

RAPPORT

Windpark Vlaardingen

Beoordeling invloed op waterveiligheid

Klant: Pondera Consult

Referentie: BG5196R001F2.0

Status: S2/P01.01

Datum: 25 juli 2019



HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Maritime & Aviation
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Windpark Vlaardingen

Ondertitel: Beoordeling waterveiligheid WP Vlaardingen
Referentie: BG5196R001F2.0
Status: P01.01/S2
Datum: 25 juli 2019
Projectnaam: WP Vlaardingen
Projectnummer: BG5196
Auteur(s): I. Hergarden/ H.A.W. van Gelder / P. Winkelman

Opgesteld door: I.M. Hergarden

Gecontroleerd door: J. Cools

Datum: juli 2019

Goedgekeurd door: M. de Jong

Datum: juli 2019

Classificatie

Projectgerelateerd



Disclaimer

No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The integrated QHSE management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and OHSAS 18001:2007.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel en afbakening	2
1.3	Kader en aanpak	2
2	Samenvatting	5
3	Projectomschrijving	10
3.1	Projectlocatie	10
3.2	Windparkonderdelen	11
3.3	Projectfasering	13
3.4	Waterkering	14
3.5	Blankenburgverbinding	15
4	Eisen voor de waterkering	16
4.1	Zonering waterkering	16
4.2	Normspecificatie	17
4.3	Eisen ten aanzien van veiligheid	18
4.4	Eisen ten aanzien van robuustheid	18
4.5	Eisen ten aanzien van beheer en onderhoud	18
5	Uitgangspunten en randvoorwaarden	19
5.1	Beschikbare informatie	19
5.2	Geometrie kering	19
5.3	Geologie	20
5.4	Bodemopbouw	20
5.5	Grondparameters	22
5.6	Hydraulische belastingen	22
5.7	Faalkanseisen	24
5.8	Partiële veiligheidsfactoren	25
6	Belastingen	26
6.1	Belastingen tijdens de bouwfase	26
6.2	Belastingen tijdens de gebruiksfase	28
6.3	Belastingen tijdens de verwijderingsfase	30
7	Beoordeling ondergrondse effecten	31
7.1	Relevante faalmechanismen	31

7.2	Beoordeling effecten op overloop en golfoverslag (HT)	34
7.3	Beoordeling effecten op binnenwaarste stabiliteit (STBI)	35
7.4	Beoordeling effecten op buitenwaartse stabiliteit (STBU)	38
7.5	Beoordeling effecten op opbarsten, piping en heave (STPH)	41
7.6	Beoordeling effecten voor bekleding	41
7.7	Beoordeling effecten voorland/zettingsvloeiing	41
7.8	NWO's	42
7.9	Additionele faalkansen ondergrondse effecten	42
8	Beoordeling bovengrondse effecten	43
8.1	Algemeen	43
8.2	Faalscenario's	43
8.3	Faalfrequentienorm	44
8.4	Toetsingscriterium	44
8.5	Trefafstanden	44
8.6	Kritische strook waterkering	46
8.7	Raakfrequenties	46
8.7.1	Per onderdeel	47
8.7.2	Per zone waterkering	48
8.8	Restprofiel waterkering en responstijd	48
8.9	Additionele faalfrequentie bovengrondse effecten	50
8.10	Overige effecten	51
9	Conclusies en aanbevelingen	52
9.1	Conclusies	52
9.2	Aanbevelingen	53
10	Referenties	55

Tabellen

Tabel 2-1 Samenvatting faalkansbijdrage per faalmechanisme waterkering (ondergrondse effecten)	6
Tabel 2-2 Faalfrequentie waterkering - waterstaatswerk	7
Tabel 2-3 Faalfrequenties waterkering – beschermingszone - binnen	7
Tabel 2-4 Faalfrequentie waterkering – beschermingszone - buiten	7
Tabel 2-4 Faalkans waterkering – per doorsnede	8
Tabel 3-1 Kenmerken windturbine	12

