



BOSCH & VAN RIJN

Experts in duurzame energie en ruimte

Risicoanalyse

Windturbines en primaire waterkering VKA

Windpark Battenoord

Opdrachtgever



Risicoanalyse

Windturbines en primaire waterkering VKA

Windpark Battenoord

22 februari 2017

Auteurs

Drs. Ing. Jeroen Dooper
Hans Kerkvliet MSc.

Bosch & Van Rijn
Groenmarktstraat 56
3521 AV Utrecht

Tel: 030-677 6466
Mail: info@boschenvanrijn.nl
Web: www.boschenvanrijn.nl

© **Bosch & Van Rijn 2016**

Behoudens hetgeen met de opdrachtgever is overeengekomen, mag in dit rapport vervatte informatie niet aan derden worden bekendgemaakt. Bosch & Van Rijn BV is niet aansprakelijk voor schade door het gebruik van deze informatie.



Inhoudsopgave

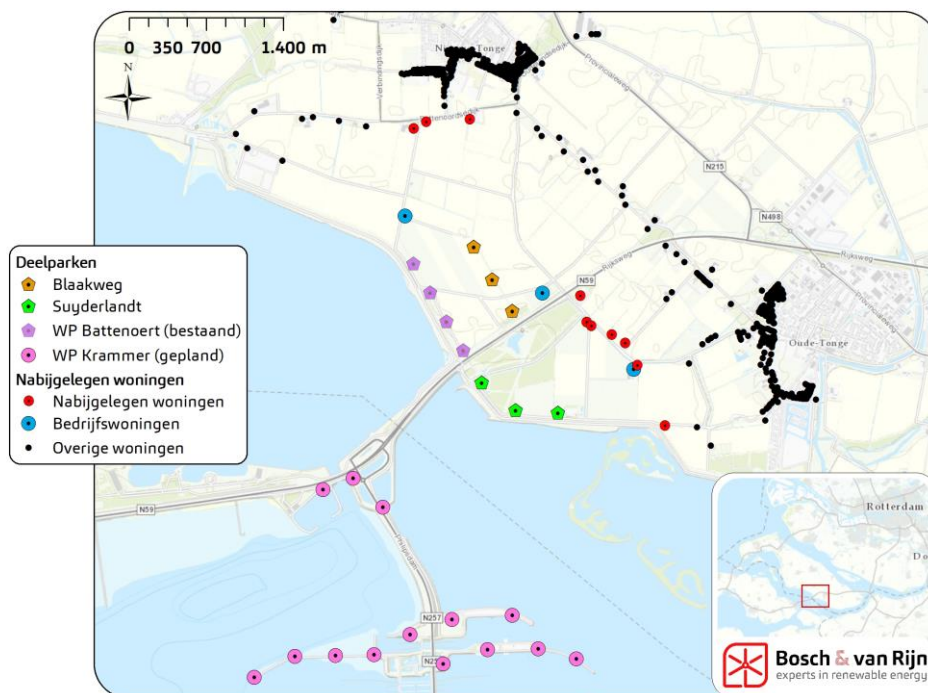
Inhoudsopgave.....	2
1 Inleiding.....	3
1.1 Plangebied	3
1.2 Voorkeursalternatief	3
1.3 Leeswijzer	4
2 Primaire waterkering.....	5
2.1 Toetsingskader	5
2.2 Situatie waterkering	5
3 Risico's windturbines.....	7
3.1 Risico's van windturbine	7
4 Trefkans waterkering.....	8
4.1 Kritische strook	8
4.2 Restprofiel	8
4.3 Trefsector	8
4.4 Wiekbreuk	9
4.5 Mastbreuk	10
4.6 Gondelafworp	10
5 Conclusie	11
Bijlage A. Berekening werpafstand.....	12
Bijlage B. Werpafstanden windturbines	14



1 Inleiding

1.1 Plangebied

De initiatiefnemers Eneco en Deltawind zijn voornemens om in het zoekgebied Battenoord een windpark realiseren, zie onderstaand figuur voor het voorkeursalternatief.



Figuur 1: Plangebied windpark Battenoord (VKA bestaat uit windturbines Blaakweg & Suyderlandt).

