

Bosch & van Rijn

Groenmarktstraat 56
3521 AV Utrecht
030 – 677 6466

Auteurs

Hans Kerkvliet MSc.
Drs. Ing. Jeroen Dooper

Opdrachtgever

Nuon



Risicoanalyse

Windturbines en waterkering WP Jaap Rodenburg



Bosch & van Rijn
experts in renewable energy

Risicoanalyse

Windturbines en waterkering WP Jaap Rondenburg

Datum
12-3-2018

Versie
0.2

Bosch & Van Rijn
Groenmarktstraat 56
3521 AV Utrecht

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

© Bosch & Van Rijn 2018

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

HOOFDSTUK 1	INLEIDING	3
1.1	<i>Inleiding</i>	4
1.2	<i>Voornemen</i>	4
1.3	<i>Te onderzoeken windturbinetype Bovenvariant</i>	5
1.4	<i>Toetsingskader</i>	6
1.5	<i>Leeswijzer</i>	7
HOOFDSTUK 2	RISICO'S VAN WINDTURBINES	8
2.1	<i>Risico's van windturbine</i>	9
HOOFDSTUK 3	TREKANS WATERKERING	10
3.1	<i>Kritische strook</i>	11
3.2	<i>Restprofiel</i>	11
3.3	<i>Trefsector</i>	12
3.4	<i>Wiekbreuk</i>	12
3.5	<i>Mastbreuk</i>	13
3.6	<i>Gondelafworp</i>	14
3.7	<i>Conclusie Trefkans dijk</i>	15
HOOFDSTUK 4	CONCLUSIE	16
HOOFDSTUK 5	BIJLAGEN	18
BIJLAGE A	BEREKENING WERPAFSTAND	19
BIJLAGE B	WERPAFSTAND WINDTURBINE	22

Hoofdstuk 1 Inleiding

1.1 Inleiding

Voorliggende trefkansberekening is opgesteld om de faalkans van de dijk rondom het op te schalen windpark Jaap Rodenburg in de gemeente Almere inzichtelijk te maken ten behoeve van de vergunningverlening.

Deze studie toetst de trefkans van de dijk door de windturbines aan de veiligheidsnorm van de dijk, zoals beschreven in de Waterwet.

Hiervoor zijn de bestaande windturbines en de bovenvariant van het voorkeursalternatief (VKA) doorgerekend.

1.2 Voornemen

Onderstaande figuur toont de locatie van de huidige en beoogde windturbines en de nabijgelegen waterkering.

Figuur 1 Ligging van de beoogde op te schalen windpark en de waterkering.



Het voornemen betreft tien windturbines die in plaats komen van de tien bestaande windturbines.

Zowel de bestaande windturbines als de nieuw te plaatsen windturbine maken deel uit van een windlocatie die wordt aangeduid met de naam Jaap Rodenburg II.

De coördinaten van de beoogde windturbines zijn gegeven in onderstaande tabel.

WTB	Coördinaten	
	x	y
1	137164	487516
2	137342	487213
3	137520	486911
4	137563	487983
5	137734	487674
6	137902	487366
7	137930	488413
8	138095	488101
9	138259	487790
10	138409	487505

1.3 Te onderzoeken windturbinetype Bovenvariant

De vergunningaanvraag betreft een bandbreedte. Voor wat betreft de *afmetingen* is deze bandbreedte als volgt opgespannen:

- Ashoogte: Minimaal 90 meter, maximaal 100 meter.
- Rotordiameter: Minimaal 100 meter, maximaal 120 meter.
- Tiphoogte: Maximaal 150 meter.

Aangezien de veiligheidsrisico's van windturbines niet 1-op-1 schalen met de afmetingen is voor de faalkans een windturbinetype uitgekozen die:

- Voldoet aan de bandbreedte-eisen voor wat betreft afmetingen
- De grootste trefkans heeft

Hiervoor is eerst een lijst opgesteld met een aantal verschillende types van verschillende fabrikanten. Hiervan zijn de werpafstanden en risicocontouren bepaald, steeds met de maximale ashoogte (100m) om enerzijds de risicocontouren te kunnen vergelijken en anderzijds een worst case beschouwing te geven. Deze lijst is niet uitputtend, maar dient om aan te tonen dat er verschillende typen beschikbaar zijn, elk met eigen veiligheidsrisico's.