Tabel 3-2 Kenmerken van te beschouwen waterkering	14
Tabel 5-1 Globale bodemopbouw projectlocatie	21
Tabel 5-2 Grondparameters (karakteristieke waarden)	22
Tabel 5-3 Hydraulische belasting ten behoeve van beoordeling	23
Tabel 5-4 Faalkansruimtefactoren per faalmechanisme	24
Tabel 5-5 Faalkanseisen per faalmechanisme op doorsnedeniveau	24
Tabel 5-6 Partiele factoren	25
Tabel 5-7 Veiligheidsfactoren stabiliteitsberekeningen	25
Tabel 6-1 Overzicht grondversnellingen in de gebruiksfase	29
Tabel 7-1 Omschrijving faalmechanismen (figuren uit VTV2006)	31
Tabel 7-2 Relevante faalmechanismen per projectfase met mogelijk effect	34
Tabel 7-3 Resultaten berekening stabiliteit binnenwaarts	37
Tabel 7-4 Resultaten berekening stabiliteit buitenwaarts	40
Tabel 7-5 Verzameltabel faalkansbijdrage per faalmechanisme waterkering	42
Tabel 8-1 Scenario's en faalfrequenties voor de windturbines	44
Tabel 8-2 Raakfrequenties mastbreuk in 1/jaar	47
Tabel 8-3 Raakfrequentie gondelval in 1/jaar	47
Tabel 8-4 Raakfrequentie bladworp in 1/jaar	48
Tabel 8-5 Totale raakfrequenties waterkering - waterstaatswerk	48
8-6 Totale raakfrequenties waterkering – beschermingszone binnen	48
Tabel 8-7 Totale raakfrequenties waterkering – beschermingszone buiten	48
Tabel 8-8 Faalfrequentie waterkering - waterstaatswerk	50
Tabel 8-9 Faalfrequenties waterkering – beschermingszone - binnen	50
Tabel 8-10 Faalfrequentie waterkering – beschermingszone - buiten	51

Figuren

Figuur 1-1 Geplande locaties windturbines WP Vlaardingen (detail uit tekening De Windvogel)	1
Figuur 1-2 Zonering waterkering (bron: Legger HH Delfland)	2
Figuur 2-1 Locatie windturbines in dwarsprofiel	5
Figuur 3-1 Geplande locaties WT1 en WT2 ten noorden van het Scheur (bron: Google Earth)	10
Figuur 3-2 Zicht op de dijk en de dijkovergang vanaf de Maassluisdijk tussen Vlaardingen en Maassluis (bron: Google Earth)	10
Figuur 3-3 Hoogtegegevens (AHN Viewer)	11
Figuur 3-4 Informatie Delflandsedijk uit OI2014V4 [Ref 3]	14
Figuur 3-5 Locaties profielen uit Legger HH Delfland en leggerprofiel , zie ook bijlage A4	14
Figuur 3-6 Tracé Blankenburgverbinding (website RWS, www.blankenburgverbinding.nl)	15

Figuur 4-1 Legger HH Delfland met locatie relevant dwarsprofiel	16
Figuur 4-2 Medegebruikvrije profiel situatie 2 Delflandsedijk (links) en toepassing in dwarsprofiel D086	16
Figuur 4-3 Posities windturbines in medegebruikvrije profiel	17
Figuur 5-1 Beschouwd profiel waterkering (indicatieve locatie windturbines)	19
Figuur 5-2 Geologisch lengteprofiel (bron: Dinoloket)	20
Figuur 5-3 Geschematiseerde bodemopbouw WT1	21
Figuur 5-4 Geschematiseerde bodemopbouw WT2	22
Figuur 5-5 Illustratie verloop freatische lijn en stijghoogte tijdens hoogwater situatie	23
Figuur 6-1 Inschatting trillingssnelheden conform Muller (verwachtingswaarden, links) en CUR166 (99% bovengrens, rechts)	26
Figuur 6-2 Verwachte grondversnellingen	27
Figuur 7-1 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen binnentalud met links de Nieuwe Waterweg en rechts het achterland	36
Figuur 7-2 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen buitentalud	39
Figuur 8-1 Trefkans bladbreuk WT1 (boven) en WT2 (onder). Groen=werpafstand bladbreuk bij overtoeren, lichtgroen=werpafstand bladbreuk bij nominaal toeren en oranje=rotor/gondelval	45
Figuur 8-2 Berekende trefkans bladworp als functie van de afstand	46

Bijlagen

A1	Bodemopbouw – gegevens Dinoloket
A2	Geotechnische informatie
A3	Geotechnisch lengteprofiel
A4	Informatie dwarsprofielen
A5	Afleiding hydraulische belastingen
A6	Controle opbarsten
A7	Analyse zettingsvloeiing en inscharing
A8	Resultaten stabiliteitsberekeningen
A9	Bepaling kraterdiepte
A10.1	Inleiding
A10.2	Inschatting kraterdiepte bij neerkomen van de gondel en rotor
A10.3	Inschatting kraterdiepte bij neerkomen van een rotorblad
A10	KPR memo 473 Windturbines op of nabij primaire waterkeringen

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Burgercoöperatie 'De Windvogel' heeft samen met het Vlaardingse Energie Collectief (VEC) het project 'de Windoever' in voorbereiding, hierna te noemen 'Windpark Vlaardingen'. Het windpark beoogt de aanleg van twee windturbines in het Oeverbos te Vlaardingen.

