	3 MW	5MW	1MW	3MW	5MW
Self Contained Fluid Filled cables (SCFF)	25 m	40 m	80 m	5 m	10 m	15 m
Paper Insulated Lead Covered cables (PILC)	25 m	40 m	80 m	5 m	10 m	15 m
Gas insulated cables (UGD)	15 m	25 m	50 m	3 m	5 m	8 m
XLPE insulated cables	15 m	25 m	50 m	3 m	5 m	8 m

De kritische afstand wordt gemeten tussen het zwaartepunt van de rotor/gondel of rotorblad en de ondergrondse elektriciteitskabels.

Voor windturbine vermogens anders dan in tabel 3 vermeld, dient in tabel 3 lineair geïnterpoleerd te worden. Als voorbeeld een 1,5 MW wind turbines: bij val van gondel/rotor dient voor een SCFF kabel als kritische afstand 32,5 meter aangehouden te worden als zijnde het gemiddelde van 25 en 40 meter.

In hetzelfde voorbeeld geldt voor bladafworp 7,5 meter.

In tabel 5 zijn de kritische afstanden bepaald voor mastbreuk.

Tabel 5: Kritische afstanden per type ondergrondse elektriciteitskabel

Kritische afstanden per type ondergrondse elektriciteitskabel			
Afstand gemeten vanaf centerlijn mast.			
	Mastbreuk		
	1MW	3 MW	5MW
Self Contained Fluid Filled cables (SCFF)	6 m	12 m	20 m
Paper Insulated Lead Covered cables (PILC)	6 m	12 m	20 m
Gas insulated cables (UGD)	3 m	5 m	8 m
XLPE insulated cables	3 m	5 m	8 m

N.B. – Met de waarden uit tabel 4 dient geen rekening gehouden te worden indien bij mastbreuk, mast en gondel/rotor als geheel de grond raakt. De gondel/rotor zal de klap opvangen en de mast zal zonder significante impact voor onderliggende kabels op maaiveld terecht komen.

De kritische strook is het gebied tussen de kabel en de kritische afstand aan beide zijden. De breedte van de kritische strook is tweemaal de kritische afstand.

Voor bepaling van de trefkans van een windturbine component op een ondergrondse kabel inclusief de bijbehorende kritische strook dient het volgende aangehouden te worden.

Afwerp rotorblad

Bepaald dient te worden de breedte en lengte van de kritische strook en vervolgens de kans dat het zwaartepunt van het rotorblad in deze strook terecht komt. De kritische strook voor bladafwerp is zodanig breed gekozen dat indien het zwaartepunt buiten de kritische strook valt, en een deel van het rotorblad hierbinnen, dit geen gevolgen voor de kabel heeft.

Voorbeeld bladafwerp

Stel een 3 MW windturbine met een tiphoogte van 150 meter. De SCFF kabel en kritische kabelstrook liggen net buiten de 150 m zone vanaf het centrum van de mastvoet. De breedte van de kritische strook is 20 meter (2x10 meter). De kabel kan niet door de gondel/rotor afwerp, mastbreuk en bladafwerp bij nominaal toerental geraakt worden. Bij nominaal toerental is bij bladafwerp de afstand maximaal 150 meter (figuur 14). Bij overtoeren is de maximale werpafstand gelijk aan 400 meter (figuur 15).

Kritisch oppervlak : 1600 m² (2x400x20)

Trefkans zwaartepunt : 6*10⁻¹² /m²/jaar (gemiddelde waarde tussen 150 en 400 meter)

De trefkans van de SCFF kabel is: ~1*10⁻⁸ (1600 * 6*10⁻¹²=9.6*10⁻⁹).

Gondel/rotor afworp

Uitgangspunt is dat de bij gondel/rotor afworp, de mast blijft staan, deze binnen de $PR=10^{-5}$ zone neerkomt. De $PR=10^{-5}$ zone heeft een minimale straal gelijk aan de $\frac{1}{2}$ rotordiameter. Het zwaartepunt van de gondel komt op maaiveld op een afstand van 50% van de rotorstraal gemeten vanuit het centrum van de mastvoet. De gondel en/of rotor valt als geheel naar beneden. Dit vormt slechts een risico voor de kabel indien de kritische strook geheel of gedeeltelijk door de $PR=10^{-5}$ contour loopt.

