

WATERVEILIGHEIDSTUDIE WINDPARK WILLEM-ANNAPOLDER

Pondera Consult

2 JUNI 2020

Contactpersoon

**MARTIN ARENDS EN
ROLAND HOIJINCK**

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland

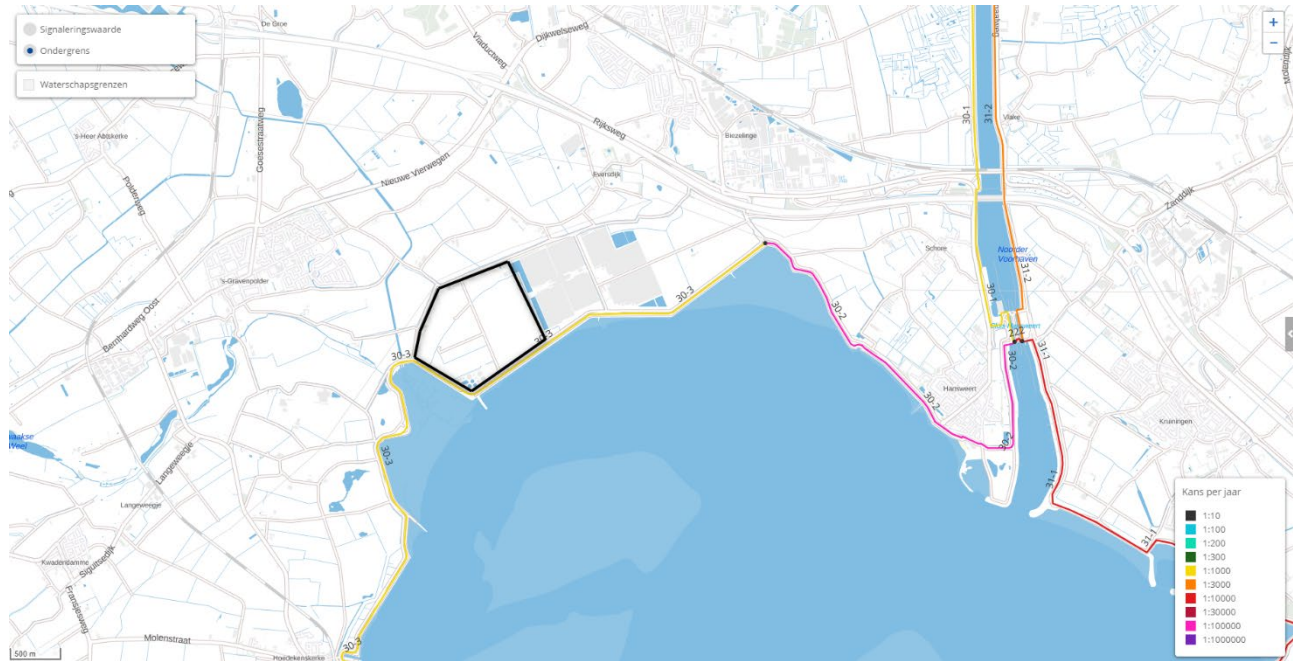
INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	4
1.1	Projectomschrijving	4
1.2	Scope	4
1.3	Leeswijzer	5
2	UITGANGSPUNTEN EN WERKWIJZE	6
2.1	Uitgangspunten	6
2.2	Werkwijze	6
2.3	Beschrijving kering en ondergrond	7
2.4	Indeling in zones	7
2.5	Locatie en eigenschappen windturbines	8
3	RESULTATEN	10
3.1	Trefkansen per zone	10
3.2	Bovengrondse calamiteiten	11
3.2.1	Bekleding buitentalud	11
3.2.2	Golferosie kruin en binnentalud (GEKB).	12
3.2.2.1	Treffen kruin	13
3.2.2.2	Treffen van het binnentalud	13
3.2.3	Piping en heave	14
3.2.4	Macrostabieliteit	15
3.3	Ondergrondse invloed	16
3.3.1	Verweking	16
3.4	Samenvatting resultaten	17
4	CONCLUSIES	18
4.1	Conclusies	18
5	LITERATUUR	19
	COLOFON	25

1 INLEIDING

1.1 Projectomschrijving

Windpark Willem-Annapolder, gelegen ten zuiden van Kapelle, ligt op geringe afstand van de primaire waterkering langs de Westerschelde, zie Figuur 1. De waterkering is onderdeel van normtraject Zuid-Beveland West (30-3). Het bestaande windpark wordt in de nabije toekomst opgeschaald; de 10 bestaande windturbines worden vervangen door 4 of 5 nieuwe en grotere windturbines.



Figuur 1: Ligging normtraject 30-3 (gele lijn) en plangebied windpark Willem-Annapolder (zwarte lijn)

1.2 Scope

Onderhavig rapport gaat in op de gevolgen van de opschaling van de bestaande windturbines ter plaatse van de Willem-Annapolder op de waterveiligheid. In de Willem-Annapolder zijn op dit moment 10 windturbines aanwezig. Deze bestaande windturbines worden vervangen door 4 of 5 nieuwe turbines. De locatie van de windturbines is weergegeven in Figuur 4. Minimaal één van de windturbines staat in de beschermingszone van de waterkering die in beheer is bij het waterschap Scheldestromen.

De voorliggende rapportage betreft de studie naar de invloed van de windturbines op de waterveiligheid van het normtraject 30-3 in de exploitatiefase. Nagegaan wordt of de varianten voldoen aan de eisen die het waterschap als beheerder van de waterkering stelt aan windturbines binnen de keurzone van de dijk.

Voor het milieueffectrapport zijn daarbij vier verschillende alternatieven (combinatie van opstelling en type windturbine) beschouwd. Op basis van de uitkomsten van het milieueffectrapport is ervoor gekozen om als voorkeursalternatief voor de vergunningaanvragen alternatief 1A te kiezen, echter met een 10 meter lagere ashoogte. De windturbinelocaties blijven gelijk. Door de lagere ashoogte van het voorkeursalternatief leidt falen van onderdelen van de windturbine tot beperkt andere trefkansen van de dijk dan voor eerder beschouwd alternatief 1A. De trefkans wordt voor het ene dijkvak/zone groter en voor het andere kleiner. Met het oog daarop is voor het voorkeursalternatief (afgekort VKA), nagegaan of ook deze aan de eisen van het waterschap voldoet. In totaal zijn bij onderhavige studie uiteindelijk dus vijf alternatieven beschouwd.

Specifiek wordt gekeken naar de invloed van de verschillende bovengrondse calamiteiten van een windturbine en de faalmechanismen van de waterkering. Daarbij wordt uitgegaan van de nieuwe normering en het WBI2017/OI2014v4. Dit wordt in onderhavig rapport in beginsel kwalitatief beschouwd en indien nodig op kwantitatieve wijze uitgewerkt. Tevens is gekeken naar de ondergrondse invloed van de windturbines op de waterkering.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 gaat in op de uitgangspunten en de werkwijze. De resultaten van de beschouwingen en berekeningen zijn opgenomen in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 bevat de conclusies.

2 UITGANGSPUNTEN EN WERKWIJZE

2.1 Uitgangspunten

De uitgangspunten die zijn gehanteerd bij de bepaling van de invloed van de windturbines op de waterveiligheid zijn:

- Planperiode van 30 jaar.
- Bepaling waterstanden en hydraulische belastingniveaus op basis van Hydra NL, klimaatscenario W+ en zichtjaar 2050.
- De bovengrondse invloed van de windturbines wordt getoetst aan 1% van de doorsnede-eis van alle mechanismen. Daarbij zijn alleen de relevante mechanismen in detail beschouwd.
- De waterkering moet inclusief ondergrondse invloeden van de windturbine, voldoen aan de normale doorsnede-eisen.
- Voor de faalkansverdeling over de mechanismen is uitgegaan van standaard verdeling uit het OI2014v4 [lit. 2].
- Bij treffen van de waterkering door (een onderdeel van) de windturbine treedt een krater op met een diepte van 2 m [lit. 6].

Voor wat betreft de faalfrequenties van (onderdelen van) de windturbine is uitgegaan van het Handboek Risicozonering Windturbines (HRW) [lit. 5]. Het HRW vermeldt niet of en zo ja hoe deze faalfrequenties zijn gecorreleerd aan de windsnelheden. Op basis van vergelijkbare projecten en de beperkte beschikbare informatie, zijn bij de nadere uitwerking van de beschouwde bovengrondse faalmechanismen (bladworp nominaal, bladworp overtoeren en mastbreuk) de volgende aannamen gedaan:

Bladworp nominaal:

- Is niet gecorreleerd aan storm en kan ook tijdens dagelijkse omstandigheden optreden.
- Rekening is gehouden met een hersteltijd van de waterkering van 5 dagen.

