

Titel Risicoanalyse windturbines en waterkering – Windenergie A16

Datum 13-08-2018

Auteur Hans Kerkvliet MSc. & Drs. Ing. Jeroen Dooper

Inleiding

Voorliggende risicoanalyse is opgesteld om de trefkans op waterkeringen van nieuw te plaatsen windturbines in de A16-zone inzichtelijk te maken ten behoeve van de watervergunning.

Deze studie toetst de risico's van de windturbines aan de norm zoals beschreven in de paragraaf toetsingskader.

De onderzochte opstelling is gelijk aan het *voorkeursalternatief* (hierna: VKA) uit het milieueffectrapportage (hierna: MER) dat voor het plan Windenergie A16 is opgesteld. Voor het VKA liggen de windturbinelocaties vast, maar is er een bandbreedte voor de ashoogte, rotordiameter en tiphoogte mogelijk gemaakt.

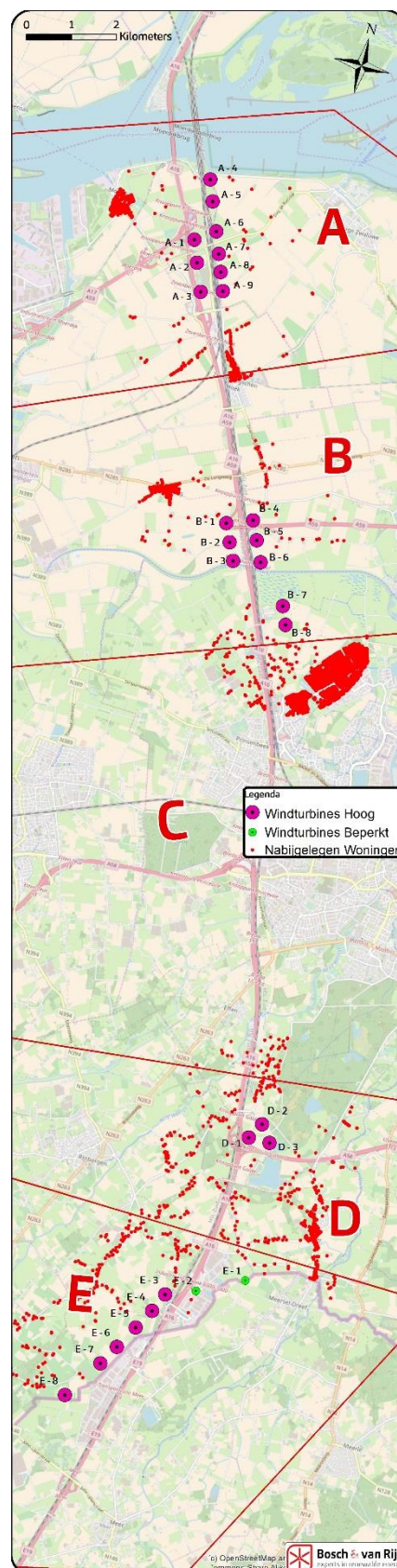
In dit rapport wordt de bovengrens doorgerekend van de bandbreedte, bestaande uit twee typen windturbines.

Voornemen

Het plangebied van het voornemen strekt zich ca. 1km uit aan weerszijden van de A16 vanaf de Moerdijkbrug tot aan de grens met België bij Hazeldonk. In totaal worden 28 windturbines mogelijk gemaakt, waarvan 2 'beperkte' windturbines en 26 'hoge' windturbines.

Het gebied waarbinnen de windturbines komen is opgedeeld in vijf deelgebieden, die ook weer meerdere inrichtingen kunnen bevatten. In totaal zijn er 11 inrichtingen. De totale opstelling is te zien in het figuur hiernaast en is beschreven in Tabel 1.

Figuur 1: Ligging van de beoogde windturbines en omliggende woningen (rode stipjes in kaart).