1.2 Voorkeursalternatief

Ten behoeve van de bestemmingsplanwijziging en de benodigde uitvoeringsbesluiten wordt een combi-MER opgesteld. Uit het MER komt een voorkeursalternatief op bandbreedten naar boven die in de komende paragrafen wordt onderzocht:

Tabel 1 - Beschrijving van de afmetingen en vermogensklassen van het voorkeursalternatief

Voorkeursalternatief	Ashoogte (±)	Rotordiameter (±)	Vermogen (±)	
			per wtbs	totaal
Bovengrens - G132 – 6 wtbs	84m	132m	5,0 MW	30,0 MW
Ondergrens - V110 – 6 wtbs	95m	110m	2,0 MW	12,0 MW



Voor Windpark Battenoord is in navolging van de Waterwet een Watervergunning benodigd, omdat de windturbinelocaties in de aangrenzende buitenbeschermingszone van een waterstaatwerk gepland zijn. Het bevoegd gezag in dezen is Waterschap Hollandse Delta.

Aan de hand van de uitgevoerde risicoanalyse is beoordeeld welk risico de geplande windturbines vormen voor de waterkerende functie van de aanwezige primaire waterkering, indien er sprake is van het falen van een windturbine of windturbineonderdeel.

Door middel van een kwantitatieve analyse is de trefkans voor de dijk berekend ten gevolge van het plaatsen van de windturbines.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport bevat de risicoanalyse van bovenstaande alternatieven en varianten ten opzichte van de primaire waterkering. In hoofdstuk 2 zal eerst worden ingegaan op de primaire waterkering waarna in hoofdstuk 3 de risico's van windturbines worden besproken. In hoofdstuk 4 wordt de trefkans berekend en het rapport sluit af met een conclusie.



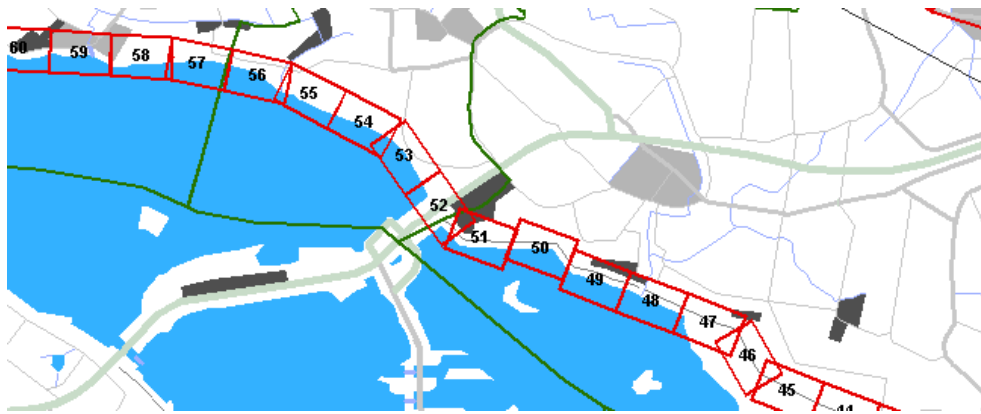
2 Primaire waterkering

2.1 Toetsingskader

De nabijgelegen waterkering maakt onderdeel uit van de dijkkring 25: Goeree-Overflakkee¹. Voor deze dijk geldt een veiligheidsnorm van 1/4000 jaar².

