

Memo

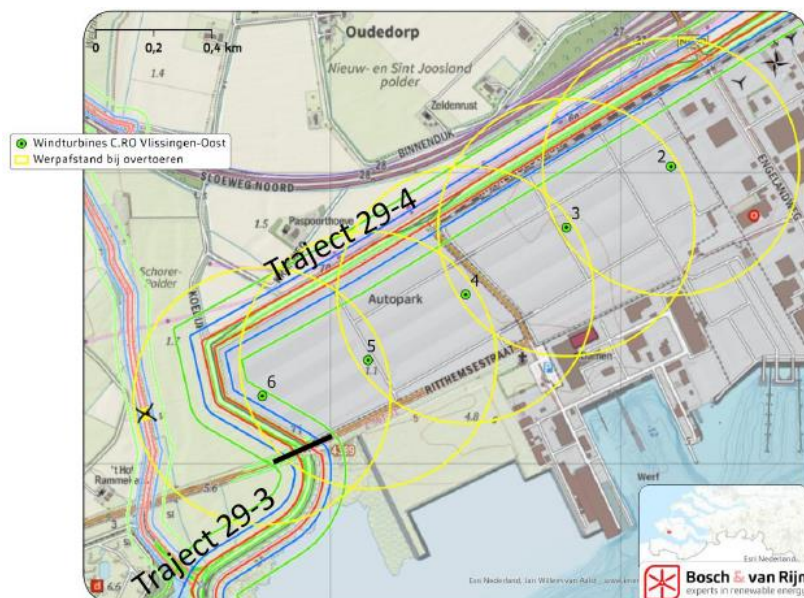
HaskoningDHV Nederland B.V.
Maritime & Aviation

Aan: Eneco Wind B.V. T.a.v. dhr. J.A.Scheele
Van: Jurgen Cools
Datum: 15 juni 2020
Kopie: Bosch & van Rijn - Wouter Verweij en Hans Kerkvliet
Ons kenmerk: BH2769MANT2003111330
Classificatie: Project gerelateerd
Goedgekeurd door Ilse Hergarden

Onderwerp: Windpark C.RO Vlissingen-Oost - Bepaling additionele faalkans waterkering

1 Introductie

Momenteel wordt door Bosch & van Rijn in opdracht van Eneco de watervergunning voorbereid voor het windpark C.RO in Vlissingen-Oost. Het project beoogt de aanleg van vijf windturbines binnen de grenzen van de bedrijfslocatie van C.RO. De windturbines zijn voorzien nabij een primaire waterkering (normtrajecten 29-3 en 29-4), die in beheer is bij waterschap Scheldestromen. De ligging van de turbines en de zonering van de waterkering is aangegeven in Figuur 1-1. Uit de figuur blijkt dat bij falen van de windturbines 2, 3, 4, 5 en 6 de waterkeringszonering geraakt kan worden (windturbine 1 is komen te vervallen).



Figuur 1-1: Ligging windturbines

Voor de watervergunning dient in beeld te worden gebracht wat de bovengrondse¹ effecten zijn van het windpark op de waterveiligheid. Met bovengrondse effecten wordt bedoeld:

- bladworp bij nominaal toerental;

¹ De beoordeling van ondergrondse effecten, zoals trillingen, maakt geen onderdeel uit van deze studie. Vanwege de ligging van de fundaties op ruime afstand van de beschermingszones (invloedsgebied) zullen deze effecten naar verwachting verwaarloosbaar zijn.

- bladworp bij overtoeren;
- mastbreuk;
- gondelval.

Waterschap Scheldestromen heeft gevraagd om een risicoanalyse, die is gebaseerd op de 'KPR methodiek' conform KPR memo 473 (Windturbines op of nabij primaire waterkeringen).

In dit rapport wordt de additionele faalkansfrequentie door bovengrondse effecten bepaald met een grove inschatting op basis van de raakfrequentie bij falen van een windturbine.

Een gedetailleerde inschatting van de additionele faalfrequentie op basis van een restprofiel maakt geen onderdeel uit van deze studie. Waterschap Scheldestromen heeft vooraf aangegeven, dat rekenen aan het restprofiel niet nodig is.

2 Referenties

Voor de uitwerking hebben we gebruik gemaakt van de volgende gegevens:

- [REF1] Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN);
- [REF2] Legger waterschap Scheldestromen (interactieve kaart).
- [REF3] Normtrajecten uit bijlagen I en IA bij de Waterwet (<https://wetten.overheid.nl/>)
- [REF4] STOWA rapport 2018-53, Handreiking Windturbines en Waterkeringen – Techniek.
- [REF5] Kennisplatform Risicobenadering (KPR), Memo Windturbines op of nabij primaire waterkeringen, KPR nr. 473, 19 juli 2018.
- [REF6] Kennisplatform Risicobenadering (KPR), Factsheet post "overig" in de faalkansbegroting en indirecte mechanismen, KPR, 9 november 2016.
- [REF7] DNV GL (in opdracht van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland), Handboek Risicozonering Windturbines. Herziene versie 3.1, september 2014.
- [REF8] Ministerie van I en M, 2016. Schematiseringshandleiding grasbekleding. WBI 2017. Versie 1.0. Rijkswaterstaat WVL, 1 september 2016.
- [REF9] Deltares, Hydraulische Belastingen Kust, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Project 1230087-002. Deltares, 2017

3 Beoordelingskader

Voor de situatie met windturbines wordt de kans op overstroming beoordeeld volgens methoden die aansluiten op het WBI2017. Binnen het WBI2017 worden windturbines bestempeld als Niet Waterkerende Objecten (NWO's). Ten aanzien van NWO's wordt er binnen het WBI2017 geen faalkansruimte gereserveerd. In plaats daarvan wordt KPR methodiek [REF5] gevolgd, zoals aanbevolen in de STOWA handreiking [REF4].

Volgens de KPR methodiek kan de faalkansruimte voor de bijdrage van NWO's worden gevonden binnen de directe dijkfaalmechanismen. Uitgegaan wordt van een conservatieve benadering volgens optie 'A3' uit de KPR memo. In deze optie dient de kansbijdrage te voldoen aan de volgende eis:

De additionele faalfrequentie door de windturbines, per afzonderlijk faalmechanisme op doorsnedeniveau, is maximaal 1% van de toelaatbare faalfrequentie per faalmechanisme op doorsnedeniveau behorende bij de norm uit de Waterwet.

Bij deze optie wordt alleen gekeken naar de kans op het bezwijken van de windturbine en het optreden van een faalmechanisme. Deze kans moet steeds kleiner zijn dan 1% van de faalkanseis voor het betreffende faalmechanisme. Bij deze optie wordt per faalmechanisme feitelijk een overschrijding van het faalkansbudget met 1% toegestaan.

4 Faalkanseisen voor de waterkering

4.1 Normfrequentie

De normspecificatie voor de primaire waterkering, uitgedrukt in een ondergrens en een signaleringswaarde van de overstromingskanseis per dijktraject, is in de Waterwet [REF3] vastgelegd.

Voor dijktrajecten 29-3 en 29-4 is de normspecificatie als volgt:

Tabel 4-1: Normfrequentie waterkering

Dijktraject	Signaleringswaarde [1/jaar]	Ondergrens [1/jaar]	Lengte dijktraject [km]
29-3 (Walcheren)	1:100.000 ($1 \cdot 10^{-5}$)	1:30.000 ($3,33 \cdot 10^{-5}$)	7,1
29-4 (Walcheren)	1:1.000 ($1 \cdot 10^{-3}$)	1:1.000 ($1 \cdot 10^{-3}$)	12,5

Voor de beoordeling van effecten op een dijktraject wordt de ondergrens gebruikt, dit is de Maximaal Toelaatbare Kans (MTK).