Bladworp overtoeren en mastbreuk:

- Aangenomen is dat deze optreden tijdens stormcondities.
Zoals vermeld, geeft het HRW alleen faalfrequenties voor verschillende faalmechanismen en wordt geen correlatie gelegd tussen falen en de windsnelheid. Bij een recent uitgevoerd ander windturbineproject nabij een waterkering (OPD), heeft ENW geadviseerd bij mastbreuk en bladworp overtoeren rekening te houden met een correlatie met storm [lit. 12].
- Ten aanzien van mastbreuk en bladworp overtoeren is aangenomen dat dit optreedt bij storm vanaf 9 bft (windsnelheid vanaf 20 m/s).
Deze 9 bft komt overeen met de bij bovenbedoeld project (OPD) gehanteerde windsnelheid waarbij mastbreuk kan optreden. Dit project is ook door ENW (en KPR) beschouwd.
- Vanwege de stormcondities is geen rekening gehouden met de mogelijkheid tot herstel (conservatief uitgangspunt).

De kans van optreden van de waterstanden gegeven treffen tijdens storm, is afhankelijk van het aantal stormen per jaar. Op basis van de data van KNMI meetstation Vlissingen (10 minuten data sinds 1951) is vastgesteld dat gemiddeld sprake is van 2,5 storm per jaar.

2.2 Werkwijze

Aantonen dat een waterkering ook na het falen van een windturbine aan de gestelde waterveiligheidseisen voldoet, kan complex zijn en de complexiteit wordt in belangrijke mate bepaald door de eventuele verdiepingsslagen die daarvoor noodzakelijk zijn. Daarom is gekozen voor een gefaseerde aanpak waarbij van grof naar fijn wordt gewerkt en een volgende (verdiepings)stap alleen wordt ingezet indien in de voorafgaande stap niet aan het criterium is voldaan. Dit kan ook betekenen dat in eerste instantie wordt volstaan met een conservatieve inschatting van een grootte terwijl deze gaandeweg de aanpak meer in detail worden vastgesteld.

In deze fase is ingegaan op de eerste stap van die gefaseerde aanpak waarbij is aangenomen dat treffen gelijk staat aan falen (inclusief herstel mits van toepassing), en rekening is gehouden met de faalkans van het restprofiel.

Bij de aanvang van onderhavig onderzoek was sprake van twee verschillende windparkconfiguraties en was nog geen keuze gemaakt ten aanzien van het type windturbine. De opdrachtgever had vier verschillende

windpark/turbine combinaties voor ogen. Deze zijn alle vier beschouwd.

Op basis van die resultaten is uiteindelijk gekozen voor een nieuwe combinatie met een eerder beschouwde opstelling maar ander type windturbine. Deze variant is naderhand toegevoegd aan onderhavig onderzoek.

Op basis van het HRW [lit. 5] zijn door Pondera voor de vijf verschillende varianten de trefkansen per zone berekend [lit 9]. Vervolgens zijn aan de hand daarvan per zone de faalkansen vergeleken met de doorsnede eisen van de relevante faalmechanismen.

2.3 Beschrijving kering en ondergrond

De waterkering is in 2005 versterkt door het Projectbureau Zeeweringen. De bekleding op het buitentalud bestaat uit betonzuilen met een dikte van 40 cm. Onder de betonzuilen is een filterlaag aanwezig, met daaronder een kleilaag. De kern van de waterkering bestaat uit zand. Op de kruin en het binnentalud is een grasbekleding aanwezig op een kleilaag.

De ondergrond bestaat voor de eerste circa 25 m uit een holocene pakket. Dit pakket is opgebouwd uit zand- en kleilagen. Op het traject tussen dp 315 en 320 is de bovenste 2 m opgebouwd uit een (zandige) kleilaag. Daaronder lijkt een hoofdzakelijk zandig pakket aanwezig. Zie Figuur 2 voor de dijktrajecten.

2.4 Indeling in zones

Om de trefkansen van de turbines en de faalkansbijdragen van de dijk te kunnen berekenen, is de waterkering opgedeeld in 2 trajecten: oost en west. Deze indeling is gebaseerd op het verschil in oriëntatie van het dijktraject, hetgeen leidt tot een significant verschil in de optredende hydraulische belasting. Binnen de twee trajecten is de waterkering opgedeeld in verschillende zones. De gevolgen van een eventueel treffen van een onderdeel van een turbine op de faalkans van de dijk, verschillen per zone.

De volgende zones zijn gehanteerd voor traject west:

- Buitentalud, van begin stortsteen tot buitenkruinlijn.
- Kruin, van buitenkruinlijn tot binnenkruinlijn.
- Binnentalud, van binnenkruinlijn tot einde waterstaatswerk (volgens de legger).
- Achterland, van einde waterstaatswerk tot 30 m landinwaarts.

De volgende zones zijn gehanteerd voor traject oost:

- Benedentalud, van begin stortsteen tot buitenbermlijn.
- Berm, van insteek benedentalud tot begin berm (onderkant boventalud)
- Boventalud, begin berm (onderkant boventalud) tot buitenkruinlijn
- Kruin, van buitenkruinlijn tot binnenkruinlijn.
- Binnentalud, van binnenkruinlijn tot einde waterstaatswerk (volgens de legger).
- Achterland, van einde waterstaatswerk tot 30 m landinwaarts.

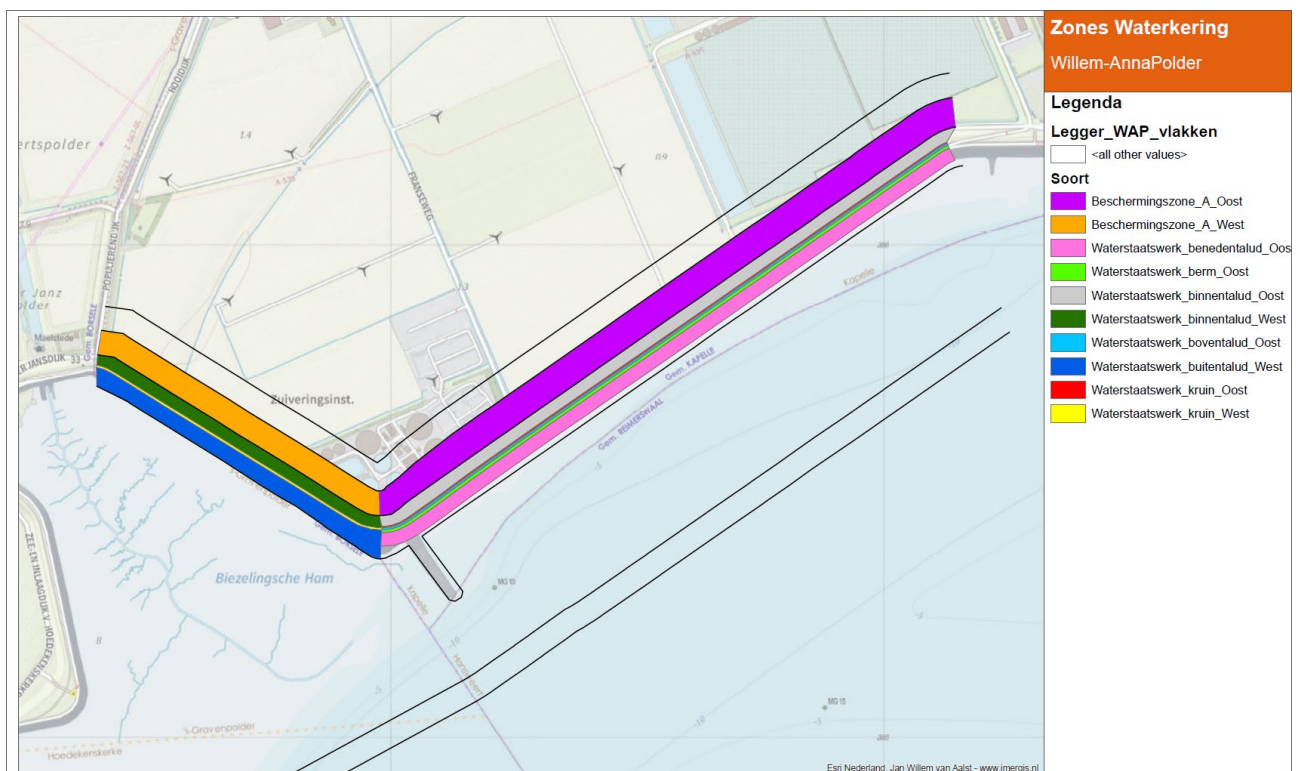
Naast de bovenstaande zones kan het windturbineblad ook buitendijks op het water vallen. Dit leidt niet tot een schade aan de waterkering en is daarom niet verder beschouwd.