Tabel 1 Voorselectie windturbinetypes, ashoogte 100m

Wtb type	RD (m)	Risikocontouren (m)		Max. werpafstand (m)	
		10^{-5}	10^{-6}	Bij nominaal toerental	Bij overtoeren
Enercon E101	101	50,5	148	148	399
GE GE3.2-103	103	51,5	169	169	474
Lagerwey L100	100	50	153	153	416
Senvion M100	100	50	139	139	367
Enercon E115	115	57,5	150	150	403
GE 2.75-120	120	60	161	161	442
Nordex N117	117	58,5	142	136	356

N.B. niet alle windturbines uit bovenstaande tabel zijn verkrijgbaar op 100m ashoogte. Aangezien de bladen verder worden geworpen met toenemende ashoogte is met zekerheid een worst-case situatie beschouwd ten opzichte van het in werking hebben van dergelijke windturbines op een lagere ashoogte.

Uit Tabel 1 blijkt dat de GE3.2-103 de hoogste 10 min 6 contour en werpafstanden heeft. Deze wordt dan ook in het vervolg van het rapport als 'Bovenvariant' gebruikt om de trefkans van de dijk te bepalen.

Wtb type	RD (m)	10^{-5}	10^{-6}	Bij nominaal toerental	Bij overtoeren
GE GE3.2-103	103	51,5	169	169	474

N.B. de windturbine is berekend op de hoogst mogelijke ashoogte en zou hiermee de tiphoogte van 150m overschrijden, de resultaten geven derhalve een worst-case scenario weer. Het kan zijn dat te bouwen windturbines een andere ashoogte hebben dan in deze paragraaf berekend. Omdat de veiligheidsrisico's toenemen met toenemende ashoogte en de windturbine op de hoogst mogelijke ashoogte is door-gerekend zal een afwijkende ashoogte altijd leiden tot lagere veiligheidsrisico's.

N.B.2. De gegevens van de referentiesituatie zijn gegeven in Hoofdstuk 2.

1.4 Toetsingskader

Voor de nabijgelegen waterkering geldt een veiligheidsnorm van 1/10.000 per jaar. Conform het Handboek Risicozonering Windturbines (versie 3.1, 2014) worden de resultaten van deze risicoanalyse getoetst aan de ontwerpwaarden van de dijkkring.

Als toetsingscriterium wordt gehanteerd:

De additionele faalfrequentie van de geplande windturbines dient kleiner te zijn dan 10% van de autonome faalfrequentie van de primaire waterkering.

1.5 Leeswijzer

Dit rapport bevat de risicoanalyse van het beoogde windpark Jaap Rodenburg II ten opzichte van de waterkering. In hoofdstuk 2 worden de risico's van windturbines besproken waarna in hoofdstuk 3 de trefkans wordt berekend. Het rapport sluit af met een conclusie.

Hoofdstuk 2 Risico's van windturbines



2.1 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 wieklengte.

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:

Alternatief	Wtb type	Ashoogte (m)	Risicocontouren (m)		Max. werpafstand (m)	
			10^{-5}	10^{-6}	Bij nominaal toerental	Bij overtoeren
Ref. Sit. ¹	V66-1.65MW	67	33	111	111	307
Bov. Var. ²	GE3.2-103	100	51,5	171	171	476

De windturbines kunnen een risico verhogend effect hebben op nabijgelegen gebouwen, installaties en infrastructuur.

¹ Ref. Sit. staat voor referentiesituatie

² Bov. Var. staat voor bovenvariant

Hoofdstuk 3 Trefkans Waterkering

3.1 Kritische strook³

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.

3.2 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 (deeltkans) 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 ($5 \times 24 = 120$ 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.

³ De genoemde aanname in de paragrafen kritische strook, restprofiel, trefsector en wiekbreek zijn overgenomen uit het rapport Risicoanalyse: Windturbines en primaire waterkering: Windpark Battennoert van V.J.Winkel (Ventolines B.V.).

3.3 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 wieklengte. Hiermee resulteren de scenario's wiekbreuk, mastbreuk en gondelafval in een risicoverhoging op de waterkering.

3.4 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.