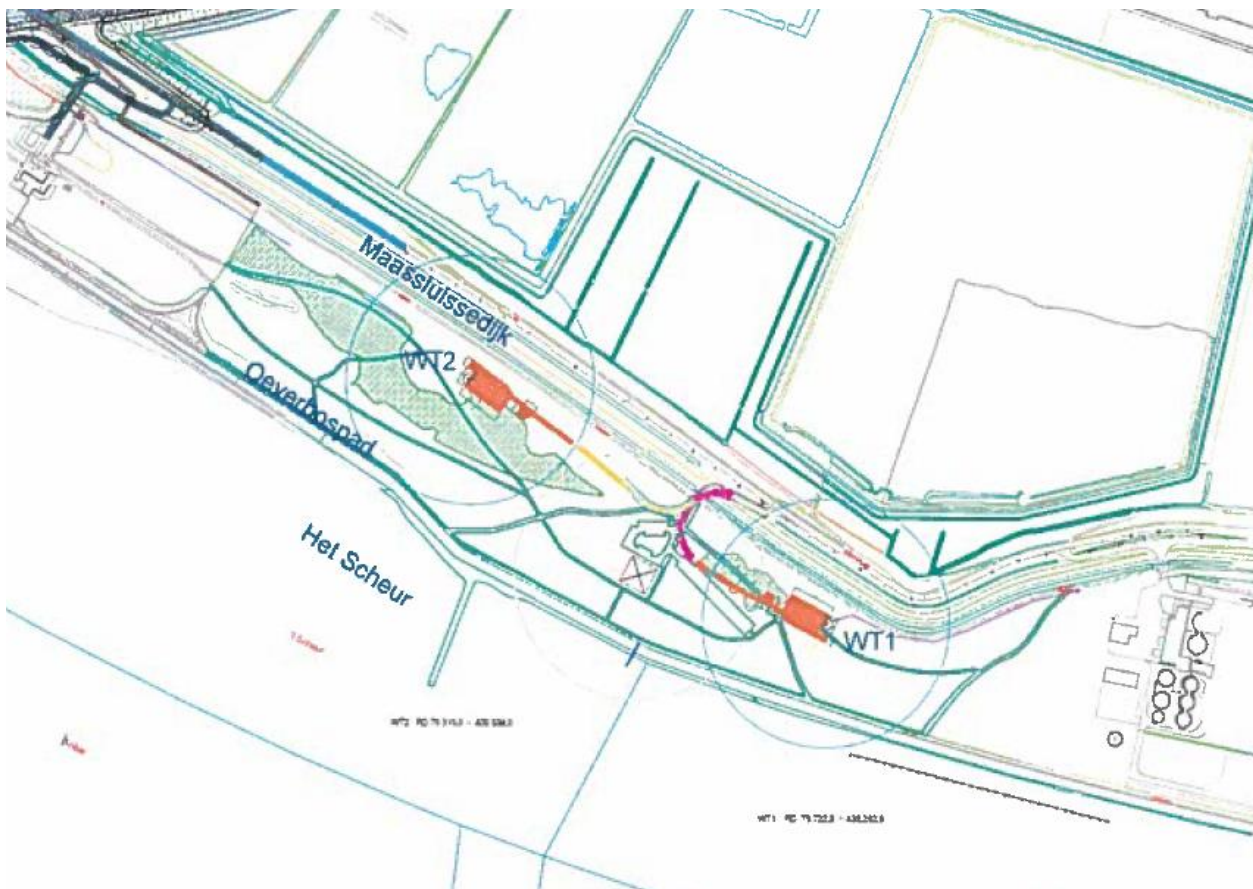
De turbines zijn gepland op het hooggelegen voorland van de Delflandsedijk langs het Scheur (Nieuwe Waterweg). De Delflandsedijk betreft een primaire waterkering welke in beheer is bij het Hoogheemraadschap (HH) Delfland.