De zones van het westelijke gedeelte zijn grotendeels vastgesteld op basis van de grenzen van het waterstaatswerk zoals gedefinieerd in de legger (zie Figuur 2). Alleen is afgeweken van de grens van het waterstaatswerk aan de buitenzijde. Daar is aangehouden dat de zone begint aan de dijkzijde van de stortsteenbekleding met als reden dat de stortsteenbekleding bestand is tegen een eventueel treffen. Voor het oostelijke gedeelte is de zone-indeling van het buitentalud verfijnd. Daarbij is het buitentalud opgedeeld in 3 zones. Dit is gedaan ter optimalisatie van de faalkans. De faalkans van het restprofiel verschilt per zone; een treffen hoger op het buitentalud heeft een kleinere faalkans tot gevolg dan een treffen lager op het buitentalud.

De gehanteerde zones zijn weergegeven in Figuur 3.



Figuur 2: Leggerzones waterschap



Figuur 3: Zone-indeling Windpark Willem-Annapolder

2.5 Locatie en eigenschappen windturbines

Voor Windpark Willem-Annapolder zijn vijf opstellingsalternatieven beschouwd (VKA, 1A, 1B, 2A en 2B). Bij opstelling VKA, 1A en opstelling 1B worden vier windturbines geplaatst. In VKA, 1A en 1B op dezelfde positie maar met verschillende windturbines. Bij opstelling 2A en 2B worden vijf windturbines geplaatst. Ook bij 2A en 2B op eenzelfde positie maar met een verschillende turbineafmeting. De locaties van opstellingen VKA, 1 en 2 zijn weergegeven in Figuur 4, de turbineafmetingen per alternatief in Tabel 1.



Figuur 4: Windparkconfiguratie, links opstelling 1 en VKV, rechts opstelling 2.

Tabel 1: Eigenschappen windturbines per alternatief

Alternatief	Aantal turbines	Tiphoogte	Ashoogte	Rotordiameter
VKA	4	180	105	150
1A	4	190	115	150
1B	4	150	91,5	117
2A	5	190	127	126
2B	5	150	87	126

3 RESULTATEN

3.1 Trefkansen per zone

Voor het windpark zijn, zoals in paragraaf 2.5 beschreven, vijf varianten onderzocht. De trefkansen zijn berekend voor alle afzonderlijke faalscenario's. Daarbij is aangehouden dat de faalscenario's mastbreuk, gondelval en bladworp overtoeren alleen optreden tijdens stormcondities. Voor bladworp nominaal is aangehouden dat dit alleen tijdens normale omstandigheden op kan treden. De trefkansen van de afzonderlijke faalscenario's zijn door Pondera berekend en opgenomen in [lit. 9].

Voor de berekening van de faalkansbijdragen zijn de trefkansen van de storm gecorreleerde faalscenario's bij elkaar opgeteld. De totale trefkans voor alle storm-gecorrleerde faalscenario's is opgenomen in Tabel 2, de trefkans voor de faalscenario's bladworp nominaal in Tabel 3.

Tabel 2: Totale trefkans per jaar voor de storm-gecorrleerde faalscenario's.

Zone	VKA	1A	1B	2A	2B
Waterstaatswerk_benedentalud_Oost	1,76E-07	1,75E-07	1,60E-07	7,95E-06	2,11E-07
Waterstaatswerk_berm_Oost	4,42E-08	4,41E-08	4,04E-08	5,38E-06	5,40E-08
Waterstaatswerk_boventalud_oost	2,83E-08	2,82E-08	2,62E-08	3,42E-06	3,34E-08
Waterstaatswerk_kruin_Oost	2,06E-05	2,35E-05	1,99E-08	1,56E-05	2,56E-08
Waterstaatswerk_binnentalud_Oost	1,55E-05	1,70E-05	2,77E-05	1,04E-05	2,61E-05
Beschermingszone_A_Oost	8,82E-05	8,40E-05	8,75E-05	8,73E-05	9,28E-05
Waterstaatswerk_buitentalud_West	1,76E-07	1,60E-07	1,43E-07	1,74E-07	1,65E-07
Waterstaatswerk_kruin_West	2,06E-08	2,45E-08	2,19E-08	2,32E-08	2,18E-08
Waterstaatswerk_binnentalud_West	1,26E-07	1,25E-07	1,12E-07	1,57E-07	1,49E-07
Beschermingszone_A_West	2,74E-07	2,84E-07	2,56E-07	4,85E-06	3,51E-07

Tabel 3: Trefkans per jaar voor faalscenario bladworp nominaal

Zone	VKA	1A	1B	2A	2B
Waterstaatswerk_benedentalud_Oost	3,93E-05	3,90E-05	3,75E-05	3,61E-05	3,79E-05
Waterstaatswerk_berm_Oost	8,84E-06	8,79E-06	8,38E-06	9,60E-06	1,01E-05
Waterstaatswerk_boventalud_oost	6,06E-06	5,37E-06	5,31E-06	6,00E-06	6,19E-06
Waterstaatswerk_kruin_Oost	4,52E-06	4,94E-06	4,53E-06	4,02E-06	3,94E-06
Waterstaatswerk_binnentalud_Oost	4,22E-05	3,99E-05	3,88E-05	3,42E-05	3,56E-05
Beschermingszone_A_Oost	1,33E-04	1,39E-04	1,38E-04	1,52E-04	1,37E-04
Waterstaatswerk_buitentalud_West	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Waterstaatswerk_kruin_West	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Waterstaatswerk_binnentalud_West	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,09E-05	0,00E+00
Beschermingszone_A_West	0,00E+00	5,60E-06	3,92E-06	1,39E-04	1,19E-04

3.2 Bovengrondse calamiteiten

In Tabel 4 zijn per faalmechanisme van de waterkering beknopt de effecten van de bovengrondse calamiteiten op de waterveiligheid beschreven.

Tabel 4 Effecten bovengrondse calamiteiten op waterveiligheid per mechanisme

Faalmechanisme	Effectbeschrijving bovengrondse calamiteiten
Bekleding buitentalud (STBK, GEBU, GABI)	Bovengrondse calamiteiten kunnen leiden tot beschadiging van de bekleding van de waterkering. Het effect daarvan op de waterveiligheid is onder meer afhankelijk van de krater die kan ontstaan. In deze studie wordt uitgegaan van een krater van 2 m diep. Op dit mechanisme wordt nader ingezoomd.
Golferosie kruin en binnentalud (GEKB)	Op het binnentalud en de kruin is een bekleding van gras op klei aanwezig. Ook hier kan een krater ontstaan door een bovengrondse calamiteit. Het gevolg daarvan wordt nader beschouwd.
Piping en heave (STPH)	In de ondergrond is een dunne kleilaag aanwezig van maximaal 2 m dik. Deze kleilaag bevindt zich direct aan het oppervlak. Het risico is aanwezig dat een eventuele krater door een turbineblad door deze deklaag heen snijdt. Dit kan een ongunstig effect hebben op het mechanisme piping. Dit mechanisme is nader beschouwd.
Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	Een afbrekend onderdeel van de windturbine kan effect hebben op de macrostabiliteit: 1. Het extra gewicht kan leiden tot verandering van de stabiliteit van het dijklichaam. Indien een onderdeel op de kruin terecht komt, dan vermindert de stabiliteit. In [lit 7] is vastgesteld dat het gewicht van een blad dezelfde orde grootte heeft als een normale verkeersbelasting. Ervan uitgaande dat de dijk is berekend op een normale verkeersbelasting en de belasting door het extra gewicht niet tegelijk optreedt met een verkeersbelasting, hoeft dit effect niet nader beschouwd te worden. 2. Een krater kan potentieel een negatief effect hebben op de stabiliteit, afhankelijk van de locatie. Dit effect wordt nader beschouwd.
Macrostabiliteit buitenwaarts (STBU)	Een afbrekend onderdeel kan effect hebben op de buitenwaartse macrostabiliteit. Gezien de beperkte afmetingen van een eventuele krater ten opzichte van de afmetingen van een schuifvlak is het niet de verwachting dat er grote afschuivingen optreden door de krater van een turbineblad of gondel. Beschadiging van de bekleding en de daarmee gepaard gaande gevolgen, hebben een grotere bijdrage aan de faalkans.
Microstabiliteit (STMI)	Geen effect
Voorland (STVL)	Geen effect

3.2.1 Bekleding buitentalud (GEBU)

Voor het buitentalud is aangehouden dat bij een treffen de bekleding faalt. Vanuit het perspectief waterveiligheid achterland is dit een risico als er tegelijkertijd sprake is van golfaanval.