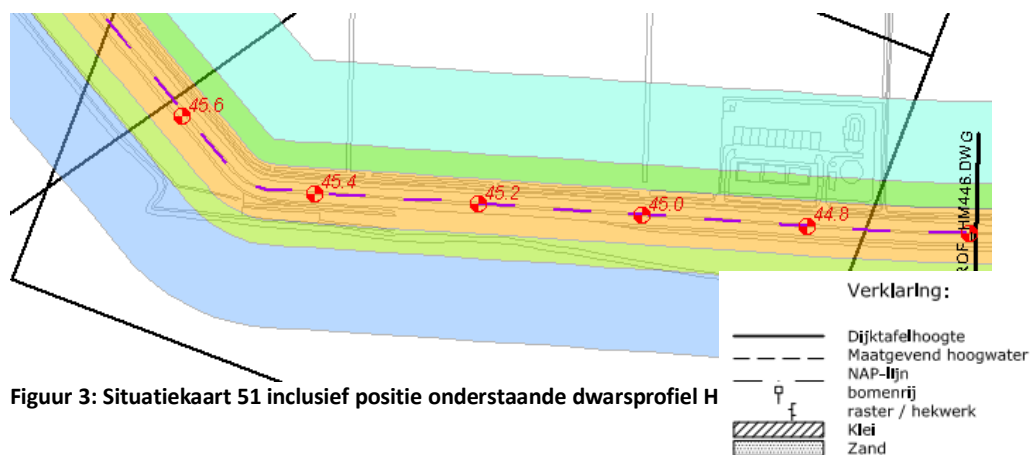
2.2 Situatie waterkering

De windturbinelocaties zijn gepland nabij vlakken 50 t/m 53 in onderstaand figuur.



Figuur 2: Overzichtkaart primaire waterkeringen (Waterschap Hollandse Delta).

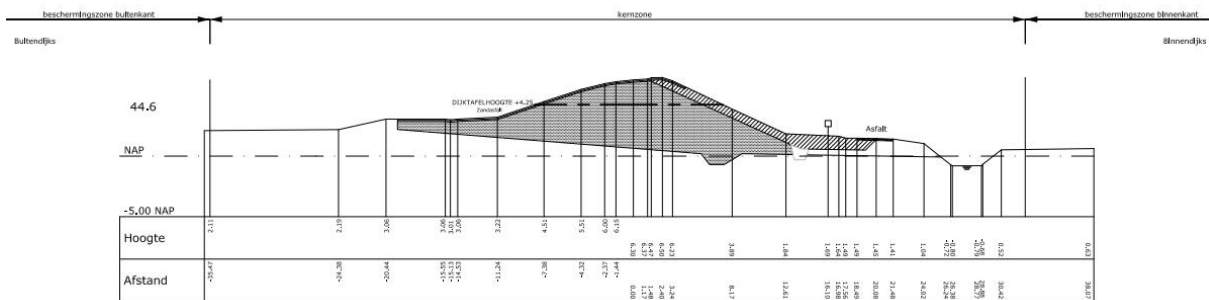
Onderstaande figuren tonen de situatiekaart van vak 51 en dwarsprofiel HM 446.



Figuur 3: Situatiekaart 51 inclusief positie onderstaande dwarsprofiel H

¹ Waterwet, Bijlage I 'Dijkkringen en primaire waterkeringen als bedoeld in artikel 1.3, eerste lid.

² Waterwet, Bijlage II



Onderstaande tabel bevat per alternatief en variant de afstand tussen de windturbines en de binnenkruinlijn.

		VKA
Suyderlandt	1	74
	2	73
	3	73
Blaakweg	3	637
	4	644
	5	668

Nummering van windturbines is van noord/west naar zuid/oost.



3 Risico's windturbines

3.1 Risico's van windturbine

De risico's van een windturbine worden gevormd door 3 typen falen:

1. het afbreken van (een gedeelte van) een windturbineblad;
2. het omvallen van een windturbine door mastbreuk;
3. het naar beneden vallen van de gondel en/of rotor.

Het afbreken van een windturbineblad vormt een risico binnen de straal van de maximale werpafstand. Hier worden twee scenario's onderscheiden; werpafstand bij nominaal toerental en de werpafstand bij overtoeren. Het omvallen van een windturbine vormt een risico binnen een straal van de maximale valafstand van de windturbine (tiphoogte). Het naar beneden vallen van de gondel en/of rotor vormt een risico binnen een afstand van de wielengte.