4.2 Faalkanseisen

De MTK is uitgesplitst naar verschillende faalmechanismen. Dit is gedaan aan de hand van de standaard faalkansruimteverdeling, zoals aangegeven in Tabel 4-2.

Tabel 4-2: Faalkansruimtefactoren per faalmechanisme

Type waterkering	Faalmechanisme	Faalkansruimtefactor ω
Dijk	Overloop en golfoverslag	0,24
	Opbarsten en piping	0,24
	Macrostabieliteit binnenwaarts	0,04
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	0,10
Kunstwerken	Niet sluiten	0,04
	Piping	0,02
	Constructief falen	0,02
Overig		0,30
Totaal		1,00

In Tabel 4-3 en Tabel 4-4 is voor respectievelijk dijktraject 29-3 en 29-4 een overzicht gegeven van de faalkanseis per faalmechanisme, de zogenaamde $P_{EIS;MECH}$.

Vervolgens is per faalmechanisme aan de hand van de lengtefactor 'N' de faalkanseis op doorsnedeniveau ($P_{EIS;MECH;DSN}$) bepaald, zie onderstaande tabellen.

Tenslotte is de toegestane faalfrequentietoename bepaald als 1% van de norm op doorsnedeniveau ($P_{EIS;MECH;DSN;1\%}$).

Tabel 4-3: Faalkanseisen per faalmechanisme op doorsnedeniveau Dijktraject 29-3

Faalmechanisme	Faalkanseis			Berekening (volgens par. 1.2 van OI2014v4)
	$P_{EIS;MECH}$ [1/jaar]	$P_{EIS;MECH;DSN}$ [1/jaar]	$P_{EIS;MECH;DSN;1\%}$ [1/jaar]	
Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-9}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,04}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,033 \cdot L_{traject}}{50}$
Macrostabiliteit Buitenwaarts (STBU)	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-8}$	Voor buitenwaartse macrostabiliteit is de faalkanseis op doorsnedeniveau voor macrostabiliteit gedeeld door de kans 0,1 op een overstroming gegeven macrostabiliteitsverlies buitenwaarts
Piping (STPH)	$8,00 \cdot 10^{-5}$	$7,64 \cdot 10^{-7}$	$7,64 \cdot 10^{-9}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,24}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,4 \cdot L}{300}$
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	$8,00 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-8}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,24}{N}$ met N=3 [REF8]
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$5,56 \cdot 10^{-7}$	$5,56 \cdot 10^{-9}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,05}{N}$ met N=3 [REF8]
Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)	Geen eigen faalkansruimte [REF8]			
Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)	Geen eigen faalkansruimte [REF8]			

Tabel 4-4: Faalkanseisen per faalmechanisme op doorsnedeniveau Dijktraject 29-4

Faalmechanisme	Faalkanseis			Berekening (volgens par. 1.2 van OI2014v4)
	$P_{EIS;MECH}$ [1/jaar]	$P_{EIS;MECH;DSN}$ [1/jaar]	$P_{EIS;MECH;DSN;1\%}$ [1/jaar]	
Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-6}$	$4,32 \cdot 10^{-8}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,04}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,033 \cdot L_{traject}}{50}$
Macrostabiliteit Buitenwaarts (STBU)	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-7}$	Voor buitenwaartse macrostabiliteit is de faalkanseis op doorsnedeniveau voor macrostabiliteit gedeeld door de kans 0,1 op een overstroming gegeven macrostabiliteitsverlies buitenwaarts
Piping (STPH)	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,24}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,4 \cdot L}{300}$
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,24}{N}$ met N=2 [REF8]
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-7}$	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,05}{N}$ met N=2 [REF8]
Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)	Geen eigen faalkansruimte [REF8]			
Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)	Geen eigen faalkansruimte [REF8]			

5 Bepaling additionele faalfrequentie

5.1 Methodiek

In dit hoofdstuk wordt de additionele faalkans berekend en getoetst aan de faalkanseis. De bepaling van de additionele aanpak is volgens KPR beoordelingsmethode A3 uitgevoerd (zie hoofdstuk 3). De additionele faalkans wordt bepaald door:

1. De kans op falen van de windturbine;
2. De kans dat een falende windturbine de waterkering treft. Voor het bepalen van de trefkans is de waterkering onderverdeeld in zones, die relevant zijn voor de verschillende faalmechanismen van de dijk.
3. De kans dat een windturbineonderdeel de waterkering treft;
4. De kans op een kritieke hydraulische belastingsituatie binnen de vereiste tijd voor noodreparatie of herstel.

In onderstaande paragrafen zijn de bovenstaande kansen nader uitgewerkt

5.2 Faalfrequentie windturbine

De faalfrequenties voor de voorgenoemde maatgevende windturbine zijn afkomstig uit het Handboek Risicozonering Windturbines [REF7] en zijn als volgt:

Tabel 5-1: faalfrequenties windturbine

Scenario	Faalfrequentie [1/jaar]	
	Verwachtingswaarde	95% betrouwbaarheid
Omvallen van de mast (inclusief gondel/rotor)	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Neerstorten van de gondel en/of de rotor	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Bladbreek bij nominaal toerental	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
Bladbreek bij overtoeren	$<5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$

Voor de beschouwing van de additionele faalkans is uitgegaan van de 95%-waarden. Dit zijn veilige waarden: de kans dat de faalfrequentie lager is, is 95%. In de overstromingskansbenadering wordt idealiter met de verwachtingswaarden van faalfrequenties gerekend [REF5]. Er is dus sprake van verborgen veiligheden, waardoor dit een conservatieve benadering is.

5.3 Raakfrequenties

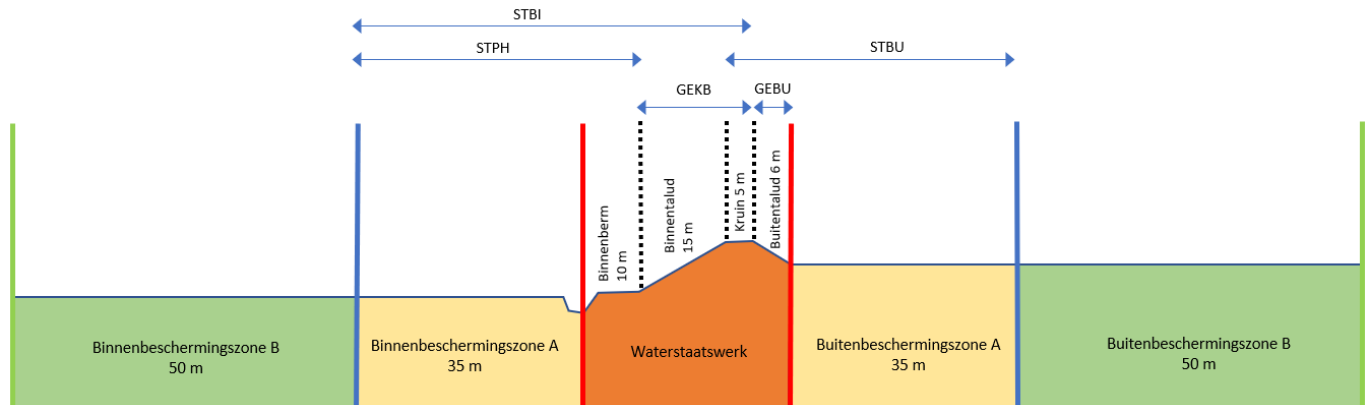
De gevolgen van een bovengronds faalincident voor de waterveiligheid hangen sterk af van de locatie waar het gefaalde object landt. Om dit inzichtelijk te maken, is de waterkering verdeeld in zones. Aan de hand van de Legger [REF2] en de hoogtekaart [REF1] zijn de volgende zones onderscheiden:

- Waterstaatswerk (35 m), verder onderverdeeld in:
 - De binnenberm (10 m);
 - Het binnentalud (15 m);
 - De kruin (5 m)
 - Het buitentalud (6 m).
- Een beschermingszone A aan de binnen- en buitenzijde (35 m). Deze zone bevat gronden die technisch/fysisch (mede) een bijdrage leveren aan de stabiliteit van de waterkering.
- Een beschermingszone B (50m). De beschermingszone B is in de legger en Keur aangewezen om bepaalde activiteiten, die potentieel grote gevaren voor de waterkering in zich bergen (bijvoorbeeld de aanleg van hogedrukleidingen of bouw van windturbines) ook op grotere afstand van de waterkering te kunnen reguleren.

De zonering is aangegeven in Figuur 5-1, zie ook Bijlage 1. In de figuur is ook aangegeven welke zones relevant zijn voor de potentiële faalmechanismen van de waterkering:

- Zonering ten behoeve van stabiliteit (ST) grondlichaam:
 - Macrostabiliteit buitentalud (STBU): buitentalud en kruin;
 - Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI): kruin, binnentalud en binnenberm.
 - Piping (STPH).
- Zonering ten behoeve van stabiliteit grasbekleding (STBKgr):
 - Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU): buitentalud;
 - Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GKKB): kruin en binnentalud.

Ten aanzien van het neerkomen van een windturbineonderdeel wordt beschermingszone B niet relevant geacht. Het neerkomen van een onderdeel in deze zone zal niet leiden tot afname van de waterveiligheid.



Figuur 5-1: Zoning waterkering

Door Bosch & van Rijn is berekend wat de kans is, dat een windturbine of windturbineonderdeel faalt (faalfrequentie) en vervolgens neerkomt in de verschillende dijkzones (trefkans). Vermenigvuldiging van de faalfrequentie met de trefkans resulteert in de raakfrequentie.

De berekende raakfrequenties zijn aangegeven in Bijlage 2. Onderscheid is gemaakt tussen dijktrajecten 29-3 en 29-4.

5.4 Kans op kritieke hydraulische belastingsituatie tijdens herstel

In geval van schade aan de waterkering door een neergekomen windturbine(onderdeel) is er een gereduceerd waterkerend vermogen. Er is in dat geval een responstijd tot repareren. Het repareren betreft een noodsituatie, waarbij een noodoplossing (bijvoorbeeld plaatsen bigbags of damwand) wordt aangebracht om het water te keren. Er wordt vanuit gegaan dat het aanbrengen van een noodoplossing maximaal 7 dagen duurt.

Voor *normtraject* 29-4 geldt dat een hoog gelegen voorland aanwezig is met een niveau van circa NAP +5,5 m. Op basis van de waterstatistiek voor de Westerschelde [REF9] (zie Bijlage 3) blijkt dat dit niveau hoger is dan de maatgevende hoogwaterstand (MHW voor geotechnische toetssporen) bij een frequentie (herhalingstijd) van 1 keer per 1000 jaar. Voor het hydraulische belastingniveau (HBN voor golfoverslag-gerelateerde toetssporen) wordt eenzelfde frequentie aangehouden, aangezien de haven beschermd wordt door golfbrekers en het hoge voorland een golfremmende werking heeft.

De kans op een kritieke hydraulische belastingsituatie binnen de vereiste tijd voor noodreparatie is dan voor *normtraject* 29-4: $7/365 \times 1/1000 = 1,92 \cdot 10^{-5}$.

Een klein gedeelte van *normtraject* 29-3 kan geraakt worden bij bladworp bij overtoeren, zie Figuur 1-1. Tot circa NAP +6,0 m is op het buitentalud een steenzetting aanwezig. Falen van de dijk (erosie grasbekleding en geotechnische toetssporen) wordt dan ook pas verwacht bij een waterstand hoger dan dit niveau. De kans op een kritieke hydraulische belastingsituatie binnen de vereiste tijd voor noodreparatie is gelijk gesteld aan die van *normtraject* 29-4, namelijk $1,92 \cdot 10^{-5}$.

Door de ligging achter een golfbreker wordt voor het HBN eenzelfde frequentie aangehouden.

5.5 Additionele faalfrequentie

In deze grove effectanalyse is de additionele faalfrequentie van de waterkering ($P_{\text{MECH;Additioneel}}$) gelijk gesteld aan de raakfrequentie (gesommeerd van alle windturbines) maal de kans op een kritieke hydraulische belastingsituatie binnen de vereiste tijd voor noodreparatie aan de waterkering ($P_{\text{falen herstel}}$).

Vervolgens is per faalscenario en per faalmechanisme getoetst of de additionele faalkans acceptabel is. Er moet gelden:

$$P_{\text{MECH;Additioneel}} \leq P_{\text{EIS;MECH;DSN;1\%}}$$

De toetsresultaten zijn per normtraject samengevat in Tabel 5-2 en Tabel 5-3. Voor dijktraject 29-3 geldt dat alleen het faalscenario 'bladworp bij overtoeren' relevant is. Bij de overige faalscenario's wordt de waterkering niet getroffen. Dijktraject 29-4 wordt bij alle faalscenario's getroffen.

Uit de beoordeling blijkt in voor alle scenario's en voor alle faalmechanismen de additionele faalkanstoename lager is dan 1%.

Tabel 5-2: Additionele faalkans voor dijktraject 29-3

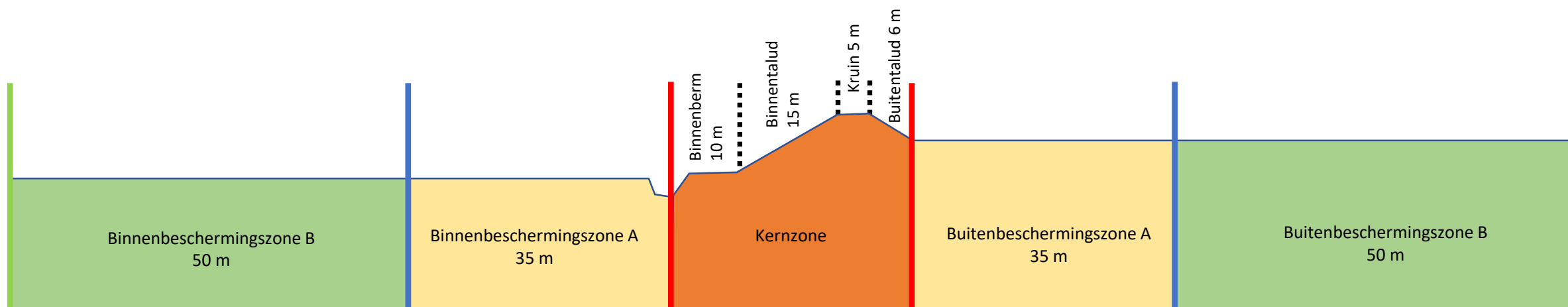
Bladworp Overtoeren	Raakfrequentie [1/jaar]	$P_{\text{falen herstel}}$	$P_{\text{MECH;Additioneel}}$	$P_{\text{EIS;MECH;DSN;1\%}}$	Beoordeling
Faalmechanisme waterkering	5 turbines	[-]	[1/jaar]	[1/jaar]	
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	6,51E-08	1,92E-05	1,25E-12	5,56E-09	Voldoet
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	1,32E-07	1,92E-05	2,52E-12	2,67E-08	Voldoet
Piping en Heave (STPH)	2,14E-07	1,92E-05	4,11E-12	7,64E-09	Voldoet
Macrostabieliteit buitentalud (STBU)	2,09E-07	1,92E-05	4,00E-12	2,34E-08	Voldoet
Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)	3,45E-07	1,92E-05	6,63E-12	2,34E-09	Voldoet