Om de trefkans van de kernzone te berekenen wordt uitgegaan van een geprojecteerd grondoppervlak. De kans dat het zwaartepunt van de wiek in het geprojecteerde oppervlak terecht komt is:

$$p_w = F_a \int_S P_{zwpt}^{(s)} ds$$

Waarin:

P_{zwpt} = trefkans per jaar van het zwaartepunt van het blad
 F_a = $b+2/3L_b$ (effectieve breedte kernzone)
 S = contour langs de kernzone
 L_b = Bladlengte

Alternatief	WTB	Pzwpt	Lb	Fa	Trefkans
Ref. Sit.	1,2,3,7	$1,05 \cdot 10^{-7}$	32,13	142,84	$3,32 \cdot 10^{-3}$
	4	$8,24 \cdot 10^{-12}$	32,13	142,84	$5,69 \cdot 10^{-7}$
Bovenvariant	1,2,3,7	$5,65 \cdot 10^{-9}$	50,14	166,85	$2,47 \cdot 10^{-4}$
	4	$3,39 \cdot 10^{-12}$	50,14	166,85	$4,11 \cdot 10^{-7}$

Rekening houdend met de invalshoek van de wiek (0,25) en het restprofiel (0,1) komt de kans op falen van de dijk als gevolg van wiekbreuk op:

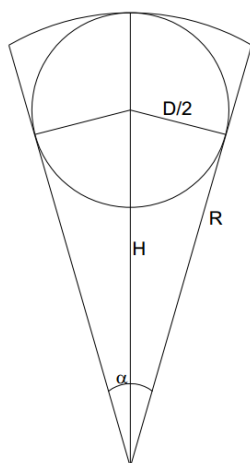
Alternatief	WTB	Trefkans	Faalkans dijk
Ref. Sit.	1, 2, 3, 7	$3,32 \cdot 10^{-3}$	$8,30 \cdot 10^{-5}$
	4	$5,69 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-8}$
Bovenvariant	1,2,3,7	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$
	4	$4,11 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-8}$

N.B. voor WTB 1,2,3 en 7 is de trefkans berekend voor de windturbine met de hoogste trefkans. Deze trefkans wordt als representatief beschouwd voor de andere drie windturbines. Hierdoor ontstaat er een conservatieve benadering

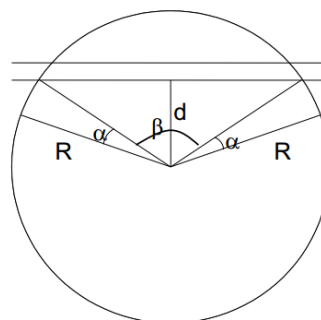
N.B2. Voor WTB 5,6,8,9 en 10 geldt dat de dijk zich bevindt buiten de werpafstand bij overtoeren.

3.5 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 cirkel-segment (Figuur 2) in aanraking komt met de kritische strook, hetgeen is geïllustreerd in figuur 3 (Handboek Risicozonering Windturbines, 2014).



Figuur 2: Windturbine gemodelld als cirkelsegment.



Figuur 3: Turbine in aanraking met kritische strook.

De kans dat de kritische strook wordt geraakt wanneer het scenario mastbreuk zich voordoet is:

Alternatief	WTB	Valhoek	Mastbreuk frequentie	Trefkans
Ref. Sit	1,2,3,7	204,85	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$7,40 \cdot 10^{-5}$
Bovenvariant	1,2,3,7	125,54	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,53 \cdot 10^{-5}$

Rekening houdend met het restprofiel (0,1) komt de kans op falen van de dijk als gevolg van mastbreuk op:

Alternatief	WTB	Trefkans	Faalkans dijk
Ref. Sit.	1,2,3,7	$7,40 \cdot 10^{-5}$	$7,40 \cdot 10^{-6}$
Bovenvariant	1,2,3,7	$4,53 \cdot 10^{-5}$	$4,53 \cdot 10^{-6}$

N.B. Het scenario mastbreuk komt alleen voor bij windturbines 1,2,3 en 7.

3.6 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: $4,0 \cdot 10^{-5}$. Indien er rekening wordt gehouden met het restprofiel (0,1) komt de kans op falen van de dijk als gevolg van gondelafworp op $4,0 \cdot 10^{-6}$. Dit scenario komt alleen voor bij windturbines 1, 2 en 3 van de referentiesituatie.

3.7 Conclusie Trefkans dijk

De faalkans voor de dijk is een sommatie van alle faalkansen vermenigvuldigd met het aantal windturbines. Dit leidt tot de volgende faalkans:

Alternatief	Faalkans dijk
Ref. Sit.	$4,41 \cdot 10^{-4}$
Bovenvariant	$4,29 \cdot 10^{-5}$

Hoofdstuk 4 Conclusie

De kans dat de waterkerende functie van de primaire waterkering faalt als gevolg van de falende windturbine is:

Alternatief	Faalkans dijk
Ref. Sit.	$4,41 \cdot 10^{-4}$
Bovenvariant	$4,29 \cdot 10^{-5}$

Dit resulteert in een faalkansverhoging (t.o.v. de huidige toegestane faalkans van 1/10000) door de windturbines van:

Alternatief	Faalkans dijk	Faalkans verhoging
Ref. Sit.	$4,41 \cdot 10^{-4}$	441,37%
Bovenvariant	$4,29 \cdot 10^{-5}$	42,89%

Hieruit blijkt dat de bovenvariant van het voorkeursalternatief een verbetering betekent van de dijkveiligheid ten opzichte van de referentiesituatie. Dit komt voornamelijk doordat het scenario gondelafworp niet meer van toepassing is.