De geplande locaties van de turbines zijn weergegeven in Figuur 1-1, met de navolgende coördinaten:

WT 1 RD-coördinaten: X = 79.722,8 Y = 435.262,9

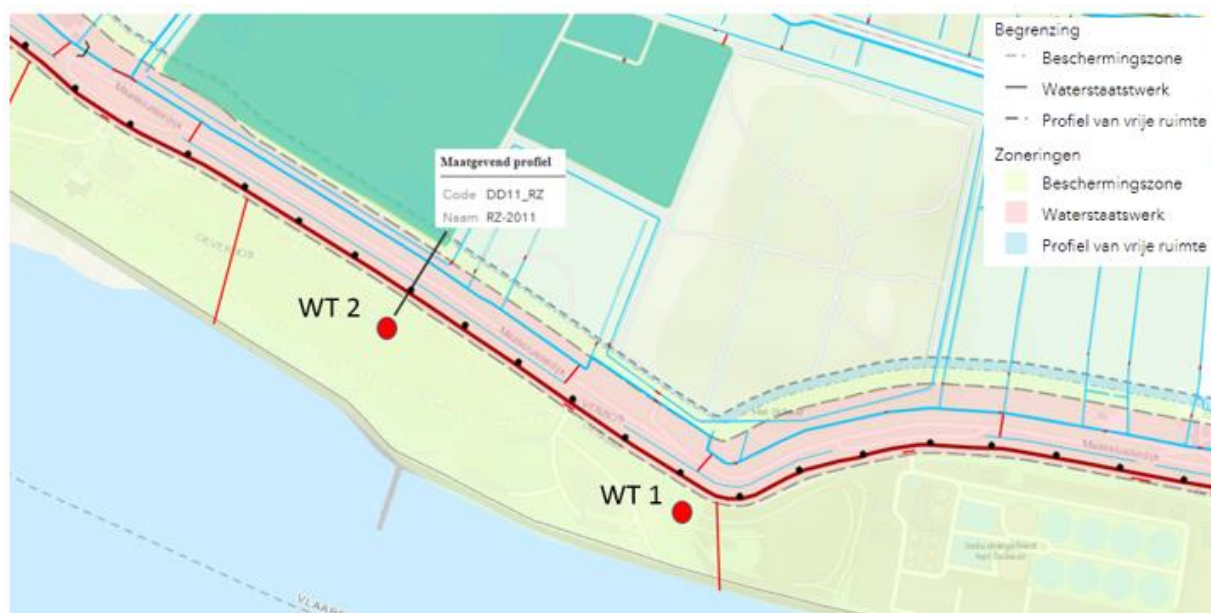
WT 2 RD-coördinaten: X = 79.319,8 Y = 435.534,8

Ten opzichte van voorgenoemde coördinaten is rekening gehouden met 5 m schuifruimte in de richting van de waterkering. Op korte afstand (binnen 5 m) van de windturbines bevindt zich een persleiding.



Figuur 1-1 Geplande locaties windturbines WP Vlaardingen (detail uit tekening De Windvogel)

De navolgende figuur toont de zonering van de waterkering.



Figuur 1-2 Zonering waterkering (bron: Legger HH Delfland)

De bouw, aanwezigheid en verwijdering van de windturbines kan schade berokkenen aan de waterkering. Als dit gebeurt tijdens hoogwater of als zich voorafgaand aan herstel een hoogwater voordoet, dan kan dit leiden tot overstroming.

In het kader van de Waterwet is onderzocht wat de effecten van de windturbines zijn op de waterveiligheid (waterkerende functie van de waterkeringen).

1.2 Doel en afbakening

Vanwege de voorgenomen ligging van WT1 en WT2 in de beschermingszone (zie Figuur 1-2) van de keringen dient conform de beleidsregels van HH Delfland [Ref 13] te worden voldaan aan de volgende eisen:

- Het windpark mag het waterkerend vermogen van de waterkering niet negatief beïnvloeden;
- Het windpark mag de toegankelijkheid en het onderhoud van de waterkering niet belemmeren;
- Het windpark mag niet tot onevenredige kosten leiden voor het beheer van de waterkering.

Het doel van dit rapport is om te analyseren wat de gevolgen zijn van het windpark op alle faalmechanismen die van belang zijn voor de waterveiligheid.

1.3 Kader en aanpak

Kader

In het kader van de Waterwet is onderzocht wat de effecten van de windturbines zijn op de waterveiligheid (waterkerende functie van de waterkeringen). Voor de beoordeling van de kans op schade door een windturbine op of nabij een waterkering worden in dit rapport twee soorten effecten onderscheiden:

1. Ondergrondse effecten van de bouw, gebruik en verwijderen van de windturbine en bijbehorende werken. Tot de ondergrondse effecten behoren o.a.:
 - Trillingen door heien van palen en/of damwanden, welke kunnen leiden tot extra belasting van de kering en verweking/verdichting van de grond;

- Trillingen opgewekt door de windturbine;
 - Belastingtoename door transporten, kranen en materiaalopslag;
 - Afname sterkte door ontgravingen.
2. Bovengrondse effecten bij falen van de windturbine of een onderdeel hiervan tijdens de gebruiksfase. Tot deze effecten behoren schade door:
- Mastbreuk;
 - Gondelval;
 - Bladworp.