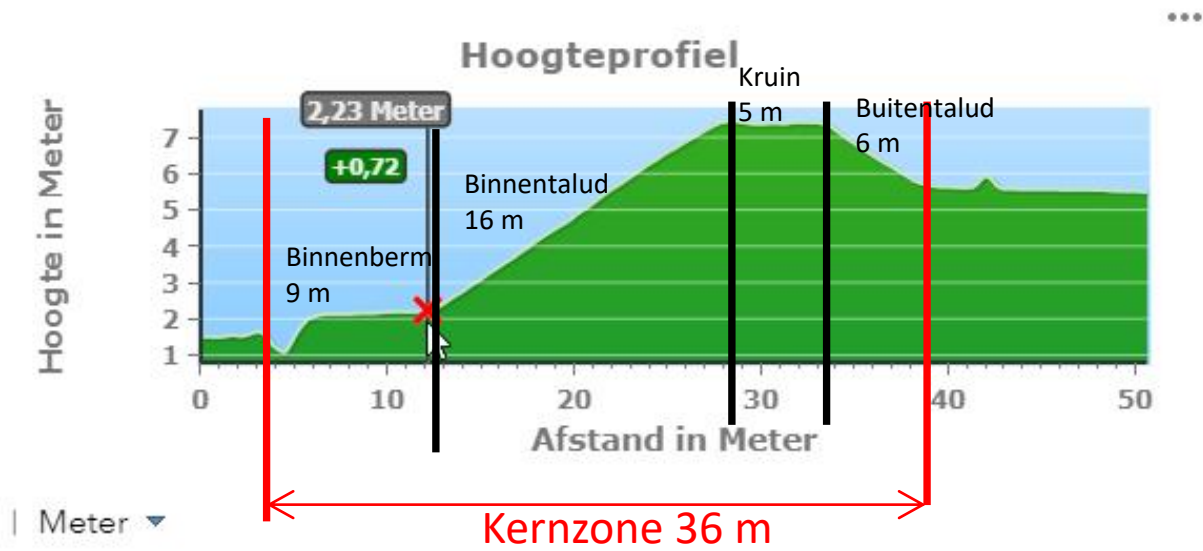
Tabel 5-3: Additionele faalkans voor dijktraject 29-4

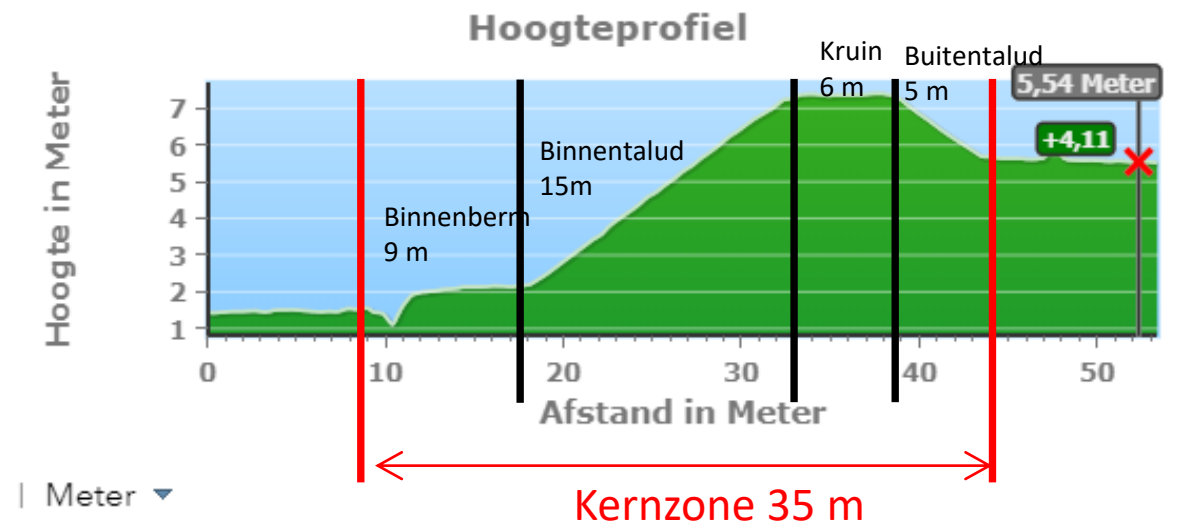
Bladworp Nominaal toerental	Raakfrequentie [1/jaar]	$P_{\text{falen herstel}}$	$P_{\text{MECH;Additioneel}}$	$P_{\text{EIS;MECH;DSN;1\%}}$	Beoordeling
Faalmechanisme waterkering	5 turbines	[-]	[1/jaar]	[1/jaar]	
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	1,70E-04	1,92E-05	3,26E-09	2,50E-07	Voldoet
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	3,06E-04	1,92E-05	5,88E-09	1,20E-06	Voldoet
Piping en Heave (STPH)	3,40E-04	1,92E-05	6,53E-09	1,36E-07	Voldoet
Macrostabieliteit buitentalud (STBU)	9,50E-04	1,92E-05	1,82E-08	4,32E-07	Voldoet
Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)	5,26E-04	1,92E-05	1,01E-08	4,32E-08	Voldoet
Bladworp Overtieren	Raakfrequentie [1/jaar]	$P_{\text{falen herstel}}$	$P_{\text{MECH;Additioneel}}$	$P_{\text{EIS;MECH;DSN;1\%}}$	Beoordeling
Faalmechanisme waterkering	5 turbines	[-]	[1/jaar]	[1/jaar]	
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	7,74E-07	1,92E-05	1,49E-11	2,50E-07	Voldoet
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	1,58E-06	1,92E-05	3,03E-11	1,20E-06	Voldoet
Piping en Heave (STPH)	1,80E-06	1,92E-05	3,45E-11	1,36E-07	Voldoet
Macrostabieliteit buitentalud (STBU)	2,93E-06	1,92E-05	5,63E-11	4,32E-07	Voldoet
Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)	3,37E-06	1,92E-05	6,47E-11	4,32E-08	Voldoet
Mastbreuk	Raakfrequentie [1/jaar]	$P_{\text{falen herstel}}$	$P_{\text{MECH;Additioneel}}$	$P_{\text{EIS;MECH;DSN;1\%}}$	Beoordeling
Faalmechanisme waterkering	5 turbines	[-]	[1/jaar]	[1/jaar]	
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	7,22E-05	1,92E-05	1,39E-09	2,50E-07	Voldoet
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	1,39E-04	1,92E-05	2,67E-09	1,20E-06	Voldoet
Piping en Heave (STPH)	1,16E-04	1,92E-05	2,22E-09	1,36E-07	Voldoet
Macrostabieliteit buitentalud (STBU)	2,27E-04	1,92E-05	4,35E-09	4,32E-07	Voldoet
Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)	2,55E-04	1,92E-05	4,89E-09	4,32E-08	Voldoet
Gondelafworp	Raakfrequentie [1/jaar]	$P_{\text{falen herstel}}$	$P_{\text{MECH;Additioneel}}$	$P_{\text{EIS;MECH;DSN;1\%}}$	Beoordeling
Faalmechanisme waterkering	5 turbines	[-]	[1/jaar]	[1/jaar]	
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	0,00E+00	1,92E-05	0,00E+00	2,50E-07	Voldoet
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	0,00E+00	1,92E-05	0,00E+00	1,20E-06	Voldoet
Piping en Heave (STPH)	0,00E+00	1,92E-05	0,00E+00	1,36E-07	Voldoet
Macrostabieliteit buitentalud (STBU)	4,00E-05	1,92E-05	7,68E-10	4,32E-07	Voldoet
Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)	0,00E+00	1,92E-05	0,00E+00	4,32E-08	Voldoet