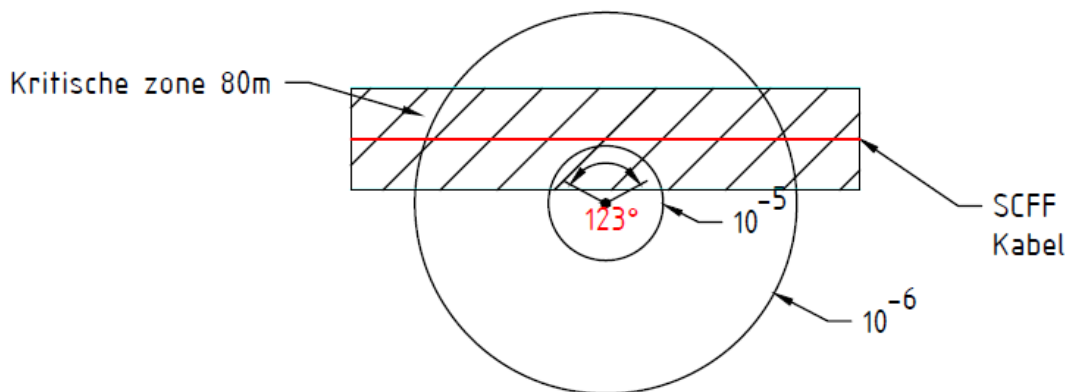
De grenzen van het risicogebied worden begrensd door de uitersten in de kritische strook die nog geraakt kunnen worden door het zwaartepunt van de gondel en de afzonderlijke rotorbladen. De rotorbladen zijn nog wel gekoppeld aan de rotornaaf.

Op basis hiervan wordt de kritieke valsector bepaald en de trefkans van de kritische strook berekend.

Rekenvoorbeeld Gondel/rotor afworp

In figuur 25 is een voorbeeld gegeven van een 3 MW windturbine met daarom heen de $PR=10^{-5}$ en de $PR=10^{-6}$ contouren geprojecteerd. Een SCFF kabel loopt door beide contouren heen met een kritische zone van 2 maal de kritische afstand van 40 meter weergegeven in **Tabel**. Het zwaartepunt van de gondel/rotor komt op maaiveld op $1/2R$ van de $PR=10^{-5}$ zone. De hoek waarover de gondel/rotor de kritische zone kan raken is 123° .

De faalkans van gondel/rotor is $4 \cdot 10^{-5}$, en de maximale sector voor het raken van de kritische zone is 123° , dus wordt de trefkans van de leiding $123/360 \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 1,4 \cdot 10^{-5}$ per jaar



Figuur 25: Overzicht SCFF kabel lopende door het $PR 10^{-5}$ en 10^{-6} gebied van de windturbine

Mastbreuk

Bij mastbreuk wordt verondersteld dat de gondel/rotor in de $PR=10^{-6}$ zone valt. Het mastlichaam kan geen schade veroorzaken omdat mast en gondel/rotor als geheel op maaiveld terecht komen. Bij val zal eerst de rotor en gondel maaiveld raken en dan pas het mastlichaam. Omdat de rotor en gondel de val remt, is de impact van de mast op maaiveld beperkt en veroorzaakt geen schade aan ondergrondse infra waaronder hoogspanningskabels. Het zwaartepunt van de gondel komt op een afstand gelijk aan ashoogte van het centrum van de mastvoet.

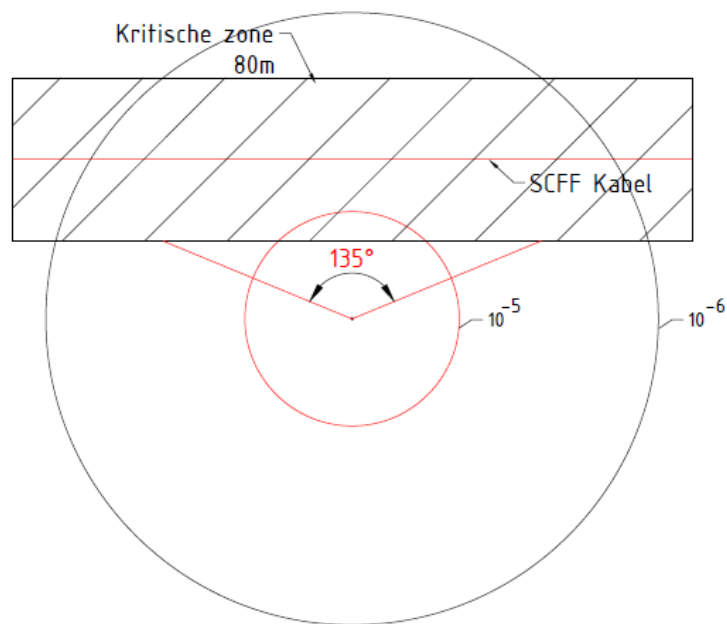
Dit vormt slechts een risico voor de kabel indien de kritische strook geheel of gedeeltelijk door de $PR=10^{-5}$ zone en $PR=10^{-6}$ zone loopt.