Voor de beoordeling van de bekleding is het mechanisme GEBU beoordeeld. Hierbij is de gehele faalkansruimte voor de bekleding op het buitentalud toebedeeld aan dit faalmechanisme. Tevens is aangehouden dat bij een significante belasting falen optreedt, waarbij geen rekening is gehouden met reststerkte. Dit resulteert in een doorsnede eis van $1E-4$. Getoetst is aan 1% van deze doorsnede (= $1E-6$ per jaar).

Voor het westelijke gedeelte is gesteld dat bij dit faalmechanisme geldt dat treffen, ongeacht het faalscenario, gelijk staat aan het falen van de bekleding. In het geval van de storm-gecorrleerde faalscenario's leidt dit ook tot falen van de waterkering. Voor het oostelijke gedeelte is de faalkans per

deelzone van het buitentalud apart bepaald. Hierbij is voor dit faalmechanisme, op basis van de Hydra-NL resultaten (zie Tabel 6), vastgesteld dat de faalkans van het restprofiel bij een treffen op:

- het benedentalud gelijk is aan 1;
- de berm gelijk is aan 1/10;
- het boventalud gelijk is aan 1/100.

De faalkans van de individuele zones op het buitentalud is opgeteld tot een totale faalkans voor de bekleding op het buitentalud. Voor alle opstelling- en turbinevarianten is de berekening van de faalkansbijdrage van de bovengrondse calamiteiten per traject weergegeven in Tabel 5.

Resultaat voor bekleding buitentalud:

Alle opstellingen voldoen aan de gestelde maximale faalkansbijdrage, met uitzondering van variant 2A. Dit wordt veroorzaakt door de relatief grote trefkans van de mast tijdens storm.

Tabel 5: Faalkansbijdragen bovengrondse calamiteiten op bekleding buitentalud

Zone	Faalscenario	VKA	1A	1B	2A	2B
Benedentalud_Oost	Bladworp nominaal	5,4E-07	5,3E-07	5,1E-07	4,9E-07	5,2E-07
Benedentalud_Oost	Storm gecorreleerd	7,0E-08	7,0E-08	6,4E-08	3,2E-06	8,4E-08
Berm_Oost	Bladworp nominaal	1,2E-08	1,2E-08	1,1E-08	1,3E-08	1,4E-08
Berm_Oost	Storm gecorreleerd	1,8E-09	1,8E-09	1,6E-09	2,2E-07	2,2E-09
Boventalud_Oost	Bladworp nominaal	8,3E-10	7,4E-10	7,3E-10	8,2E-10	8,5E-10
Boventalud_Oost	Storm gecorreleerd	1,1E-10	1,1E-10	1,0E-10	1,4E-08	1,3E-10
Totaal Buitentalud Oost		6,2E-07	6,2E-07	5,9E-07	3,9E-06	6,2E-07
Buitentalud_West	Bladworp nominaal	0,0E+00	0,0E+00	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Buitentalud_West	Storm gecorreleerd	7,0E-08	6,4E-08	5,7E-08	7,0E-08	6,6E-08
Totaal Buitentalud West		7,0E-08	6,4E-08	5,7E-08	7,0E-08	6,6E-08

3.2.2 Golferosie kruin en binnentalud (GEKB).

Dit mechanisme heeft betrekking op de aanwezige kruinhoogte en de erosiebestendigheid van het binnentalud. Een treffen van de kruin heeft invloed op de aanwezige kruinhoogte en daarmee invloed op de kans op falen van de bekleding op het binnentalud. Daarnaast heeft een treffen op het binnentalud invloed op de erosiebestendigheid van de waterkering. Bij een beschadigd binnentalud komt de zandkern bloot te liggen en kan falen optreden indien een overslagdebiet optreedt dat groter is dan 0,1 l/m/s. Bij een beschadigde kruin ligt de kruin bloot en kan ook de kruin maximaal een overslagdebiet keren van 0,1 l/m/s.

Voor het mechanisme geldt een maximale faalkansbijdrage van 1,2 E-6 per jaar (1% van 1,2 E-4).

Om de faalkans van het restprofiel te bepalen, is voor verschillende herhalingstijden de benodigde kruinhoogte berekend bij een overslagdebiet van 0,1 l/m/s. Hiervoor is voor beide trajecten een representatief profiel gekozen. Voor het westelijke deeltraject is dit dijkpaal 328 (t.h.v. WT1) en voor het oostelijke deeltraject is dit dijkpaal 314 (t.h.v. WT4 in opstel variant 1). De resultaten zijn samengevat in Tabel 6. In bijlage A zijn bijbehorende Hydra-NL-berekeningen meegeleverd.

Tabel 6 Kruinhoogte bij 0,1 l/m/s per herhalingsstijd en locatie

Herhalingsstijd [1/ per jaar]	Kruinhoogte bij 0,1 l/m/s [m NAP]	
	T.h.v. WT1 Dijkpaal 328 (west)	T.h.v. WT4 Dijkpaal 314 (oost)
1/10	5,64	6,44
1/100	6,43	7,34
1/1.000	7,23	8,15
1/8.333 (doorsnede eis)	8,05	8,85
1/10.000	8,13	8,91
1/100.000	9,17	9,71

3.2.2.1 Treffen kruin

De kruinhoogte van de dijk na treffen op de kruin bedraagt +7,30 m NAP (West en Oost). Deze is bepaald door het opstellen van een restprofiel, weergegeven in Bijlage B. Bij deze kruinhoogte hoort een herhalingsstijd van een overslagdebiet van 0,1 l/m/s/ van circa 1/1.000 per jaar voor West en circa 1/100 per jaar voor Oost. De faalkansbijdragen van alle varianten zijn opgenomen in Tabel 7.

Resultaat golferosie bij treffen kruin:

Bij alle varianten (zowel het westelijke deeltraject als het oostelijke deeltraject) blijft de faalkansbijdrage binnen de maximaal toelaatbare faalkansbijdrage. Alle varianten voldoen dus aan de gestelde norm.

Tabel 7: Faalkansbijdragen bovengrondse calamiteiten faalmechanisme GEKB, treffen kruin

Zone	Faalscenario	VKA	1A	1B	2A	2B
Kruin_Oost	Bladworp nominaal	6,2E-10	6,8E-10	6,2E-10	5,5E-10	5,4E-10
Kruin_Oost	Storm gecorreleerd	8,3E-08	9,4E-08	8,0E-11	6,2E-08	1,0E-10
Totaal Kruin Oost		8,3E-08	9,5E-08	7,0E-10	6,3E-08	6,4E-10
Kruin_West	Bladworp nominaal	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Kruin_West	Storm gecorreleerd	8,3E-12	9,8E-12	8,8E-12	9,3E-12	8,7E-12
Totaal Kruin West		8,3E-12	9,8E-12	8,8E-12	9,3E-12	8,7E-12

3.2.2.2 Treffen van het binnentalud

De kruinhoogte in het westelijke deeltraject bedraagt +8,17 m NAP. De kans dat bij deze hoogte een overslagdebiet groter dan 0,1 l/m/s optreedt, is 1/10.000 per jaar (zie Tabel 6). De kruinhoogte is in het oostelijke deeltraject +8,21 m NAP; de kans op het optreden van een overslagdebiet groter dan 0,1 l/m/s in dit deel bedraagt 1/1.000 per jaar (zie Tabel 6). De faalkansbijdragen van alle opstellingen en varianten zijn opgenomen in Tabel 8. Hierbij is voor het faalscenario bladworp nominaal uitgegaan van een hersteltijd van 5 dagen.