Op basis van generieke faalfrequenties (bijlage A, HRW 2014), het kogelbaanmodel (zie bijlage 1. Bron: bijlage C, HRW 2014) en de parameters van de specifieke windturbintypes zijn de werpafstanden en risicocontouren berekend. In Bijlage A staat de gehanteerde formules gegeven en Bijlage B bevat per windturbintype een printscreen van de resultaten. Hieruit volgen de volgende afstanden:

Wtb type	Ashoogte (meter)	Risicocontouren		Max. werpafstand	
		10 ⁻⁵ (meter)	10 ⁻⁶ (meter)	Nom. toerental (meter)	Overtoeren (meter)
V110-2.0	95	55	169	169	476
G132-5.0	84	66	152	152	428

De windturbines kunnen een risico verhogend effect hebben op nabijgelegen gebouwen, installaties en infrastructuur. In het geval van de dijk is op basis van de gepresenteerde afstanden in 2.2 op te maken dat alleen de windturbines van de lijn Suyderlandt een risico verhogend effect kunnen hebben op de dijk.



4 Trefkans waterkering

4.1 Kritische strook

Als kritische strook is een 20 meter brede strook ten opzichte van de kruin van de waterkering aangenomen (10 meter aan beide zijde t.o.v. de kruin-as). De ratio achter de 20 meter is dat hiermee ten minste het functionele deel van de kruin wordt opgevangen.

4.2 Restprofiel

Indien er sprake is van een restprofiel, betekent het dat het aanwezige restprofiel nog een bepaalde waterstand kan keren. Er is in dat geval sprake van een zogenaamde responstijd tot herstel, zolang er voor of tijdens dit herstel geen waterstand optreedt tot boven het niveau van het restprofiel. Er is dus sprake van een gebeurtenis (deelkans) welke gelijktijdig met het falen van een windturbine of windturbineonderdeel dient op te treden. Dit betreft de kans dat op het moment van falen van een windturbine of windturbineonderdeel er ook, voor of tijdens het herstellen, een waterstand optreedt welke hoger is dan het aanwezige restprofiel kan keren. Het is aannemelijk dat indien één van de faalscenario's optreedt er sprake is van een restprofiel, welke nog een bepaalde waterstand kan keren.

Als aanname is genomen dat het aanwezige restprofiel niet meer een waterstand kan keren, welke optreedt in het geval van een "lichte storm". De kans op optreden van een "lichte storm" is aangenomen op 5 keer per jaar. Voor de stormduur wordt uitgegaan van 35 uur. Hedendaagse windturbines worden door middel van een SCADA systeem 24 uur per dag gemonitord. Gangbaar is dat een windturbine zich in ieder geval één keer per 24 uur meldt. Een detectietijd van 24 uur is daarom aannemelijk. De hersteltijd voor de ontstane schade aan de waterkering is geschat op 5 dagen (5x24 = 120 uur).

De kans dat er een "lichte storm" optreedt tijdens de hersteltijd is:

P(niet te keren storm tijdens herstel) = 5 lichte stormen per jaar x (35 uur / 8760 uur per jaar) + 5 lichte stormen per jaar x (24 uur / 8760 uur per jaar) + 5 lichte stormen per jaar x (120 uur / 8760 uur per jaar) = **0,1** per jaar.

4.3 Trefsector

Ten behoeve van de risicoanalyse is per windturbinelocatie en faalscenario de trefsector bepaald. De trefsector betreft het gebied waar een falende windturbine of windturbineonderdeel kan neerkomen en daarbij een schade kan veroorzaken, welke een mogelijk risico vormt voor de waterkerende functie van de waterkering. Het afbreken van een windturbineblad vormt een risico binnen de straal van de maximale werpafstand. Het omvallen van een windturbine vormt een risico binnen een straal van de maximale valafstand van de windturbine (tiphoogte). Het naar beneden vallen van de gondel en/of rotor vormt een risico binnen een afstand van de wielkengte. Hiermee resulteren de scenario's wiekbreuk, mastbreuk en gondelafval in een risicoverhoging op de waterkering.