Tabel 1 Beschrijving van de inrichtingen

Deelgebied	Cluster	Inrichtingen	Aantal wtbs	Initiatiefnemer
A	Klaverpolder	WP RWS	3	Rijkswaterstaat
		WP Lage Zwaluwe	6	Nuon
B	Zonzeel	Gezamenlijk plan Zonzeel	6	Raedthuys/Izzy/Eneco
		WP Nieuwveer	2	Verhoef
D	Galder	WP Galder	3	Raedthuys/REF
E	Hazeldonk	WP de Roover	1	Landzeel BV
		WP Breda Hazeldonk	1	GreenTrust
		E-3 REF	1	REF
		WP Treeport	3	Eneco/BCT
		E-7 Raedthuys	1	Raedthuys
		WP Waavenberg	1	Landzeel BV

Verder worden er voor de windturbines twee klassen aan windturbines onderzocht, waarbij voor elke klasse de bovengrens onderzocht wordt.

Tabel 2 Windturbineklassen van de beoogde windturbines

Klasse	Ashoogte (m)	Rotor (m)	Tiphoogte (m)
Beperkt	90-110	90-110	135-165
Hoog	122-142	136-150	190-210

De aantallen windturbines staan in Tabel 3.

Tabel 3 – Aantallen van de beoogde windturbines

Alternatief	Aantal windturbines		
	beperkt	hoog	totaal
VKA	2	26	28

De locaties van de windturbines¹ zijn in bovenstaande figuur weergegeven. In het figuur zijn ook nabijgelegen woningen gemarkeerd. Hiervoor is als bron voor de adresgegevens de Basisadministratie Adressen en Gebouwen (BAG) uit januari 2018 gebruikt.

¹ De exacte locaties van de windturbines zijn gegeven in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

Risico-inventarisatie

Risico's van een windturbine voor de omgeving bestaan uit 3 typen falen:

1. het afbreken van (een gedeelte van) een windturbineblad,
2. het omvallen van een windturbine door mastbreuk,
3. en 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. Hierbij worden twee scenario's onderscheiden; werpafstand bij nominaal toerental en de werpafstand bij overtoeren². 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 de afmetingen van de bandbreedte van het VKA zijn twee worstcase windturbines bepaald. Voor deze windturbintypes zijn op basis van generieke faalfrequenties (Bijlage A, Handboek Risicoberekeningen Windturbines (HRW) 2014), het kogelbaanmodel (Bijlage C, HRW 2014) en parameters van de specifieke windturbintypes de werpafstanden en risicocontouren berekend (Bijlage B). Hieruit volgen de volgende afstanden:

Tabel 4 Risicocontouren en werpafstanden van onderzochte windturbintype

Variant	Wtb type	Ashoogte (m)	Risicocontouren (m)		Max. werpafstand (m)	
			10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	Bij nominaal toerental	Bij overtoeren
Windturbineklasse Beperkt						
Boven	Ref. WTB	110	55	177	177	488
Windturbineklasse Hoog						
Boven	Ref. WTB	135	75	180	180	470

De windturbines kunnen een risico verhogend effect hebben op nabijgelegen waterkeringen. Om voor het A16-zone te bepalen welke windturbines een risico verhogend effect hebben op de waterkering is eerst de maximale werpafstand bij nominaal toerental van windturbineklasse 'hoog' in kaart gebracht en daarbinnen gekeken of er zich een waterkering bevindt binnen de werpafstand bij nominaal toerental. Uit naastgelegen figuur blijkt dat de volgende inrichtingen een risico verhogend effect hebben op de waterkering.

- ❖ **Inrichting 'WP Lage Zwaluwe':** Er bevindt zich een primaire waterkering binnen de maximale werpafstand bij nominaal toerental van windturbine A-4.
- ❖ **Inrichting 'WP Gezamenlijk Plan Zonzeel':** Er bevindt zich een regionale waterkering binnen de werpafstand bij nominaal toerental van windturbines B-3 en B-6.
- ❖ **Inrichting 'WP Nieuwveer':** Er bevindt zich een regionale waterkering binnen de werpafstand bij nominaal toerental van windturbine B-7.



² Het Handboek Risicozonering Windturbines (HRW) definieert "overtoeren" als 2x nominaal toerental. Echter, het is fysiek niet mogelijk dat moderne, grote windturbines een toerental van 2x nominaal kunnen halen. Vanwege deze reden wordt alleen gekeken naar het scenario werpafstand bij nominaal toerental.

Toetsingskader

In het plangebied bevinden zich twee verschillende categorieën waterkeringen die een verschillende toetsingskader hebben³.