Resultaat golferosie bij treffen binnentalud:

Bij alle varianten (zowel het westelijke deeltraject als het oostelijke deeltraject) blijft de faalkansbijdrage binnen de maximaal toelaatbare faalkansbijdrage. Alle varianten voldoen dus aan de gestelde norm

Tabel 8: Faalkansbijdragen bovengrondse calamiteiten faalmechanisme GEKB, treffen binnentalud

Zone	Faalscenario	VKA	1A	1B	2A	2B
Binnentalud_Oost	Bladworp nominaal	5,8E-10	5,5E-10	5,3E-10	4,7E-10	4,9E-10
Binnentalud_Oost	Storm gecorreleerd	6,2E-09	6,8E-09	1,1E-08	4,1E-09	1,0E-08
Totaal Binnentalud Oost		6,8E-09	7,3E-09	1,2E-08	4,6E-09	1,1E-08
Binnentalud_West	Bladworp nominaal	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,2E-11	0,0E+00
Binnentalud_West	Storm gecorreleerd	5,0E-12	5,0E-12	4,5E-12	6,3E-12	5,9E-12
Totaal Binnentalud West		5,0E-12	5,0E-12	4,5E-12	4,9E-11	5,9E-12

3.2.3 Piping en heave

Het mechanisme piping en heave wordt negatief beïnvloed door een krater als gevolg van een gevallen (onderdeel van een) windturbine. De dikte van een deklaag kan als gevolg van een krater afnemen waardoor eerder opbarsten kan optreden en het gereduceerde verval mogelijk ook afneemt. Dit kan leiden tot een toename van de faalkans voor het mechanisme piping en heave. Voor de beoordeling van dit risico is gekeken naar de bodemopbouw ter hoogte van WT1 en WT4 (variant 1).

WT1

Ter hoogte van WT1 is, op basis van DINOloket, een zeer dikke deklaag aanwezig. De deklaag bestaat uit klei met zandlaagjes. Deze deklaag heeft een dikte van 13 tot 18 m. Een krater van 1 à 2 m diepte zal in dit geval geen negatief effect hebben op de kans op opbarsten en ook niet op de faalkans voor het mechanisme piping. De bijdrage van een eventuele treffer is derhalve verwaarloosbaar.

WT4

Ter hoogte van WT4 is, op basis van DINOloket, een dunne deklaag aanwezig die varieert tussen 1 en 3 m. De bovenkant van de deklaag ligt in 3 van de 5 beschouwde boringen hoger dan de bodem van de sloot (-0,29 m NAP). Daarmee is er op een aantal locaties binnen dit traject ter plaatse van de sloot geen deklaag meer aanwezig. Een krater binnen dit traject heeft derhalve geen negatief effect op de deklaagdikte. Een treffen in het achterland levert ook geen negatieve invloed op voor de aanwezige kwelweglengte; de uittredelocatie blijft de bodem van de sloot.

Een eventueel treffen aan de dijkzijde van de sloot levert ook geen negatief effect op doordat het maaiveld/de dijk hier hoger ligt en een krater niet door de deklaag steekt en daardoor geen invloed heeft op de ligging van het uittredepunt (dit blijft in de sloot liggen). De bijdrage van een eventueel treffen is hiermee voldoende klein.

Resultaat piping/heave:

De faalkansbijdrage voor het faalmechanisme piping en heave is verwaarloosbaar klein.

3.2.4 Macrostablieiteit

Voor de macrostablieiteit berekeningen zijn default sterkteparameters gehanteerd. Deze zijn overgenomen uit de schematiseringshandleiding macrostablieiteit behorend bij het WBI2017 [Ref. 11]. De gehanteerde sterkteparameters zijn opgenomen in Tabel 12 in Bijlage B. Voor de freatische lijn is uitgegaan van een nagenoeg rechte lijn tussen buitentalud en binnenteen. Gezien de relatief korte duur van een hoogwater is dit een conservatief uitgangspunt. De stijghoogte in het watervoerend pakket verloopt conservatief van de buitenteen in een rechte lijn naar de grenspotentiaal aan de binnenzijde. Er is derhalve geen demping/intredeweerstand meegenomen; dit is een conservatief uitgangspunt.

De binnenwaartse macrostablieiteit is gedetailleerd beoordeeld voor windturbine WT4 (variant 1). De redenen voor deze keuze zijn dat:

- De trefkans ter hoogte van WT4 groter is door de kleinere afstand tussen de dijk en de windturbine.
- De bodemopbouw bij WT4 ongunstiger is. Ter plaatse van WT4 is sprake van een relatief dunne deklaag die opbarst waardoor er in de ondergrond tijdens maatgevende omstandigheden sprake is van een beperkte sterkte. Ter plaatse van WT1 is sprake van een zeer dikke kleilaag die niet opbarst.

WT4

Om de macrostablieiteit bij het eventuele treffen in beeld te brengen, is een drietal situaties beschouwd; naast de originele basisberekening zonder krater betreft het:

- Krater bij de overgang van binnentalud naar berm.
- Krater bij de binnenteen.

Toelichting:

Het treffen van de dijk of het achterland door een windturbineblad levert een krater op. Door de aanwezigheid van deze krater neemt de sterkte af. Een krater in de overgang tussen kruin en berm of nabij de binnenteen zijn de maatgevende situaties. Voor beide situaties is een berekening uitgevoerd. De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9 Resultaten afschuifveiligheid per scenario

Scenario	S.F.	Faalkans rest-profiel [1/jaar]
Basis berekening	1,13	1/160.000 ¹
Krater berm	1,0	1/2.600
Krater binnenteen	1,13	1/160.000

De doorsnede-eis bedraagt 2,1E-6 per jaar, de maximaal toelaatbare faalkansbijdrage bedraagt 2,1E-8 per jaar. De kraters op de berm en de binnenteen hebben een toelaatbare faalkansbijdrage.

¹ De basisberekening voldoet, door de conservatieve aanpak, net niet aan de doorsnede eis.

Tabel 10: Faalkansbijdrage Macrostabiliteit

Zone	Faalscenario	VKA	1A	1B	2A	2B
Binnentalud_Oost	niet storm - krater berm	1,1E-10	1,0E-10	1,0E-10	8,8E-11	9,2E-11
Binnentalud_Oost	storm - krater berm	1,2E-09	1,3E-09	2,1E-09	7,8E-10	2,0E-09
Beschermingszone_A_Oost	niet storm - krater binnenteen	2,3E-11	2,4E-11	2,3E-11	2,6E-11	2,3E-11
Beschermingszone_A_Oost	storm - krater binnenteen	4,4E-10	4,1E-10	4,3E-10	4,3E-10	4,6E-10
Totaal Macrostabiliteit		1,7E-09	1,8E-09	2,6E-09	1,3E-09	2,5E-09

Resultaat voor macrostabiliteit binnenwaarts:

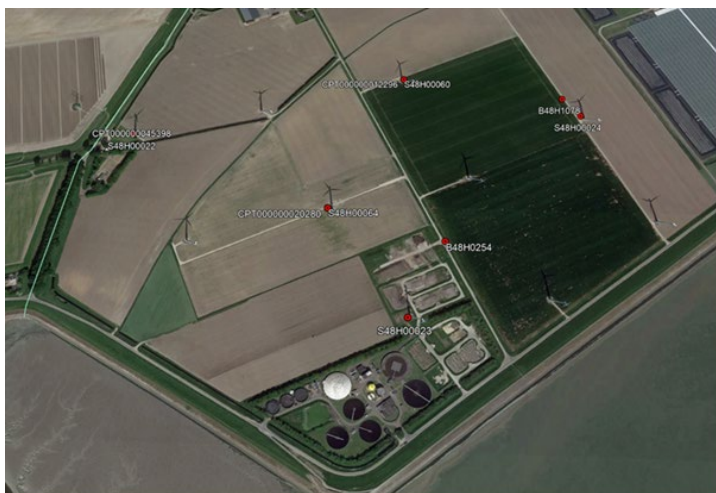
De faalkansbijdrage is voor alle plaatsingsvarianten voldoende klein.

3.3 Ondergrondse invloed

De ondergrondse invloed van de windturbines komt voort uit het gewicht van de windturbine, de (wind)krachten op de windturbine en de trillingen als gevolg van deze krachten. De windturbines worden gefundeerd op palen. Dit betekent dat de krachten op de windturbine plus het eigengewicht via de palen worden overgedragen op de diepere ondergrond. Vanwege de grote afstand (80 m of meer) tussen de windturbines en de waterkering heeft het eigengewicht van de windturbine geen negatief effect op de macrostabiliteit van de waterkering. Ook piping speelt op deze afstand geen rol. Door de trillingen zou in de ondergrond verweking op kunnen treden.

3.3.1 Verweking

Aan de hand van beschikbare sonderingen (zie Figuur 5) is voor de operationele fase een quickscan uitgevoerd naar het risico op verweking. Daarbij is onderscheid gemaakt in statische en dynamische verweking. Deze quickscan is voor wat betreft statische verweekbaarheid uitgevoerd volgens de methode Robertson (2010, 2012) of kwalitatief (indien geen GEF-bestand aanwezig was) en voor wat betreft de cyclische verweekbaarheid op basis van afstand van de windturbines tot de binnenteen van de dijk.