Bovenstaande effecten kunnen leiden tot toename van de belasting en/of afname van de sterkte van de waterkering en de persleiding (deze bevindt zich op circa 5 m afstand van de windturbine ter plaatse van het voorland) beschadigen.

Voor de nieuwe situatie wordt in dit rapport de kans op overstroming beoordeeld volgens methoden die aansluiten op het WBI2017 en de OI2014.

Conform het WBI2017 worden windturbines bestempeld als Niet -Waterkerende Objecten (NWO's). Ten aanzien van NWO's wordt binnen het WBI2017 geen faalkansruimte gereserveerd [Ref 2]. Op verzoek van HH Delfland wordt het bezwijken van een windturbine beschouwd als een indirect faalmechanisme. In KPR memo 473 (Windturbines op of nabij primaire waterkeringen [Ref 1] en bijlage A10) is tevens een overzicht gegeven van mogelijke beoordelingsmethodes voor windturbines nabij waterkeringen. HH Delfland heeft aangegeven uit te willen gaan van methode A3:

- De kans op overstroming door een faalmechanisme en het bezwijken van de windturbine moet kleiner zijn dan 1% van de faalkansen voor het betreffende mechanisme op doorsnede niveau.

Bovengenoemde methode is toegepast voor bovengrondse effecten.

Voor ondergrondse effecten is de methode conform optie B gevolgd uit bovengenoemde KPR memo. De waterkering op de bewuste locatie is hierbij beoordeeld zoals een willekeurige andere dijkdoorsnede door de schematisatie van de waterkering af te stemmen op de nieuwe situatie (scenario's). Per te beschouwen direct faalmechanisme is de additionele kans op een overstroming door het beschreven effect (bijvoorbeeld trilling) bepaald. Als uitgangspunt geldt dat deze additionele kans kleiner dan 1% van de norm moet zijn.

Aanpak beoordeling van gevolgen voor waterveiligheid door ondergrondse effecten

De beoordeling richt zich op het effect van trillingen, transportbelastingen en graverij bij aanleg en gebruik van de windturbines. De analyse van de gevolgen door ondergrondse effecten betreft een beoordeling van alle relevante faalmechanismen voor de watering. De beschouwde faalmechanismen zijn:

- Overloop en golfoverslag (HT)¹ in combinatie met doorgaande erosie;
- Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI);
- Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU);
- Micro-instabiliteit (STMI);
- Piping en heave (STPH);
- Instabiliteit van het voorland door afschuiving of zettingsvloeiing (VLAF en VLZV);
- Instabiliteit van de bekleding (STBK).

Voor elk faalmechanisme is eerst bepaald wat de mogelijke effecten van de windturbines zijn op de sterkte en/of de belasting van de waterkering. De effecten zijn geanalyseerd voor alle projectfasen: de

¹ Hoewel 'Overloop en golfoverslag' geen faalmechanisme is wat binnen de WBI wordt beschouwd, is in deze beoordeling wel onderzocht of er effect optreedt op de hoogte van de waterkering. Voor deze situatie is hoogte wel relevant i.v.m. mogelijke kruinverlaging door falen windturbine.

bouw-, gebruiks- en verwijderingsfase. Deze eerste stap betreft een grove en eenvoudige (kwalitatieve) beoordeling. Als hieruit blijkt dat de bijdrage van de windturbine aan de overstromingskans verwaarloosbaar klein is, dan blijft een gedetailleerde berekening achterwege.

In de tweede stap wordt voor de relevante faalmechanismen een gedetailleerde beoordeling uitgevoerd overeenkomstig het WBI2017 en OI2014 [Ref 3], waarbij analytisch verschillende scenario's worden beschouwd.

Voor de analytische beoordeling van de binnen- en buitenwaartse macrostabiliteit is gebruik gemaakt van het rekenprogramma D-GeoStability (versie 18.1) van Deltares.

Per te beschouwen direct faalmechanisme van de waterkering is de additionele kans op een overstroming door het beschreven effect (bijvoorbeeld trilling) bepaald. Als uitgangspunt geldt dat deze additionele kans kleiner dan 1% van de normsituatie moet zijn. Indien er sprake is van een significant negatief effect, zijn maatregelen voorgesteld, waarmee de negatieve effecten verholpen of voorkomen kunnen worden. Voor de maatregelen worden principeoplossingen beschreven.