4.4 Wiekbreuk

De schade die een neerkomend rotorblad veroorzaakt is onder meer sterk afhankelijk van de wijze van neerkomen. Afhankelijk van de impacthoek kan een blad versplinteren en/of afketsen. De meest significante schade wordt veroorzaakt als de flens (verbinding tussen het rotorblad en de rotor) van een rotorblad onder een bepaalde hoek inslaat (uitgaande van de worst case afworp bij een overtoeren situatie). De overige situaties zorgen voor een lagere impactschade. De worst case hoek van inslag met het verticaal is kleiner dan **45 graden**. De ratio achter deze 45 graden is dat bij een zanddijk met een kleibekleding, theoretisch bij een hoek van inwendige wrijving van 30 graden voor het zand en een hoek van inval met de verticaal van 30 graden er geen indringing zou zijn en er horizontale afschuiving plaatsvindt. Er zou dus uit kunnen worden gegaan van 30 graden. Echter zou deze aanname voor de deklaag een niet-conservatieve aanname zijn. Daarom wordt als aanname aangehouden, dat bij een hoek van inslag met het verticaal groter dan 45 graden er een geringe indringing optreedt. Het rotorblad zal met een grotere impactoppervlakte inslaan en zal dan afketsen en/of vervormen en/of deels verbrijzelen, waardoor er een grotere energie opname zal optreden en de impactschade kleiner is.

Voorgaande geeft een: **$P(\text{flens naar beneden}) = 2 \times 45^\circ / 360^\circ = 0,25$**

Het scenario wiekbreuk resulteert in een trefkans binnen de maximale werpafstand bij overtoeren. Op basis van generieke faalfrequenties (bijlage A, Handboek Risicozonering Windturbines (HRW), 2014), het kogelbaanmodel (zie bijlage 1. Bron: bijlage C, HRW 2014) en de windturbine specifieke kenmerken) is de maximale werpafstand bij nominaal toerental en overtoeren berekend (zie 3.1)

Om de trefkans van de kritische strook te berekenen wordt uitgegaan van het percentuele oppervlakte van de kritische strook binnen de werpafstand bij overtoeren. Dit percentage wordt vermenigvuldigd met de kans dat de windturbine inslaat met een hoek van 45 graden of minder en met de kans dat het restprofiel overstroomt. De uitkomst van deze berekening wordt weer vermenigvuldigd met de kans op wiekbreuk waarbij er een specificatie wordt gemaakt voor de kans op wiekbreuk binnen de werpafstand bij nominaal toerental en overtoeren. Voor het oppervlakte binnen de werpafstand wordt er een kans op wiekbreuk gehanteerd van $8,4 \cdot 10^{-4}$ en voor het oppervlakte binnen de werpafstand bij overtoeren wordt er een kans op wiekbreuk gehanteerd van $5,0 \cdot 10^{-6}$.

Doordat er kleine verschillen zitten in de afstand van de windturbines tot de dijk is de trefkans berekend voor de windturbine die het dichtstbij de dijk staat en wordt er aangenomen dat deze trefkans ook geldt voor de andere drie windturbines. Hierdoor ontstaat er een conservatieve benadering van de trefkans.

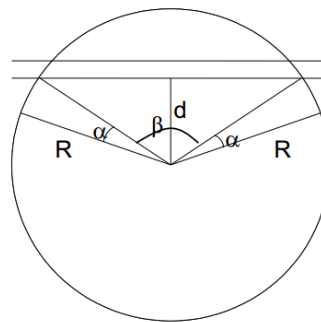
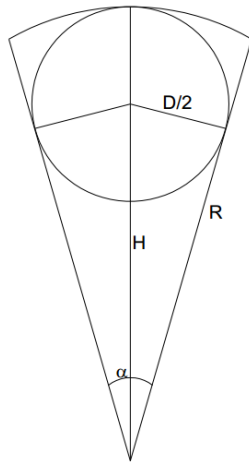
Voor de ondergrens resulteert het toepassen van de bovenstaande methodiek in een trefkans voor de dijk door gevolg van wiekbreuk van $9,39 \cdot 10^{-7}$ per jaar per windturbine. Rekening houdend met drie windturbines is de totale kans op falen van de dijk als gevolg van wiekbreuk voor de ondergrens $2,82 \cdot 10^{-6}$.

Voor de bovengrens resulteert het toepassen van de bovenstaande methodiek in een trefkans voor de dijk door gevolg van wiekbreuk van $9,62 \cdot 10^{-7}$ per jaar per windturbine. Rekening houdend met drie windturbines is de totale kans op falen van de dijk als gevolg van wiekbreuk voor de bovengrens $2,89 \cdot 10^{-6}$.