Figuur 5: Beschikbare sonderingen windpark Willem-Annapolder

Het beeld op hoofdlijnen is dat van de ondergrond de bovenste laag licht gevoelig is voor verweking en in een aantal locaties ook de iets diepere wadzandlagen. Statische verweking kan alleen optreden als er sprake is van verwekingsgevoelige grondlagen in combinatie met een te steil talud waarbij zich een trigger voordoet, zoals bijvoorbeeld een trilling of een bovenbelasting. Omdat de windturbines in de Willem Annapolder op horizontaal maaiveld worden geïnstalleerd, is dáár geen risico aanwezig op statische verweking.

Cyclische verweking kan optreden indien trillingen uit de windturbinefundatie leiden tot verdichting van grondlagen terwijl overspannen water niet kan afstromen. Omdat de afstand van de windturbines tot de binnenteen van de dijk 50m of groter is, is het de verwachting dat eventueel optredende cyclische verweking geen invloed heeft op de dijk in termen van trillingen, wateroverspanningen en instabiliteit.

Terzijde wordt opgemerkt dat aangezien enkele sonderingen een grote gevoeligheid voor statische verweking laten zien, het niet uitgesloten is dat trillingen door installeren van funderingspalen een invloed hebben op de dijk. Ondanks het feit dat de afstand van de huidige turbines tot de binnenteen van de dijk minimaal 80m is, wordt geadviseerd hier in een later stadium aandacht aan te besteden en als het nodig is de uitvoering op de resultaten daarvan af te stemmen. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het treffen van mitigerende maatregelen zoals het toepassen van een trillingsarme bouwmethodiek.

3.4 Samenvatting resultaten

De resultaten per faalmechanisme en per alternatief zijn samengevat in Tabel 11. De belangrijkste conclusies zijn:

- In het westelijke traject blijft voor alle opstellingsvarianten de faalkansbijdrage binnen de gestelde norm (de maximale toelaatbare faalkansbijdrage).
- In het oostelijke traject is bij variant 2A de faalkansbijdrage te groot voor het faalmechanisme bekleding buitentalud. Dit wordt veroorzaakt door WT4 en de trefkans van de mast.
De overige varianten voldoen c.q. de faalkansbijdrage blijft binnen de gestelde norm.

Tabel 11: Resultaten per faalmechanisme per alternatief

Faalmechanisme	VKA	1A west	1B west	2A west	2B west	VKA	1A oost	1B oost	2A oost	2B oost
Bekleding buitentalud	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet niet	Voldoet
Hoogte	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
Bekleding binnentalud	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
Piping	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
Macrostabieliteit	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet

4 CONCLUSIES

4.1 Conclusies

Op basis van de relatief eenvoudige en op delen conservatieve benadering is de faalkansbijdrage van de nieuwe / te vervangen windturbines in Windpark Willem Annapolder op de waterveiligheid berekend. Op basis van deze berekeningen worden de volgende conclusies getrokken:

Het VKA, de variant waarvoor de vergunning wordt aangevraagd, voldoet aan de door het waterschap gestelde norm. Ofwel bij het VKA blijft de faalkansbijdrage binnen de gestelde maximale faalkansbijdrage.

Met betrekking tot de overige varianten wordt geconcludeerd:

- Voor het westelijke deeltraject voldoen alle plaatsingsvarianten aan de door het waterschap gestelde norm.
- In het oostelijke traject voldoen alle varianten, met uitzondering van variant 2A, aan de door het waterschap gestelde norm.
Bij variant 2A wordt voor het faalmechanisme bekleding buitentalud, de maximaal toegestane faalkansbijdrage overschreden. Dit wordt veroorzaakt door WT4 (variant 2) en de trefkans van de mast.
Dit betekent dat indien op basis van onderhavig onderzoek een vergunning voor variant 2A wordt aangevraagd, vanuit 'waterveiligheid' geen positief advies wordt gegeven,

Opgemerkt wordt dat de resultaten, inclusief de berekende faalkansen, op veilige aannamen berusten. Verdere optimalisaties in de aanpak zijn derhalve mogelijk.

5 LITERATUUR

1. Waterveiligheidsportaal
2. Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, februari 2017 versie 4 (OI2014v4)
3. Legger waterschap Scheldestromen.
4. Windturbines op of nabij primaire waterkeringen (473), Kennisplatform Risicobenadering, 19-07-2018, versie 2.
5. Handboek Risicozonering Windturbines, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, eindversie, 3^e geactualiseerde versie mei 2013.
6. Windpark Oosterscheldekering, Bovengrondse calamiteiten – kraterberekeningen, Arcadis, 29-9-2017.
7. Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, WBI 2017, Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 november 2019.
8. Schematiseringshandleiding piping, WBI 2017, Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 november 2019.
9. Trefkansanalyse waterkering Windpark Willem-Annapolder, Pondera, v3.0, 19 mei 2020.
10. Dijkverbetering Willem-Annapolder, Ontwerpnota, Projectbureau Zeeweringen, versie 1 16-4-2003.
11. Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit, WBI 2017, Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 november 2019.
12. ENW advies: Advies integrale analyse windturbines innogy windpark Oostpolderdijk bij dijkversterking Eemshaven-Delfzijl, kenmerk 19-04, 12 juli 2019, ENW.

BIJLAGE A HYDRA NL BEREKENINGEN

Gebruikte uitvoerlocaties

Bij het berekenen van de hydraulische randvoorwaarden is er gebruikt gemaakt van de uitvoerlocaties zoals beschikbaar in Hydra-NL. Dit zijn:

- WS_1_30-3_dk_00011
- WS_1_30-3_dk_00017

De gebruikte uitvoerlocaties zijn tevens weergegeven in onderstaande figuur.

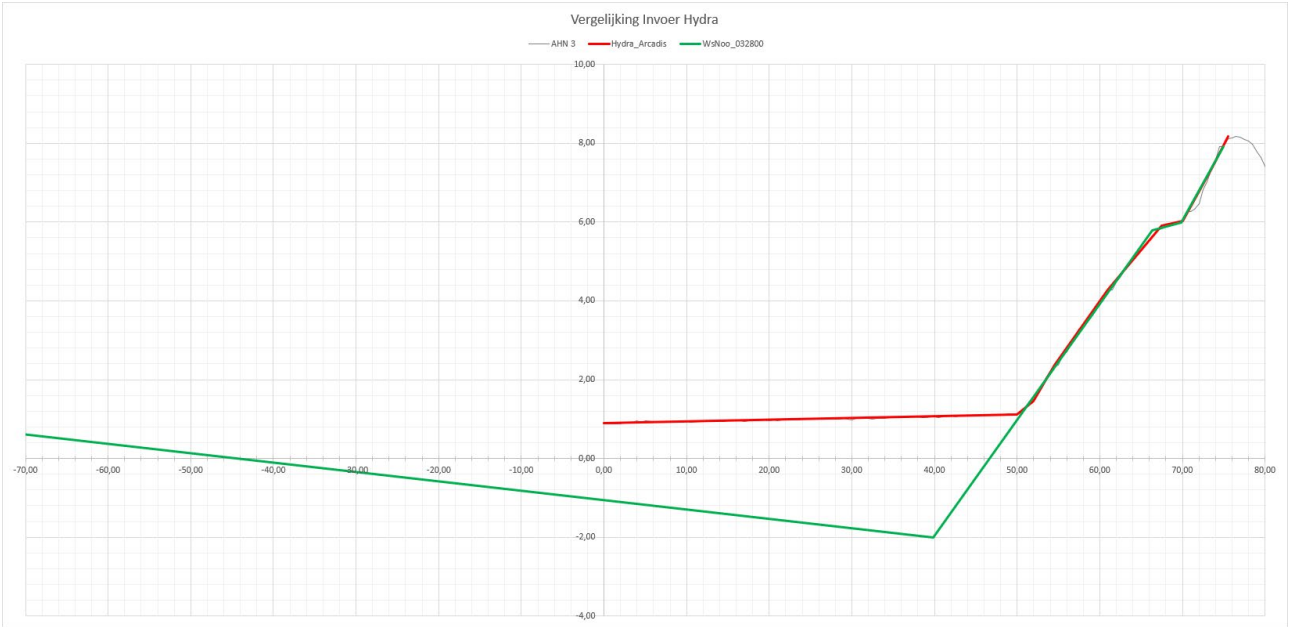


Figuur 6 Gebruikte uitvoerlocaties in Hydra-NL

Invoer profiel

Voor Hydra-NL is gebruik gemaakt van de AHN-3 voor het maken van een profiel. Het profiel is vereenvoudigd en vervolgens ingevoerd in Hydra-NL. Daarnaast is een vergelijking gemaakt met het Hydra-NL-profiel zoals het waterschap deze ingevoerd heeft. Dit is zowel gedaan voor een profiel nabij WT1 en nabij WT4. Uit de verschillenanalyse blijkt dat er niet veel verschillen zijn. Alleen heeft het waterschap een voorland ingevoerd waar Arcadis dit niet heeft gedaan.