Primaire waterkering

De faalkanseisen op doorsnedeniveau is bij de ondergrens 1/300 per jaar, die verder kan worden onderverdeeld in de volgende faalmechanisme:

- Macrostabiliteit binnenwaarts: 1/129500 per jaar.
- Macrostabiliteit buitenwaarts: 1/12950 per jaar.
- Piping: 1/419167 per jaar
- Graserosie kruin en binnentalud (hoogte): 1/2500 per jaar.

Als toetsingscriterium wordt gehanteerd:

- *De additionele faalkans op doorsnedeniveau dient kleiner te zijn dan 10% van de faalkanseis op doorsnedeniveau per direct faalmechanisme.*
- *De additionele faalkans op trajectniveau dient kleiner te zijn dan 0,5% van de toelaatbare faalkans (de norm) op trajectniveau.*

Regionale waterkering

Voor de regionale waterkeringen in het plangebied geldt een veiligheidsnorm van 1/100 jaar, waarbij als toetsingswaarde wordt gehanteerd:

- *De additionele faalfrequentie van de geplande windturbines dient kleiner te zijn dan 0,5% van de autonome faalfrequentie van de regionale waterkering.*

Trefkans Waterkering

Kritische strook

Als kritische strook is voor de regionale waterkering 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) terwijl voor de primaire waterkering een kritische strook van 87 meter is aangehouden (57 aan de zuid zijde t.o.v. de kruin-as en 30 meter aan de noord zijde t.o.v. de kruin-as). De ratio achter de kritische strook is dat hiermee ten minste het functionele deel van de kruin wordt opgevangen.

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.

³ Het toetsingskader voor de waterkeringen is aangeleverd door het Waterschap Brabantse Delta.

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:

$P(\text{niet te keren storm tijdens herstel}) = 5 \text{ lichte stormen per jaar} \times (35 \text{ uur} / 8760 \text{ uur per jaar}) + 5 \text{ lichte stormen per jaar} \times (24 \text{ uur} / 8760 \text{ uur per jaar}) + 5 \text{ lichte stormen per jaar} \times (120 \text{ uur} / 8760 \text{ uur per jaar}) = 0,1$ per jaar.

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 wiek-lengte. Hiermee resulteren de scenario's wiekbreuk (WTB A-4, B-3, B-6 en B-7), mastbreuk (WTB A-4, B-3, B-6 en B-7) en gondelafworp (B-3, B-6 en B-7) in een risicoverhoging op de waterkering.

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 nominaal toerental. 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:

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

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

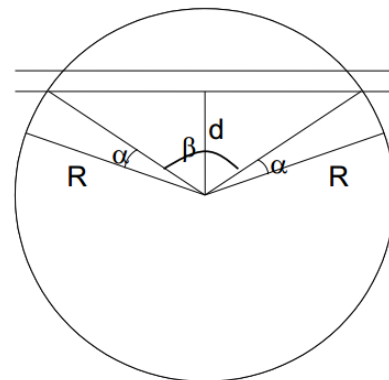
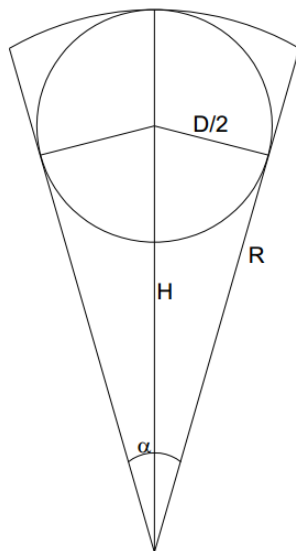
Windturbine	P_{zwpt}	L_b	F_a	Trefkans
A-4	$6,20 \cdot 10^{-9}$	73,70	135	$2,57 \cdot 10^{-4}$
B-3	$3,15 \cdot 10^{-8}$	73,70	89	$1,00 \cdot 10^{-3}$
B-6	$2,51 \cdot 10^{-8}$	73,70	89	$7,97 \cdot 10^{-4}$
B-7	$8,58 \cdot 10^{-9}$	73,70	89	$2,53 \cdot 10^{-4}$

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

Windturbine	Trefkans	Faalkans dijk
A-4	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$6,41 \cdot 10^{-6}$
B-3	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$
B-6	$7,97 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$
B-7	$2,53 \cdot 10^{-4}$	$6,34 \cdot 10^{-6}$