4.5 Mastbreuk

De reikwijdte van mastbreuk wordt bepaald door de masthoogte en de stand van de turbinebladen op het moment dat de grond wordt geraakt. De kans dat de kritische strook wordt getroffen door een onderdeel van een omvallende windturbine wordt tegelijk verondersteld aan de kans dat een gedeelte van onderstaand cirkelsegment (Figuur 2) in aanraking komt met de kritische strook, hetgeen is geïllustreerd in figuur 3 (Handboek Risicozonering Windturbines, 2014).



Figuur 4: Windturbine gemodelleerd als cirkelsegment.

Figuur 3: Turbine in aanraking met leidingstrook.

De kans dat een windturbine met het windturbinetype Vestas V110 richting de kritische strook vallen wanneer het scenario mastbreuk zich voordoet is 47,9% (172,5 graden / 360 graden). De kans dat het scenario zich voordoet en de kritische strook wordt geraakt is $47,9\% * 1,3 * 10^{-4} = 6,23 * 10^{-5}$. Rekening houdend met het restprofiel (0,1) komt de kans op falen van de dijk als gevolg van mastbreuk op $6,23 * 10^{-6}$ per jaar per windturbine. . Rekening houdend met drie windturbines is de totale kans op falen van de dijk als gevolg van mastbreuk voor de ondergrens $1,87 * 10^{-5}$.

De kans dat een windturbine van het windturbinetype Games G132 richting de kritische strook valt wanneer het scenario mastbreuk zich voordoet is 50,35% (181,27 graden / 360 graden). De kans dat het scenario zich voordoet en de kritische strook wordt geraakt is $50,35\% * 1,3 * 10^{-4} = 6,55 * 10^{-5}$. Rekening houdend met het restprofiel (0,1) komt de kans op falen van de dijk als gevolg van mastbreuk op $6,55 * 10^{-6}$ per jaar per windturbine. Rekening houdend met drie windturbines is de totale kans op falen van de dijk als gevolg van mastbreuk voor de bovengrens $1,97 * 10^{-5}$.

4.6 Gondelafworp

Voor het bereken van de faalkans ten gevolgen van het afvallen van een gondel met rotor of alleen een rotor kan dezelfde aanpak worden gevolgd als 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. Daarmee is de trefkans van de dijk gelijk aan de kans dat het scenario zich voordoet: $4,0 * 10^{-5}$. Indien er rekening wordt gehouden met het restprofiel (0,1) komt de kans op falen van de dijk als gevolg van gondelafworp op $4,0 * 10^{-6}$. Rekening houdend met drie windturbines is de totale kans op falen van de dijk als gevolg van gondelafworp voor de bovengrens $1,20 * 10^{-5}$. Dit scenario komt alleen voor bij de bovengrens van de bandbreedte (windturbinetype Games G132).



5 Conclusie

De kans dat de waterkerende functie van de primaire waterkering faalt als gevolg van de falende windturbines voor de bovengrens van de bandbreedte is $3,45 \cdot 10^{-5}$ per jaar ($2,89 \cdot 10^{-6} + 1,97 \cdot 10^{-5} + 1,20 \cdot 10^{-5}$).

Voor de ondergrens van de bandbreedte is de kans dat de waterkerende functie van de primaire waterkering faalt als gevolg van de falende windturbine $2,15 \cdot 10^{-5}$ per jaar ($2,82 \cdot 10^{-6} + 1,87 \cdot 10^{-5}$).



Bijlage A. Berekening werpafstand

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]

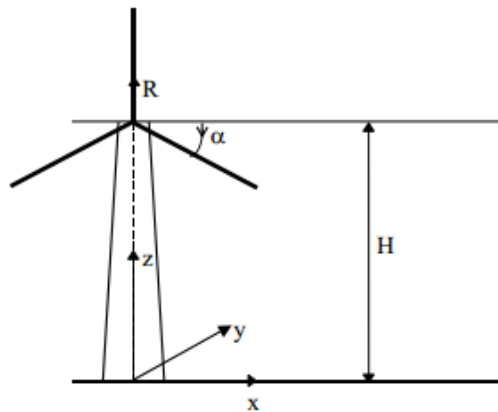
Ω : toerental van de rotor [rad/s]

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

α : azimuthhoek [rad]