Opgemerkt wordt dat voor de beoordeling van de ondergrondse effecten met name de gebruiksfase van belang is. Voor de bouw- en verwijderingsfase kunnen randvoorwaarden worden gesteld, zodat een eventuele calamiteit geen gevaar voor overstromen oplevert.

Aanpak beoordeling van gevolgen voor waterveiligheid door bovengrondse effecten bij falen van een windturbine

De beoordeling richt zich op de volgende faalscenario's overeenkomstig het Handboek Risicozonering Windturbines (RVO, 2014):

1. Het omvallen van de mast, inclusief gondelhuis en rotor;
2. Het neerkomen van het gondelhuis met de rotor;
3. Bladbreuk of het afbreken van delen van een rotorblad.

In de beoordeling zijn de volgende stappen doorlopen:

- Vaststellen faalfrequentie per faalscenario voor de windturbine;
- Vaststellen kritische strook waterkering, waarbinnen het neerkomen van een windturbine, of een onderdeel hiervan, kan leiden tot falen van de waterkering of persleiding (welke indirect kan leiden tot falen van de waterkering);
- Vaststellen raakfrequentie (faalfrequentie x trefkans) per turbine en per faalscenario aan de hand van trefkansberekeningen;
- Inschatting van de te verwachten schade (kraterdiepte) aan de waterkering (bepalen restprofiel van de waterkering) en persleiding bij neerkomen van de windturbine of een windturbineonderdeel;
- Bepalen kans op falen restprofiel (na verlaging kruinhoogte) tijdens de herstelperiode;
- Berekenen additionele faalfrequentie per scenario op basis van de faalfrequenties voor het falen van de windturbine, de totale raakfrequenties en de kans op falen van de kering tijdens reparatie.

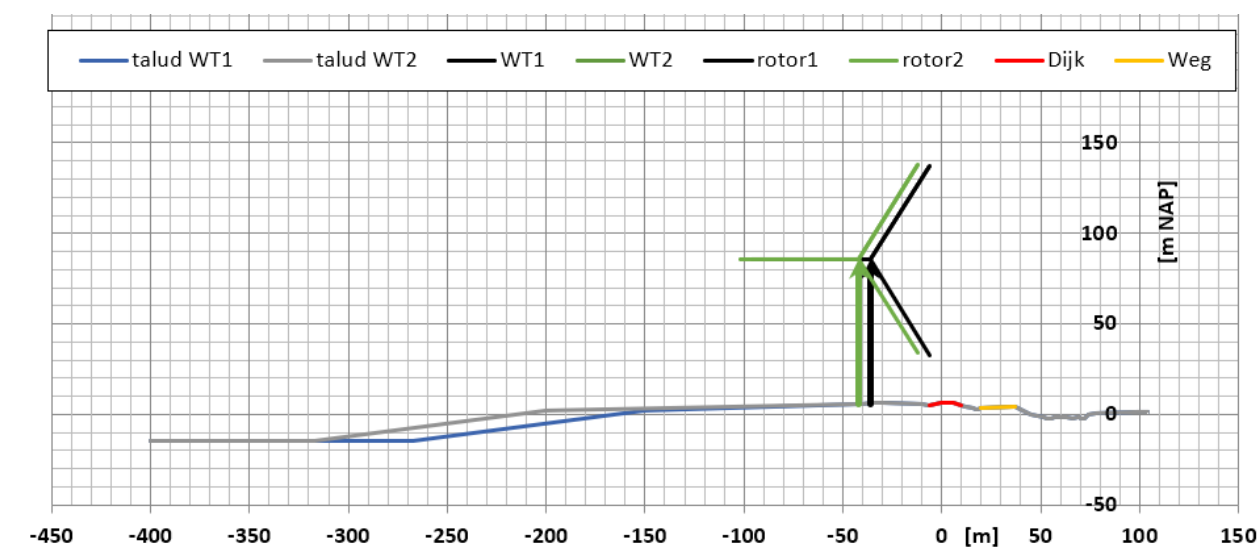
In de beoordeling zijn alle (directe) mechanismen die kunnen volgen op het bezwijken van een windturbine samengenomen en behandeld als één (direct) faalmechanisme. Dit betekent dat een overschrijding van het faalkansbudget met 1% als verwaarloosbaar klein wordt gezien, conform paragraaf 3.7 uit [Ref 15].

De additionele faalfrequentie is per windturbine berekend en getoetst aan de toegestane faalkanstoename op doorsnedeniveau (met factor $N=10$ om zodoende rekening te houden met al aanwezige en/of toekomstige NWO's). De factor $N=10$ is gekozen op basis van ervaringen bij eerdere projecten en in overleg met HH Delfland. Vanuit de beheerder geldt dat het niet aannemelijk is dat (heel) veel meer NWO's worden toegevoegd in 25 jaar.