De verschillen voor WT 1 zijn te zien in Figuur 7. De verschillen voor WT4 zijn te zien in Figuur 8.



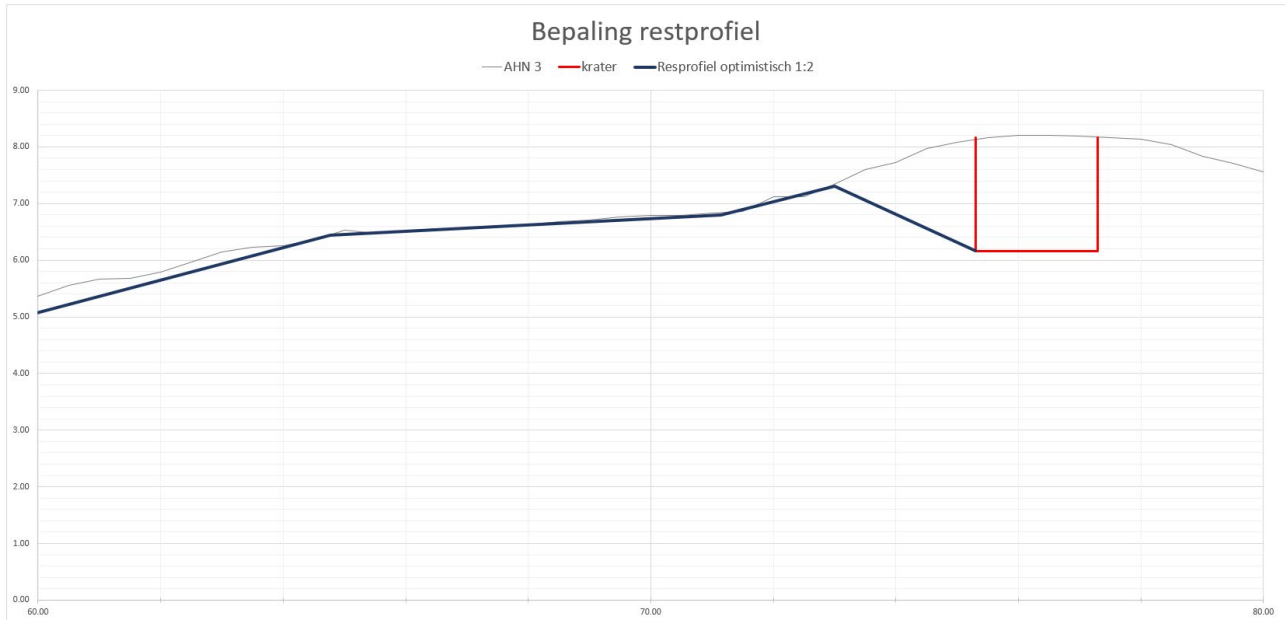
Figuur 7 Profiel Hydra-NL en vergelijking, WT1



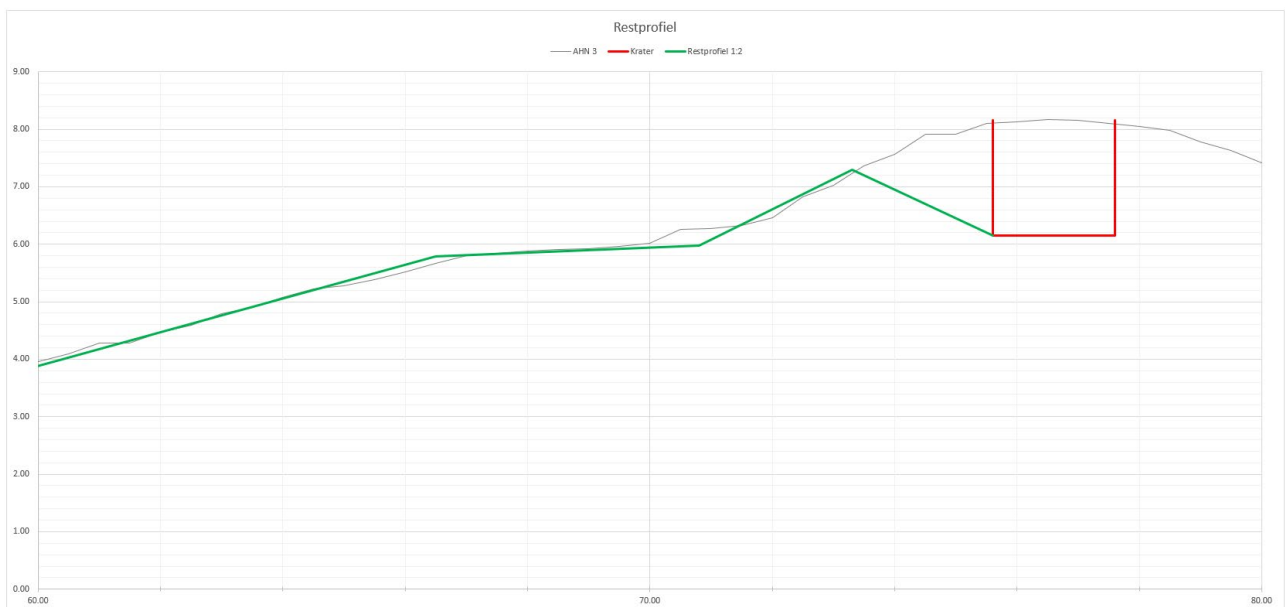
Figuur 8 Profiel Hydra-NL en vergelijking, WT4

BIJLAGE B RESTPROFIEL

Ter optimalisatie van de kruinhoogte bij impact van een turbineblad op de kruin is een restprofiel bepaald voor het oostelijke en westelijke deeltraject. Hierbij is uitgegaan van een 1:2 talud richting de krater.



Figuur 9 Bepaling restprofiel oostelijk deeltraject



Figuur 10 Bepaling restprofiel westelijk deeltraject

BIJLAGE C MACROSTABILITEIT BINNENWAARTS

Sterkteparameters

Voor de macrostabiliteit berekeningen zijn onderstaande sterkteparameters gehanteerd. Deze zijn afgeleid vanuit de Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit [Ref. 11].

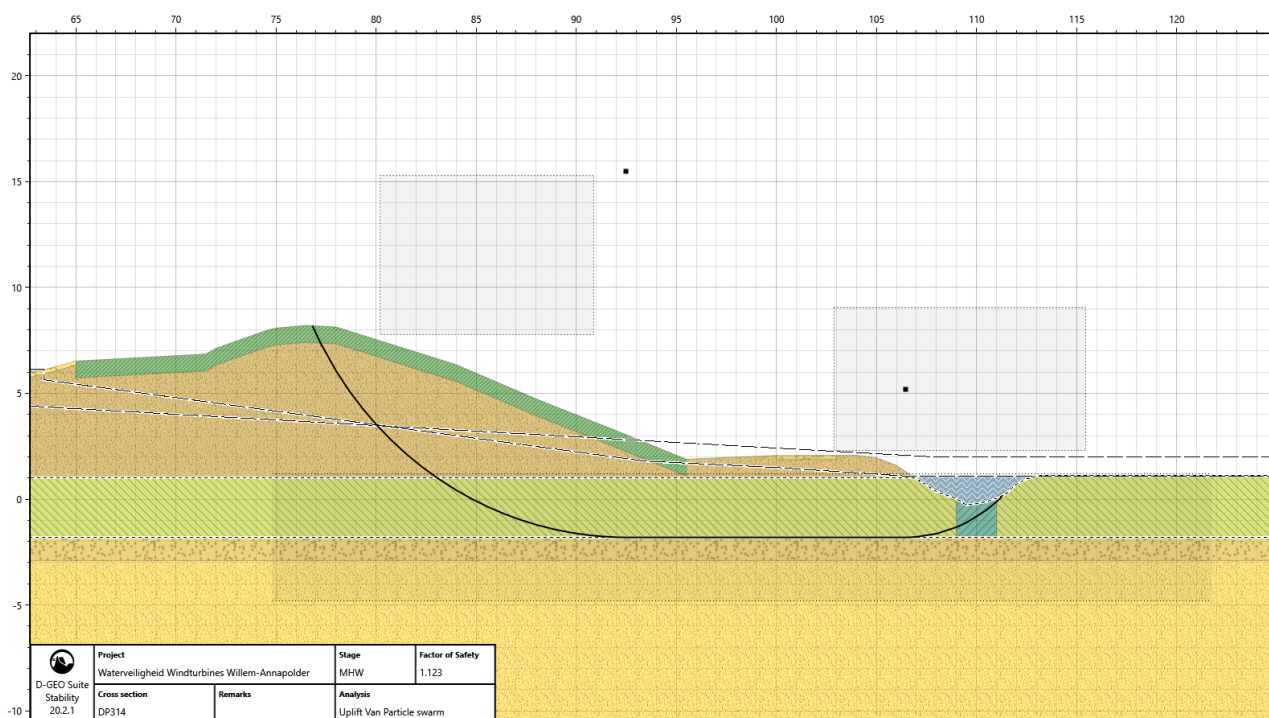
Tabel 12 Sterkteparameters Willem-Annapolder