De grenzen van het risicogebied worden begrensd door de uitersten in de kritische strook die nog geraakt kunnen worden door het zwaartepunt van de gondel en de afzonderlijke rotorbladen. De rotorbladen zijn nog wel gekoppeld aan de rotornaaf. Op basis hiervan wordt de kritieke valsector bepaald en de trefkans van de kritische strook berekend.

Rekenvoorbeeld mastbreuk

In figuur 26 is een voorbeeld gegeven van een 3 MW windturbine met daarom heen de $PR=10^{-5}$ (Straal 50 m) en de $PR=10^{-6}$ (Straal 150 m) contouren geprojecteerd. De ashoogte van de windturbine is 100 meter. De mast inclusief gondel en rotor komen te vallen op maaiveld. Het mastlichaam kan aan de kabel geen schade veroorzaken. De kritische zone voor gondel/rotor afworp is kritisch.

Een SCFF kabel loopt door het $PR=10^{-6}$ contour met een kritische zone van 2 maal 40 meter horende bij de berekening van de trefkans door gondel/rotor val. Hierin is de maximale sector tussen de kritische zone en mastbreuk weergegeven. De lengte bij mastbreuk is het zwaartepunt van de gondel inclusief het zwaartepunt van de afzonderlijk bladen. De maximale sector waarin dit kan gebeuren is 135° . De faalkans voor mastbreuk is $1,3 \cdot 10^{-4}$, dus wordt de trefkans van de leiding $135/360 * 1,3 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-5}$ per jaar

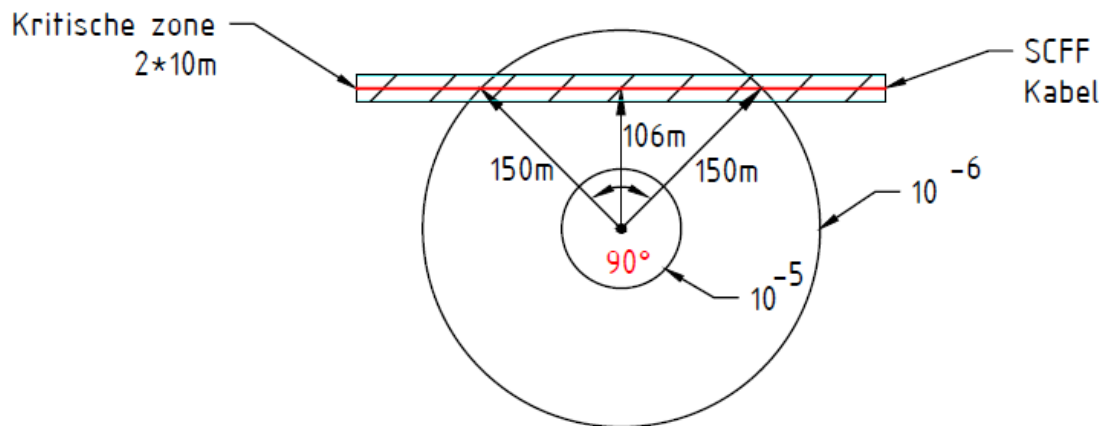


Figuur 26: Overzicht SCFF kabel lopende door het $PR=10^{-6}$ gebied voor bepalen trefkans bij mastbreuk

Rekenvoorbeeld bladafworp

Naast het bepalen van de trefkans bij mastbreuk moet dit ook voor bladafworp uitgevoerd worden. De kritische zone om de leiding is 2 maal 10 meter wat is weergegeven in Figuur 27. De afstand van de leiding door $PR=10^{-6}$ zone wordt in drie sectoren opgedeeld met een afstand vanaf het centrum naar de leiding van 150, 106 en weer 150 meter. De trefkans, op basis van figuur 14, horende bij deze afstanden voor 3 MW windturbines is $2,0 \cdot 10^{-8}$ voor 150 meter en $8,0 \cdot 10^{-9}$ voor 106 meter. De gemiddelde trefkans is $1,4 \cdot 10^{-8}$ per m^2 . De lengte van de kritische strook is 210 meter en de breedte 20 meter.

De trefkans van de kritische zone wordt: $1,4 \cdot 10^{-8} \cdot 210 \cdot 20 = 6,0 \cdot 10^{-5}$.



Figuur 27: Overzicht SCFF kabel lopende door het PR=10-6 gebied voor bepalen trefkans bij bladafworp