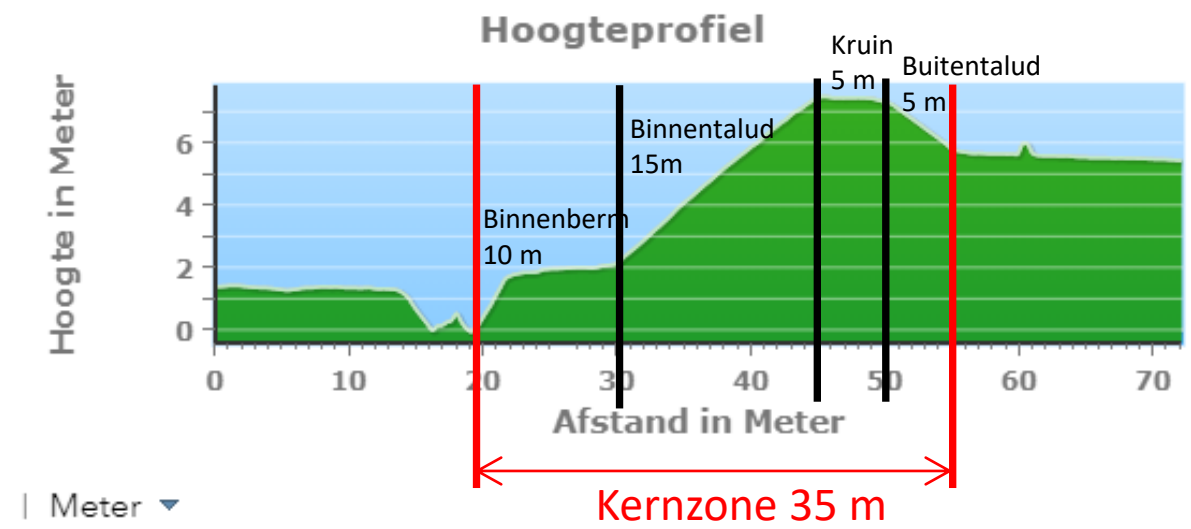
Bijlage 1

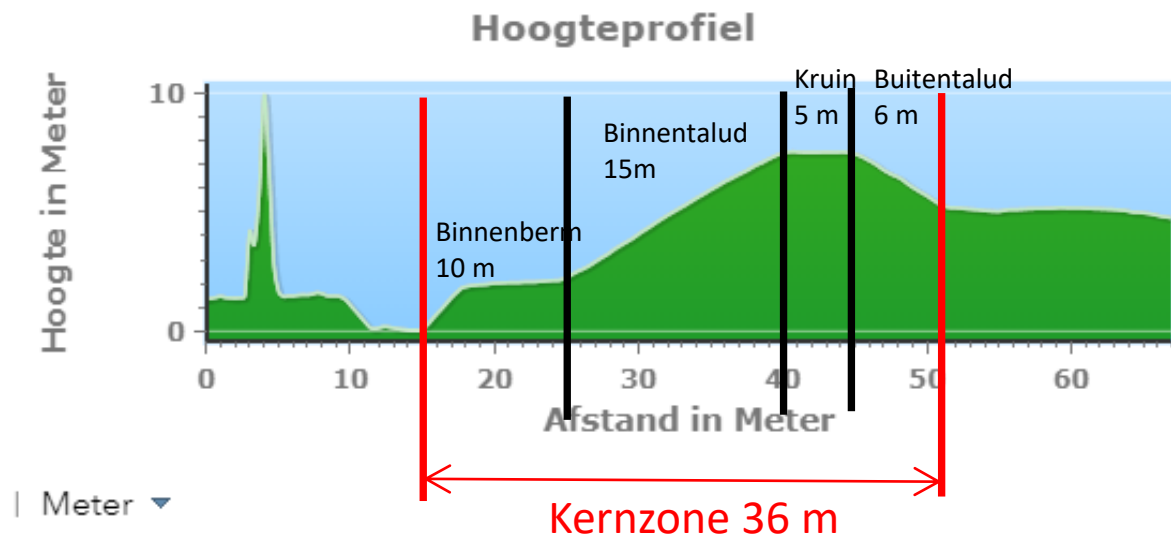
Dijkzoningering op basis van de legger en hoogteligging











Bijlage 2

Berekening raakfrequentie (Bosch & van Rijn)



Titel Trefkans dijkzones – Windpark C.RO Vlissingen-Oost
Datum 19-03-2020
Auteur Hans Kerkvliet MSc.

Inleiding

Voorliggend memo is opgesteld om de raakfrequentie¹ op dijkzones van nieuw te plaatsen windturbines inzichtelijk te maken. De windturbines maken onderdeel uit van het beoogde Windpark C.RO Vlissingen-Oost.

De onderzochte opstelling is gelijk aan de opstelling zoals deze reeds is vergund door de gemeente Vlissingen en vastgelegd in het wijzigingsplan Windpark C.RO Vlissingen-Oost. Voor de opstelling liggen de windturbinelocaties vast, maar er is wel een bandbreedte mogelijk gemaakt in ashoogte en rotordiameter van de windturbines. Voor wat betreft de afmetingen is deze bandbreedte als volgt opgespannen:

- Ashoogte: minimaal 82 meter, maximaal 105 meter;
- Rotordiameter: minimaal 90 meter, maximaal 136 meter;
- Tiphoopte: minimaal 140 meter, maximaal 150 meter.

In deze studie is de bovengrens van de bandbreedte doorgerekend, omdat de bovengrens het hoogste risico verhogende effect heeft op de dijkzones.

Onderhavig memo is een bijlage van een nadere analyse ten behoeve van de waterwetvergunningaanvraag.

Te onderzoeken windturbinetype

Om de externe veiligheidsrisico's van de bandbreedte goed in beeld te brengen worden de effecten doorgerekend met de grootst mogelijke windturbine afmetingen. Dit, aangezien de meeste externe risico's een direct gevolg zijn van de afmetingen. Hiertoe is een referentiewindturbine bepaald met de juiste afmetingen.