Hoofdstuk 5 Bijlagen

Bijlage A Berekening werpafstand

2.2 Ballistisch model met luchtkrachten

2.2.1 Uitgangspunten

Het werpmodel gaat ervan uit dat op het weggegooid 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 weggegooid 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

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

De volgende randvoorwaarden gelden:

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

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:

$C_{D,x}$ 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.

Bijlage B Werpafstand Windturbine

GE3.2-103 op 100 meter ashoogte

BladeThro

Rekenmodel voor externe veiligheid van windturbines volgens het Handboek Risicozonering

BEDIENINGSPANEEL

Databestand:
 .txt

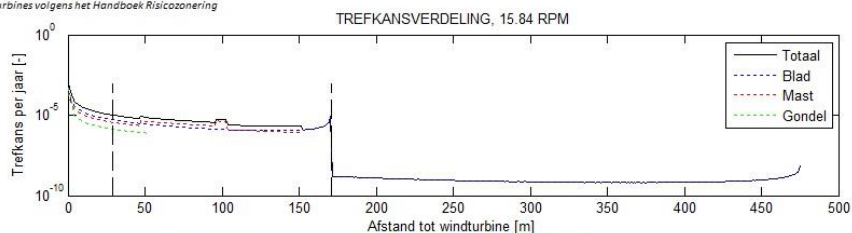
Rekenmodel
☒ Ballistisch
☐ Luchtkrach...

☐ Gebruik mastverstevig...

Bereken p_zwpt op:
 m
 m

Bereken

Copyright Bosch & Van Rijn, 2014



PARAMETERS

Rotordiameter	103 m
Ashoogte	100 m
Wiek lengte	50.14 m
Toerental	15.84 RPM
Mastdiameter	5 m
Lengte gondel	15 m
Hoogte gondel	5 m
Zwaartepunt rotorblad	18.54 m
Solidity	0.05 -
Kritiek bladoppervlak	140.29 m²
Massa blad	- kg
Windsnelheid	- m/s

RESULTATEN

Risicocontouren	
10-5	29 m
10-6	171 m
Werpafstanden	
Gegeven	171 m
Overtoeren	476 m
p_zwpt	
Afstand	
Waard	
Afstand	
Waard	

Vestas V66-1.65 op 67 meter ashoogte

BladeThro

Rekenmodel voor externe veiligheid van windturbines volgens het Handboek Risicozonering

BEDIENINGSPANEEL

Databestand:
 .txt

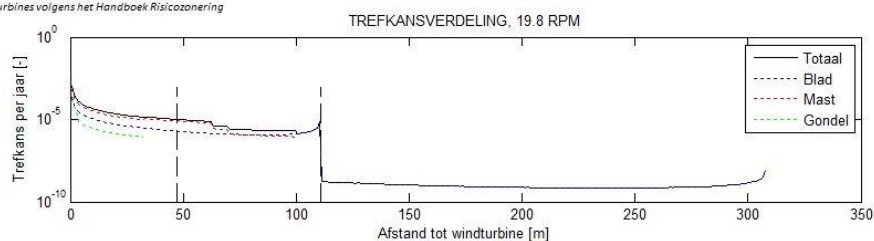
Rekenmodel
☒ Ballistisch
☐ Luchtkrach...

☐ Gebruik mastverstevig...

Bereken p_zwpt op:
 m
 m

Bereken

Copyright Bosch & Van Rijn, 2014



PARAMETERS

Rotordiameter	66 m
Ashoogte	67 m
Wiek lengte	32.13 m
Toerental	19.8 RPM
Mastdiameter	15 m
Lengte gondel	5 m
Hoogte gondel	5 m
Zwaartepunt rotorblad	11.88 m
Solidity	0.05 -
Kritiek bladoppervlak	62.69 m²
Massa blad	- kg
Windsnelheid	- m/s

RESULTATEN

Risicocontouren	
10-5	47 m
10-6	111 m
Werpafstanden	
Gegeven	111 m
Overtoeren	308 m
p_zwpt	
Afstand	
Waard	
Afstand	
Waard	



Groenmarktstraat 56
3521 AV Utrecht
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.