2 Samenvatting

De twee geplande windturbines van Windpark Vlaardingen zijn voorzien in de beschermingszone van de primaire waterkering van dijktraject 14-3 (Delflandsedijk).

In dit rapport zijn de ondergrondse effecten en de bovengrondse effecten van het windpark op de waterveiligheid beoordeeld. Aangetoond is dat de waterkerende functie gewaarborgd blijft tijdens de bouw, het gebruik en het verwijderen van het park mits bepaalde maatregelen worden genomen. In onderstaande figuur is de locatie van de windturbines in het dwarsprofiel weergegeven.



Figuur 2-1 Locatie windturbines in dwarsprofiel

Ondergrondse effecten

De invloed van de ondergrondse effecten van een windturbine is beoordeeld. De samenvatting van de faalkansbijdrage per faalmechanisme van de waterkering is opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 2-1 Samenvatting faalkansbijdrage per faalmechanisme waterkering (ondergrondse effecten)

Locatie	Faaloorzaak	Faalscenario		Faalkansbijdrage per faalmechanisme [%]						
				HT	STBI	STBU	STPH	BK	ZVL ¹⁾	som
WT1	Trillingen	bouw	dagelijks	nihil	<<	<<	n.r.	n.r.	1,26·10 ⁻⁵	<<
		gebruik	dagelijks		<<	<<	n.r.	n.r.		<<
			Extreem-draaiend		0,00025	<<	n.r.	n.r.		0,00026
			Extreem-stilstaand		0,00066	<<	n.r.	n.r.		0,00067
			Extreem-noodstop		0,00213	<<	n.r.	n.r.		0,00214
		sloop	dagelijks		<<	<<	n.r.	n.r.		<<
	Graverij	bouw	dagelijks	<<	n.r.	<<	<<	<<	n.r.	<<
WT2	Trillingen	bouw	dagelijks	nihil	0,07349	<<	n.r.	n.r.	0	0,07349
		gebruik	dagelijks		0,01676	<<	n.r.	n.r.		0,01676
			Extreem-draaiend		0,37115	<<	n.r.	n.r.		0,37115
			Extreem-stilstaand		0,57456	<<	n.r.	n.r.		0,57456
			Extreem-noodstop		0,86991	<<	n.r.	n.r.		0,86991
		sloop	dagelijks		0,14478	<<	n.r.	n.r.		0,14478
	graverij	bouw	dagelijks	<<	n.r.	<<	<<	<<	n.r.	<<

n.r. = niet relevant

¹⁾ kansbijdrage indien wordt uitgegaan van zettingsvloeiingsgevoelige zandlagen over gehele talud (zeer conservatief, hier niet het geval, slechts 4 m zand en voldoende veiligheid tegen verweking).

De effecten op de mechanismen 'overlopen' en 'golfoverslag' (hoogte) zijn beoordeeld en zijn verwaarloosbaar, mits de uitvoering van eventueel aan te leggen kabels in de waterkering zorgvuldig wordt verricht met herstel van de profielopbouw en grasbekleding. Een eventuele toekomstige verhoging/verbreding van de waterkering is door de aanwezigheid van de windturbines niet belemmerd.

De effecten op de 'macrostabiliteit binnenwaarts' zijn gedetailleerd beoordeeld en zijn beperkt. Uit de analyses blijkt dat de aanwezigheid van het windpark leidt tot een additionele faalkansbijdrage per situatie van maximaal 0,87%. De additionele faalkans van de windturbines is minder dan 1% en voldoet daarmee aan de eis.

De effecten op de 'macrostabiliteit buitenwaarts' zijn beoordeeld en zijn zeer gering. De additionele faalkans van de windturbines is (veel) minder dan 1% en voldoet daarmee aan de eis.

De effecten op het mechanisme piping zijn beoordeeld. De plaatsing en aanwezigheid van de windturbines heeft geen effecten, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw'.

De effecten op de bekleding zijn beoordeeld en verwaarloosbaar, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw' en het realiseren van een erosiebestendige bekleding.

De effecten op de stabiliteit van het voorland zijn beoordeeld en zeer beperkt. De kans op overschrijding van de toelaatbare inschарingslengte is zeer klein en voldoet aan de eis.

Door uitvoering onder dagelijkse omstandigheden en met monitoring van vervormingen, trillingen en wateroverspanningen worden de negatieve effecten tijdens de uitvoering acceptabel geacht. .