Wtb type	Ashoogte (m)	Rotor (m)	Risicocontouren (m)		Max. werpafstand (m)	
			10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	Bij nominaal toerental	Bij overtoeren
Ref. WTB.	82	136	68	156	156	442

¹ In de raakfrequentie zitten zowel de kans dat de blad, mast of gondel op een bepaalde plek terecht komt als de faalfrequentie van de faalscenario's in verwerkt.

NB1. De maximale werpafstand schaalt niet 1-op-1 met de afmetingen van een windturbine. Het kan daarom zo zijn dat een uiteindelijk te realiseren windturbine-type een grotere werpafstand heeft dan de hierboven genoemde variant. Omdat de meeste aspecten betreffende externe veiligheid wel schalen met de afmetingen is er voor gekozen om de bandbreedte te definiëren aan de hand van afmetingen.

NB2. De minimale ashoogte en de maximale rotordiameter leiden tot de maximale tiphoogte. Doordat de grootte van de rotordiameter meer effect heeft op de risicotename dan de ashoogte, is voor de betreffende windturbine gekozen.

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 (faalkans: $8,4 \cdot 10^{-04}$ per jaar (Handboek Risicozonering Windturbines (HRW) 3.1, 2014)) en de werpafstand bij overtoeren (faalkans: $5,0 \cdot 10^{-06}$ per jaar (HRW 3.1, 2014)). Het omvallen van een windturbine vormt een risico binnen een straal van de maximale valafstand van de windturbine (gelijk aan de tiphoogte van de windturbine) (faalkans: $1,3 \cdot 10^{-04}$ per jaar (HRW 3.1, 2014)). Het naar beneden vallen van de gondel en/of rotor vormt een risico binnen een afstand van de wielengte (faalkans: $4,0 \cdot 10^{-05}$ per jaar (HRW 3.1, 2014) (dit effectgebied is conform Bijlage A van Handboek Risicozonering Windturbines 3.1, 2014)).

Op basis van de afmetingen van de bandbreedte is een shortlist opgesteld met gangbare windturbintypes. Voor deze gangbare windturbintypes zijn op basis van generieke faalfrequenties (Bijlage A, HRW 2014), het kogelbaanmodel (zie Bijlage A bij voorliggende risicoanalyse. Bron: Bijlage C, HRW 2014) en parameters van de specifieke windturbintypes de werpafstanden en risicocontouren berekend (zie Bijlage B bij voorliggende risicoanalyse). De grootste werpafstand uit de shortlist wordt overgenomen ten behoeve van de referentiewindturbine. Hieruit volgen de volgende afstanden:

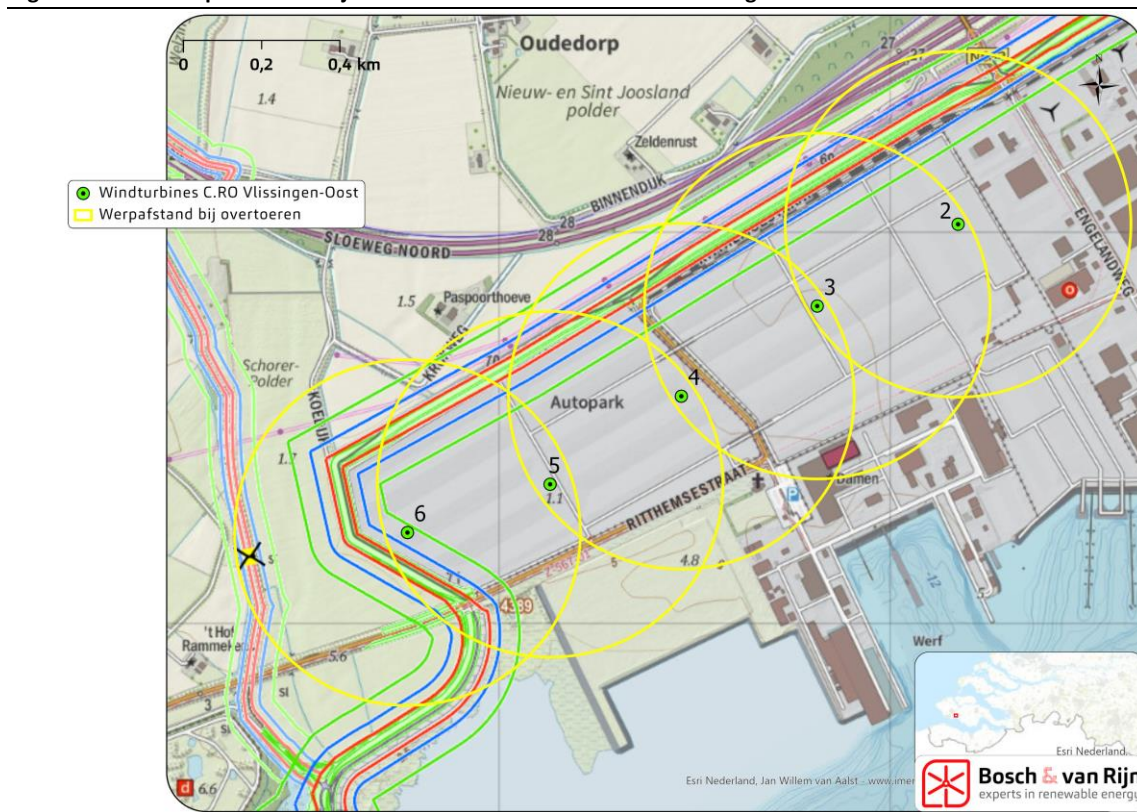
Tabel 1

Risicocontouren en maximale werpafstanden van onderzochte windturbintype

Wtb type	Ashoogte (m)	Rotor (m)	Risicocontouren (m)		Max. werpafstand (m)	
			10^{-5}	10^{-6}	Bij nominaal toerental	Bij overtoeren
Ref. Turbine.	82	136	68	156	156	442

Uit onderstaande figuur blijkt dat de windturbines een risico verhogend effect hebben op de verschillende dijkzones. Om de risicoverhoging te bepalen wordt in de komende paragrafen de trefkans berekend.

Figuur 1 Werpafstanden bij overtoeren en kernzone en beschermingszones



Trefkans dijkzones

Dijkzones en breedte

In onderstaande figuur is het mogelijk om de verschillende dijkzones inclusief breedte van de dijkzones te vinden.

Figuur 2 Verschillende dijkzones van de waterkering, waarbij de ligging van Beschermingszones A en B zijn gebaseerd op basis van de legger.



Trefsector

Ten behoeve van de raakfrequentieberekening is per windturbinelocatie en per dijkzone de trefsector bepaald. De trefsector betreft het gebied waar een falende windturbine of windturbineonderdeel kan neerkomen en daarbij schade kan veroorzaken. 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 wielengte.