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 2: Windturbine gemodelleerd 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:

Windturbine	Valhoek	Mastbreuk frequentie	Trefkans
A-4	170	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$6,14 \cdot 10^{-5}$
B-3	230	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$8,31 \cdot 10^{-5}$
B-6	207	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$7,49 \cdot 10^{-5}$
B-7	182	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$

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

Windturbine	Trefkans	Faalkans dijk
A-4	$5,07 \cdot 10^{-05}$	$6,14 \cdot 10^{-06}$
B-3	$8,31 \cdot 10^{-05}$	$8,31 \cdot 10^{-06}$
B-6	$7,49 \cdot 10^{-05}$	$7,49 \cdot 10^{-06}$
B-7	$6,58 \cdot 10^{-05}$	$6,58 \cdot 10^{-06}$

Gondelafworp

Voor het berekenen 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 WTB B-3, B-6 en B-7.

Totale Trefkans dijk

De faalkans voor de dijk is een sommatie van alle faalkansen van de verschillende windturbines. Dit leidt tot de volgende faalkans per windturbine:

Windturbine	Totale Faalkans
WP Lage Zwaluwe	
WTB A-4	$1,26 \cdot 10^{-05}$
WP Gezamenlijk plan Zonzeel	
WTB B-3	$3,74 \cdot 10^{-05}$
WTB B-6	$3,14 \cdot 10^{-05}$
WP Nieuwveer	
WTB B-7	$1,03 \cdot 10^{-05}$

Conclusie Waterkering

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

Windturbine	Totale Faalkans
WP Lage Zwaluwe	
WTB A-4	$1,26 \cdot 10^{-05}$
WP Gezamenlijk plan Zonzeel	
WTB B-3	$3,74 \cdot 10^{-05}$
WTB B-6	$3,14 \cdot 10^{-05}$
WP Nieuwveer	
WTB B-7	$1,03 \cdot 10^{-05}$

Dit resulteert in een faalkansverhoging van de autonome faalkans door de windturbines van:

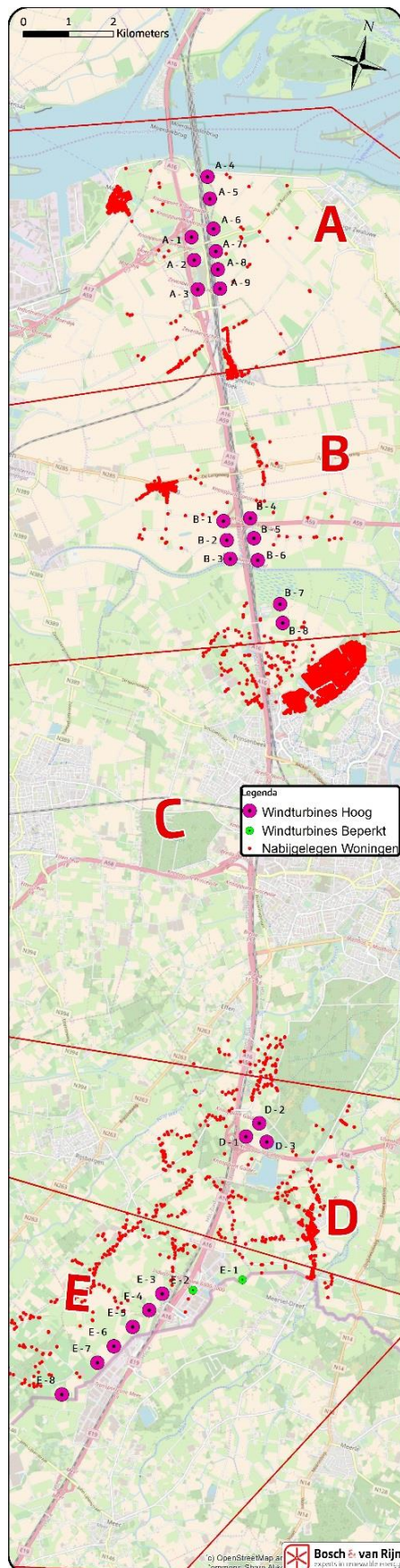
Windturbine	Intrinsieke faalkans	Faalkans door WTB	Faalkansverhoging
WP Lage Zwaluwe			
WTB A-4	$3,33 \cdot 10^{-03}$	$1,26 \cdot 10^{-05}$	0,38%
WP Gezamenlijk plan Zonzeel			
WTB B-3	$1,00 \cdot 10^{-02}$	$3,74 \cdot 10^{-05}$	0,37%
WTB B-6	$1,00 \cdot 10^{-02}$	$3,14 \cdot 10^{-05}$	0,31%
WP Nieuwveer			
WTB B-7	$1,00 \cdot 10^{-02}$	$1,03 \cdot 10^{-05}$	0,10%