Grondlaag [-]	γ_{dr} [kN/m ³]	γ_{nat} [kN/m ³]	c'_{rek} [kN/m ²]	ϕ'_{rek} [°]	POP [kPa]	m [-]	S [-]
Dijkkern zand (B)	17	19	-	28,6	-	-	-
Klei, bekleding (B)	16	16	-	28,6	7	0,85	0,23
Asfalt	23	23	-	32,0	-	-	-
Klei, duinkerken (K1)	16	16	-	28,6	15	0,85	0,22
Holoceen zand (Z1)	17	19	-	28,6	-	-	-
Holoceen zand (Z2)	18	20	-	32,4	-	-	-
Zand, kleiig	18	20	-	29,9	-	-	-

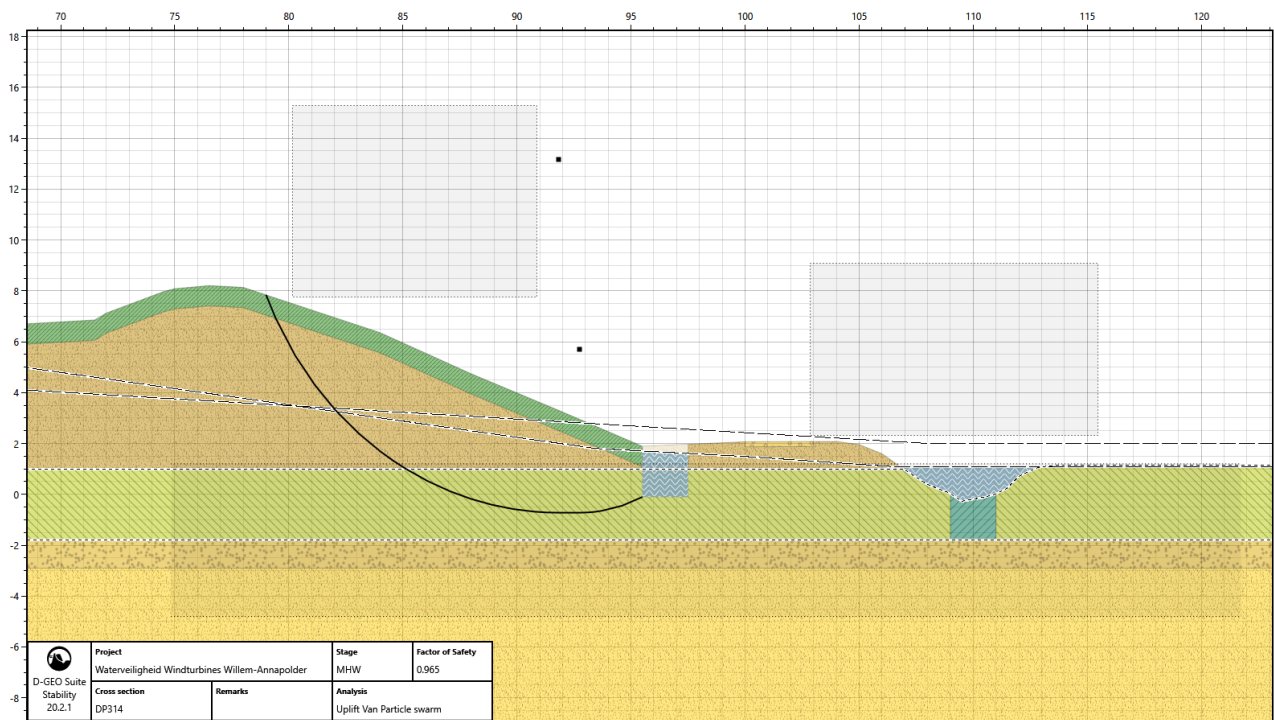
Glijvlakken

In onderstaande figuren (Figuur 11 t/m Figuur 13), zijn alle glijvlakken in de volgende volgorde weergegeven:

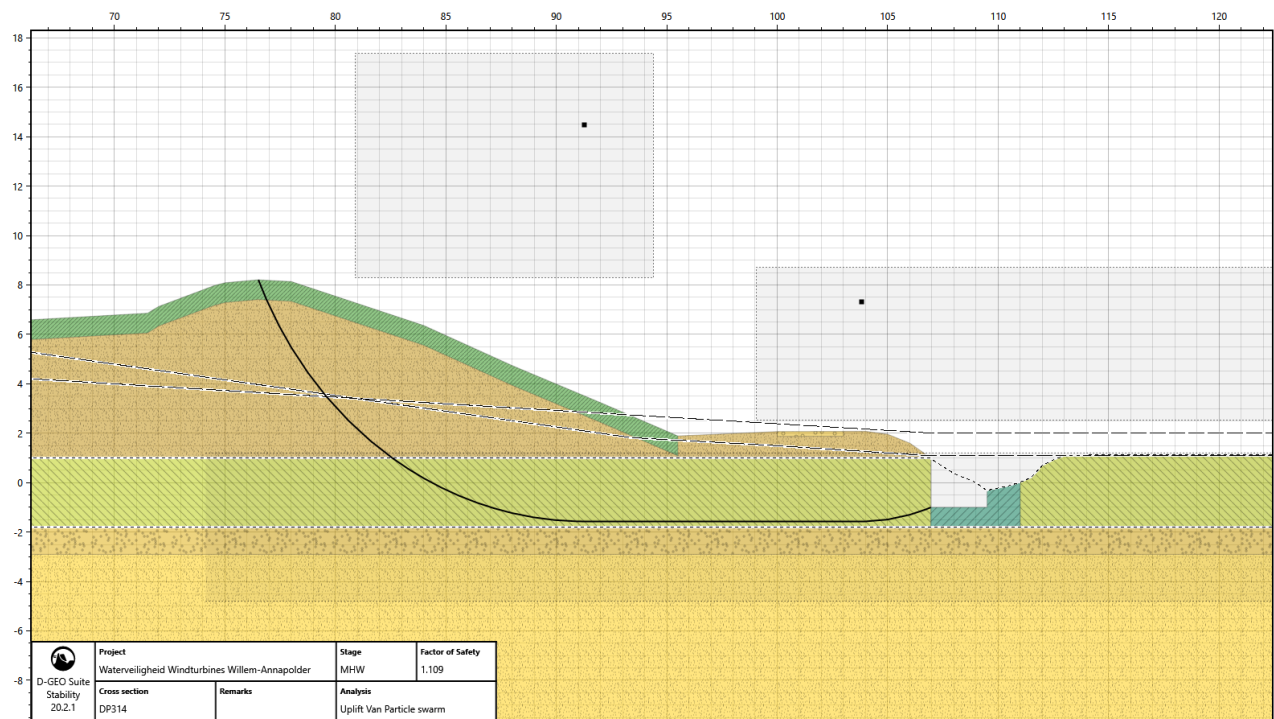
- Basis berekening
- Krater berm
- Krater binnenteen



Figuur 11 Glijvlak basis berekening, Uplift-Van



Figuur 12 Glijvlak krater berm berekening, Uplift-Van



Figuur 13 Glijvlak krater binnenteen berekening, Uplift-Van

COLOFON

WATERVEILIGHEIDSSSTUDIE WINDPARK WILLEM-ANNAPOLDER

KLANT

Pondera Consult

AUTEUR

Martin Arends

PROJECTNUMMER

c07011.202003

ONZE REFERENTIE

D10010474:4

DATUM

2 juni 2020

STATUS

Definitief

GECONTROLEERD DOOR

Hans Niemeijer
Senior specialist

VRIJGEGEVEN DOOR

Roland Hoijinck
Senior adviseur

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com