Methode Wiekbreuk

Het scenario wiekbreuk resulteert in een raakfrequentie binnen de maximale werpafstand bij overtoeren. Om de een raakfrequentie van de dijkzone 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 dijkzone)
S	=	contour langs de dijkzone
L_b	=	Bladlengte

NB. Voor de berekening van de P_{zwpt} , oftewel de kans per m^2 dat het zwaartepunt van het wegvliegende deel van een blad op een bepaalde plek terecht komt, wordt uitgegaan dat de kans dat een blad een bepaalde kant opvliegt uniform verdeeld is over de oppervlakte waarin de cirkel (werpafstand) terecht kan komen. Dit is conform het Handboek Risicozonering Windturbines herziene versie 3.1 (2014). In Bijlage A van het handboek wordt het volgende gezegd:

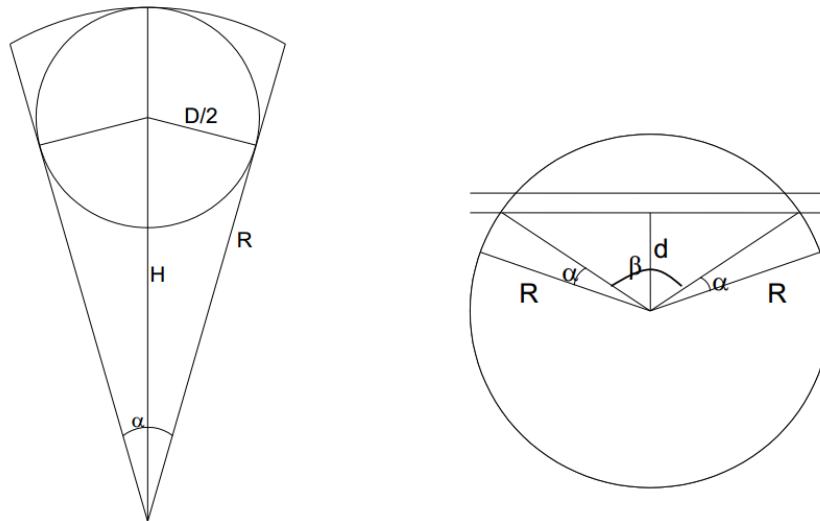
“Verder wordt verondersteld dat de positie van de windturbine, ten opzichte van het noorden, bij het optreden van bladbreuk indifferent is”

“Om de kansdichtheidsfunctie vast te stellen worden de werpafstanden berekend voor iedere azimut positie van het rotorblad. Verondersteld wordt dat de kans op bladbreuk voor elke azimut positie gelijk is.”

Methode 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 een dijkzone 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.



Raakfrequentie per windturbine onderverdeeld in dijkzones

Tabel 2 Raakfrequentie van windturbine 2 en de verschillende dijkzones van zone 29-4

Dijkzone	Bladafworp nominaal	Bladafworp overtoeren	Mastbreuk	Gondelafworp
Buitenbeschermingszone B	n.v.t.	5,30E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitenbeschermingszone A	n.v.t.	2,88E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitentalud	n.v.t.	1,47E-07	n.v.t.	n.v.t.
Kruin	n.v.t.	1,39E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnentalud	n.v.t.	1,61E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenberm	n.v.t.	1,40E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone A	n.v.t.	1,78E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone B	n.v.t.	1,80E-07	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 3 Raakfrequentie van windturbine 3 en de verschillende dijkzones van zone 29-4

Dijkzone	Bladafworp nominaal	Bladafworp overtoeren	Mastbreuk	Gondelafworp
Buitenbeschermingszone B	n.v.t.	5,80E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitenbeschermingszone A	n.v.t.	3,10E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitentalud	n.v.t.	1,54E-07	n.v.t.	n.v.t.
Kruin	n.v.t.	1,37E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnentalud	n.v.t.	1,66E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenberm	n.v.t.	1,41E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone A	n.v.t.	1,96E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone B	n.v.t.	1,90E+07	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 4 Raakfrequentie van windturbine 4 en de verschillende dijkzones van zone 29-4

Dijkzone	Bladafworp nominaal	Bladafworp overtoeren	Mastbreuk	Gondelafworp
Buitenbeschermingszone B	n.v.t.	4,94E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitenbeschermingszone A	n.v.t.	2,64E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitentalud	n.v.t.	1,38E-07	n.v.t.	n.v.t.
Kruin	n.v.t.	1,30E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnentalud	n.v.t.	1,51E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenberm	n.v.t.	1,26E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone A	n.v.t.	1,81E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone B	n.v.t.	1,79E-07	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 5 Raakfrequentie van windturbine 5 en de verschillende dijkzones van zone 29-4

Dijkzone	Bladafworp nominaal	Bladafworp overtoeren	Mastbreuk	Gondelafworp
Buitenbeschermingszone B	n.v.t.	7,29E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitenbeschermingszone A	n.v.t.	3,42E-07	n.v.t.	n.v.t.
Buitentalud	n.v.t.	1,78E-07	n.v.t.	n.v.t.
Kruin	n.v.t.	1,75E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnentalud	n.v.t.	1,95E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenberm	n.v.t.	1,58E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone A	n.v.t.	2,16E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone B	n.v.t.	1,69E-07	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 6 Raakfrequentie van windturbine 6 en de verschillende dijkzone van zone 29-4

Dijkzone	Bladafworp nominaal	Bladafworp overtoeren	Mastbreuk	Gondelafworp
Buitenbeschermingszone B	8,42E-04	2,84E-07	1,30E-04	4,00E-05
Buitenbeschermingszone A	6,36E-04	2,42E-07	8,41E-05	4,00E-05
Buitentalud	1,70E-04	1,57E-07	7,22E-05	n.v.t.
Kruin	1,44E-04	1,31E-07	7,04E-05	n.v.t.
Binnentalud	1,62E-04	1,92E-07	6,86E-05	n.v.t.
Binnenberm	1,00E-04	1,78E-07	6,50E-05	n.v.t.
Binnenbeschermingszone A	1,20E-04	2,81E-07	5,06E-05	n.v.t.
Binnenbeschermingszone B	1,40E-04	3,14E-07	3,25E-05	n.v.t.

Tabel 7 Raakfrequentie van windturbine 6 en de verschillende dijkzone van zone 29-3

Dijkzone	Bladafworp nominaal	Bladafworp overtoeren	Mastbreuk	Gondelafworp
Buitenbeschermingszone B	n.v.t.	7,63E-08	n.v.t.	n.v.t.
Buitenbeschermingszone A	n.v.t.	8,42E-08	n.v.t.	n.v.t.
Buitentalud	n.v.t.	6,51E-08	n.v.t.	n.v.t.
Kruin	n.v.t.	5,92E-08	n.v.t.	n.v.t.
Binnentalud	n.v.t.	7,23E-08	n.v.t.	n.v.t.
Binnenberm	n.v.t.	7,39E-08	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone A	n.v.t.	1,40E-07	n.v.t.	n.v.t.
Binnenbeschermingszone B	n.v.t.	1,25E-07	n.v.t.	n.v.t.

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]

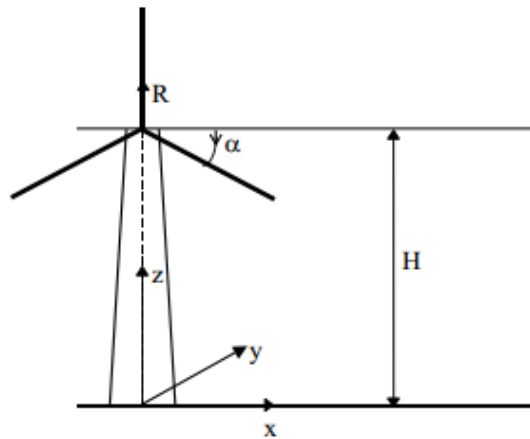
Ω : toerental van de rotor [rad/s]

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 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

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

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.