Voor WTB A-4 moet verder naast trajectniveau ook gekeken worden naar direct faalmechanisme op doorsnedeniveau. Voor dit onderzoek is alleen het aspect Graserosie kruin en binnentalud relevant:

Windturbine	Faalkans Graserosie Kruin en binnentalud	Faalkans door WTB	Faalkansverhoging
WP Lage Zwaluwe			
WTB A-4	$4,0 \cdot 10^{-04}$	$1,26 \cdot 10^{-05}$	3,15%

Wanneer de faalkansverhogingen worden vergeleken met het toetsingskader kan worden geconcludeerd dat alle windturbines ruim voldoen aan de genoemde richtwaarden.

Bijlage A Voorkeursalternatief





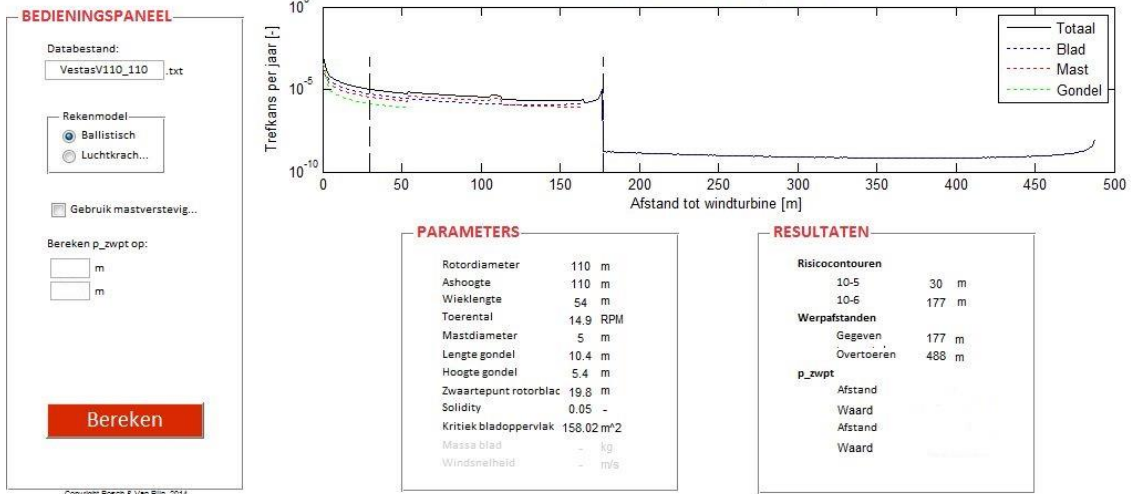
Alt	WTB	POINT_X	POINT_Y	Tiphoogte	Type
VKA	1	104224	412401,1	210	A - 1
VKA	2	104414,6	411926,2	210	A - 2
VKA	3	104663,4	411318	210	A - 3
VKA	4	104224,1	413781,5	210	A - 4
VKA	5	104403,3	413327,6	210	A - 5
VKA	6	104652	412703,4	210	A - 6
VKA	7	104831,5	412236,9	210	A - 7
VKA	8	104980,1	411859,1	210	A - 8
VKA	9	105134,6	411463,3	210	A - 9
VKA	10	106539,9	406508,2	210	B - 1
VKA	11	106720,7	406116,5	210	B - 2
VKA	12	106902,1	405737,3	210	B - 3
VKA	13	107099,6	406719,9	210	B - 4
VKA	14	107292,3	406312,6	210	B - 5
VKA	15	107502,5	405864,8	210	B - 6
VKA	16	108226,4	405055,1	210	B - 7
VKA	17	108391	404665,8	210	B - 8
VKA	18	110553,8	393462,1	210	D - 1
VKA	19	110759,9	393823,1	210	D - 2
VKA	20	111026,3	393466,8	210	D - 3
VKA	21	111294	390374,8	165	E - 1
VKA	22	110243	389690,3	165	E - 2
VKA	23	109658,6	389617,8	210	E - 3
VKA	24	109472	389193	210	E - 4
VKA	25	109217	388740	210	E - 5
VKA	26	108924	388217	210	E - 6
VKA	27	108665,4	387770,8	210	E - 7
VKA	28	108084,9	386886,5	210	E - 8