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

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



Figuur 1: Overzicht parameters in ballistisch model

De bewegingsvergelijking voor het zwaartepunt is nu

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

Met de beginvoorwaarden

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

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

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



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

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

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

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

2.1.2 Verdelingsfuncties

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

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

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

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

geldt nu

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

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

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

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



Bijlage B. Werpafstanden windturbines

Gamesa G132 op 84 meter ashoogte

BladeThro

Rekenmodel voor externe veiligheid van windturbines volgens het Handboek Risicozonering

BEDIENINGSPANEEL

Databestand:
Gamesa_G132_84 .txt

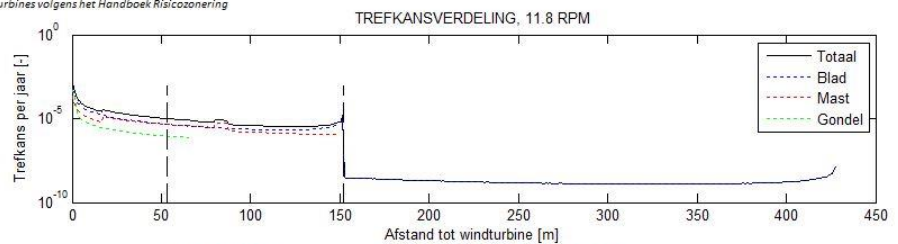
Rekenmodel:
 Ballistisch
 Luchtkrach...

Gebruik mastverstevig...

Bereken p_zwpt op:
 m
 m

Bereken

Copyright: Bosch & Van Rijn, 2014



PARAMETERS

Rotordiameter	132 m
Ashoogte	84 m
Wielengte	64.5 m
Toerental	11.8 RPM
Mastdiameter	5 m
Lengte gondel	15 m
Hoogte gondel	5 m
Zwaartepunt rotorblad	23.76 m
Solidity	0.05 -
Kritiek bladoppervlak	219.8 m ²
Massa blad	- kg
Windsnelheid	- m/s

RESULTATEN

Risicocontouren	
10-5	53 m
10-6	152 m
Werpafstanden	
Gegeven	152 m
Overtoeren	428 m
p_zwpt	
Afstand	237 m
Waard	4.8603e-12
Afstand	238 m
Waard	4.6537e-12

Vestas V110-2MW op 95 meter ashoogte

BladeThro

Rekenmodel voor externe veiligheid van windturbines volgens het Handboek Risicozonering

BEDIENINGSPANEEL

Databestand:
VestasV110_95 .txt

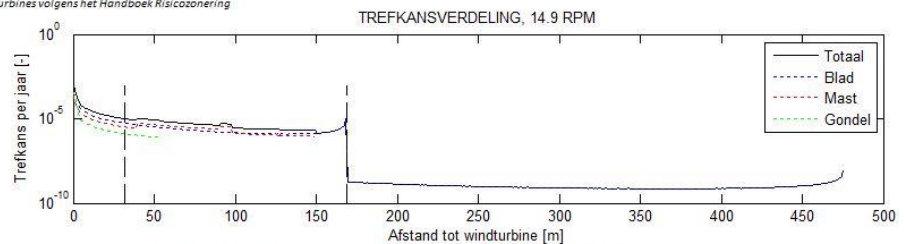
Rekenmodel:
 Ballistisch
 Luchtkrach...

Gebruik mastverstevig...

Bereken p_zwpt op:
 m
 m

Bereken

Copyright: Bosch & Van Rijn, 2014



PARAMETERS

Rotordiameter	110 m
Ashoogte	95 m
Wielengte	54 m
Toerental	14.9 RPM
Mastdiameter	5 m
Lengte gondel	10.4 m
Hoogte gondel	5.4 m
Zwaartepunt rotorblad	19.8 m
Solidity	0.05 -
Kritiek bladoppervlak	158.02 m ²
Massa blad	- kg
Windsnelheid	- m/s

RESULTATEN

Risicocontouren	
10-5	32 m
10-6	169 m
Werpafstanden	
Gegeven	169 m
Overtoeren	476 m
p_zwpt	
Afstand	237 m
Waard	4.3929e-12
Afstand	238 m
Waard	4.3744e-12