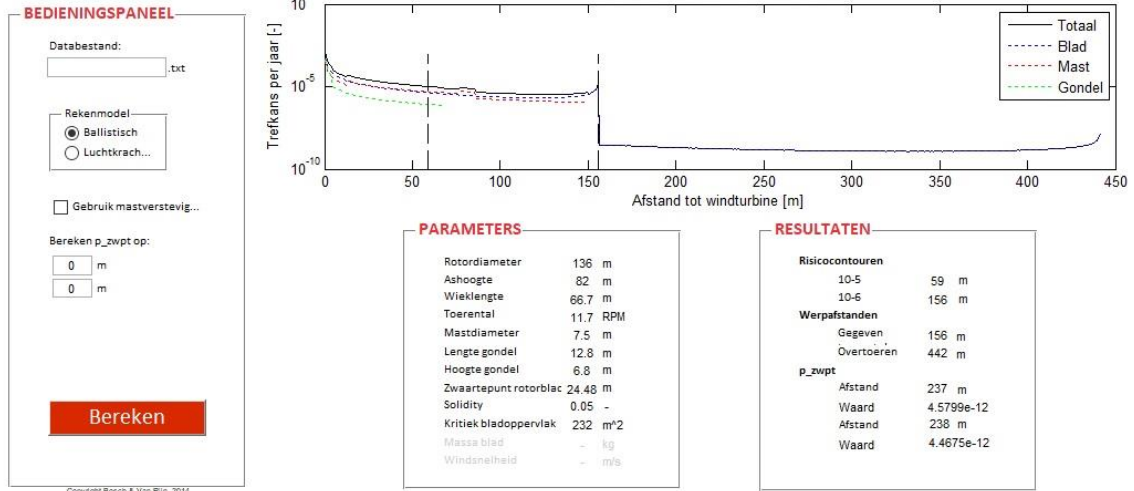
De kansverdelingsfunctie van de positie waar het zwaartepunt van het blad zal inslaan is nu

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

Bijlage B Werpafstand windturbines

BladeThro

Rekenmodel voor externe veiligheid van windturbines volgens het Handboek Risicozonering





Bosch & Van Rijn
Franz-Lisztplantsoen 200
3533 JG Utrecht

Tel: 030 - 677 64 66
Mail: info@boschenvanrijn.nl
Web: www.boschenvanrijn.nl

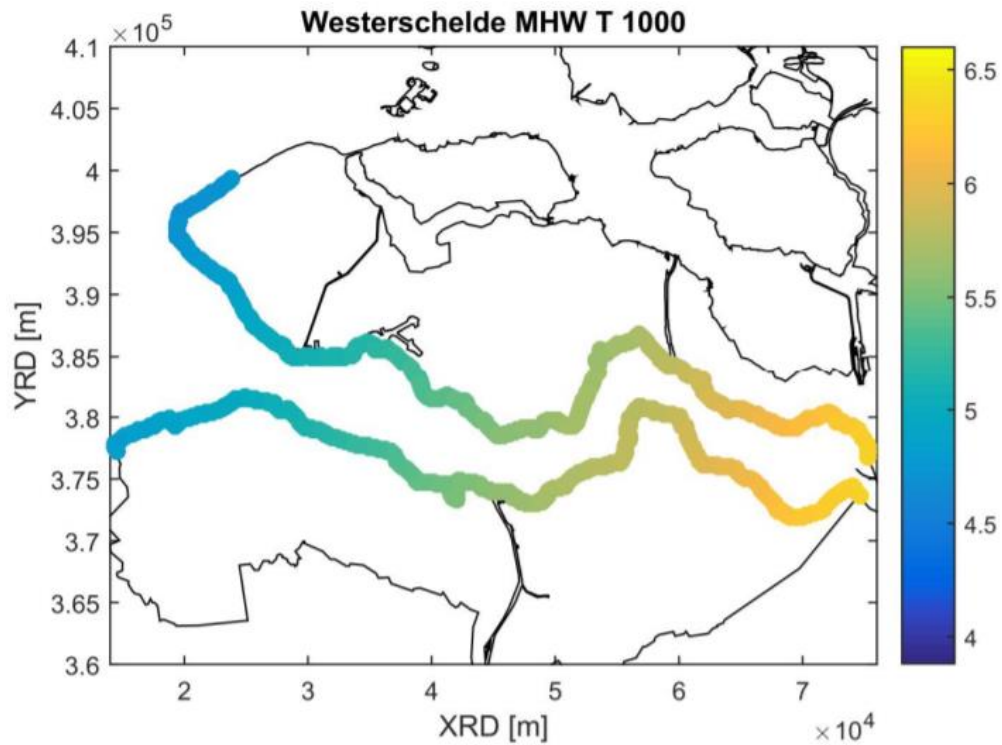
© Bosch & Van Rijn 2020

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.

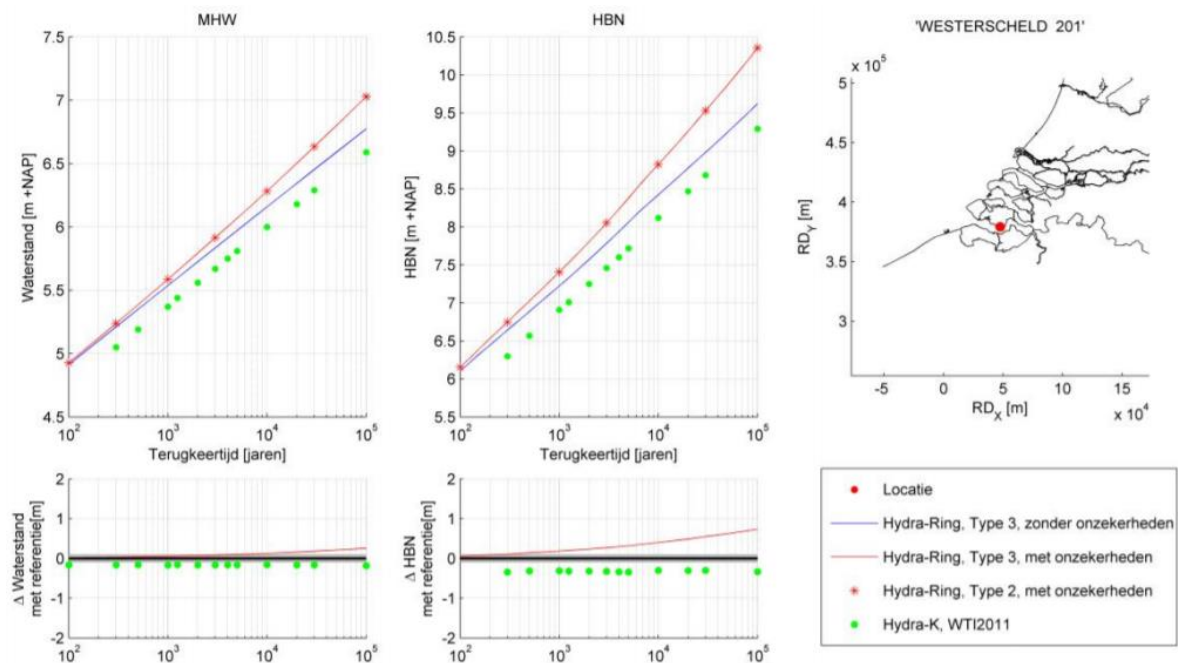
Bijlage 3

Waterstatistiek Westerschelde

Bron: Deltares (2017), Hydraulische Belastingen Kust, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Project 1230087-002.



Hoogwaterstand in de Westerschelde



Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand (links) en HBN (rechts) verkregen met Hydra-Ring en Hydra-K, alsmede het absolute verschil tussen de resultaten (onderste panelen). Locatie 1500201 nabij Ellewoutsdijk.