Bijlage B Werpafstanden turbinetype

Vestas V110 op 110 meter ashoogte en 110 meter rotordiameter

BladeThro

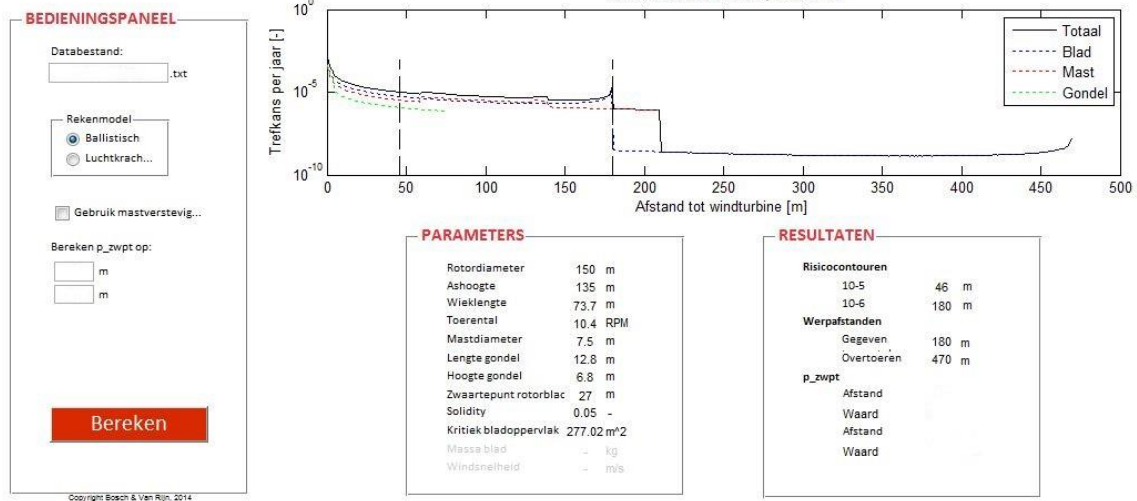
Rekenmodel voor externe veiligheid van windturbines volgens het Handboek Risicozonering



Vestas V150 op 135 meter ashoogte en 150 meter rotordiameter

BladeThro

Rekenmodel voor externe veiligheid van windturbines volgens het Handboek Risicozonering



Bijlage C 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]

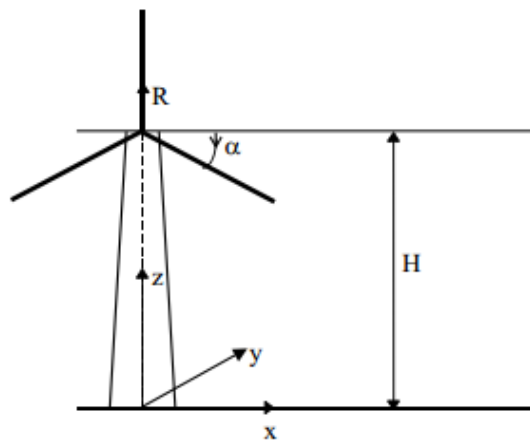
Ω : toerental van de rotor [rad/s]

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 terechtkomt gegeven bladbreuk. Bij het onderhavige model worden de luchtkrachten niet meegenomen, zodat alleen het toerental en de azimuthhoek als stochastische grootheden overblijven. Tevens geldt dat f_{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 terechtkomt, is gegeven door

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

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

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

geldt nu

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

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

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

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



Bosch & Van Rijn
Groenmarktstraat 56
3521 AV Utrecht

Tel: 030 - 677 64 66
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.