Bovengrondse effecten

De invloed van de bovengrondse faalincidenten van een windturbine is beoordeeld als bijdrage aan de autonome normfrequentie van de waterkering.

De volgende scenario's zijn beschouwd:

- Mastbreuk (inclusief gondel/rotor)
- Neerstorten van de gondel en/of de rotor
- Baldbreuk bij nominaal toerental en overtoeren (2x nominaal)

De resultaten van de analyse zijn samengevat in onderstaande tabellen.

Tabel 2-2 Faalfrequentie waterkering - waterstaatswerk

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	0 ¹⁾	0 ²⁾	$5,1 \cdot 10^{-11}$	[1\]
2	0 ¹⁾	0 ²⁾	$5,8 \cdot 10^{-11}$	[1\]

1) wel geraakt maar geen kans op overstromen tijdens herstelperiode

2) wordt niet geraakt door gondel

Tabel 2-3 Faalfrequenties waterkering – beschermingszone - binnen

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	0 ¹⁾	0 ²⁾	0 ²⁾	[1\]
2	0 ¹⁾	0 ²⁾	0 ²⁾	[1\]

1) wel geraakt maar geen kans op overstromen tijdens herstelperiode

2) wordt niet geraakt door gondel/mast

Tabel 2-4 Faalfrequentie waterkering – beschermingszone - buiten

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	0 ¹⁾	$4,2 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	[1\]
2	0 ¹⁾	$4,2 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	[1\]

1) wel geraakt maar geen kans op overstromen tijdens herstelperiode

Aangetoond is dat de faalkansbijdrage niet groter is dan 1% van de norm op doorsnedeniveau. Het maatgevende faalscenario is mastbreuk, waarbij de mast op de waterkering terecht komt.

In de beoordeling is uitgegaan van conservatieve uitgangspunten. Zo zijn de faalfrequenties, waarop de berekeningen zijn gebaseerd, conservatief en representatief voor oudere windturbintypes. De incidenten waarop de faalfrequenties zijn gebaseerd gaan tot 2007, waardoor de veiligheidsverbeteringen van de afgelopen 11 jaar niet zijn meegenomen. Door verbeteringen van het veiligheidssysteem en verbeterde technologie en kwaliteitscontrole zijn de huidige generatie windturbines veiliger geworden.

Bij het neerkomen van een rotorblad is een kraterdiepte te verwachten van ca. 1,1 m (bovengrenswaarde) bij nominaal toeren en een kraterdiepte van ca. 1,6 m (bovengrenswaarde) bij overtoeren. Bij mastbeuk bedraagt de bovengrenswaarde van de kraterdiepte ca. 2,6 m.

Door de krater en de gevolgen daarvan kan ter plaatse van de persleiding een plastische zone of een verwekingszone in de grond ontstaan die de waterkering kan ondermijnen. Na falen van de windturbine of een onderdeel daarvan, dient de persleiding geïnspecteerd te worden op beschadigen en waar nodig te worden hersteld. Het optreden van lekkage dient uitgesloten te worden.

Samenvattend totaal overzicht faalkansen

In onderstaande tabel is voor de relevante faalmechanismen een overzicht opgenomen van de faalkansen van de waterkering met en zonder windturbines.

Tabel 2-5 Faalkans waterkering – per doorsnede

doorsnede	situatie	Huidige faalkans		Faalkans met windturbine		Kans op falen tijdens herstel	
		STBI	STBU	STBI	STBU	Mastbreuk/ gondelval	Bladworp
WT1	Dagelijks	$8,40 \cdot 10^{-18}$	$9,20 \cdot 10^{-122}$	$3,37 \cdot 10^{-17}$	$1,22 \cdot 10^{-116}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$ (herstelperiode 14 dagen)	0 (wel geraakt maar geen kans op overstormen tijdens herstel)
	Extreem	$2,26 \cdot 10^{-13}$	$9,80 \cdot 10^{-60}$	$7,18 \cdot 10^{-12}$	$8,72 \cdot 10^{-50}$		
WT2	Dagelijks	$7,60 \cdot 10^{-11}$	$1,05 \cdot 10^{-67}$	$5,64 \cdot 10^{-11}$	$2,64 \cdot 10^{-64}$		
	Extreem	$1,58 \cdot 10^{-9}$	$3,70 \cdot 10^{-31}$	$2,93 \cdot 10^{-9}$	$4,35 \cdot 10^{-26}$		

Overige aspecten

Een instabiel voorland (zettingvloeiing) heeft geen effect op de fundering van de windmolen omdat de windmolens zich ver buiten de inscharingslengte bevinden.

Bij het funderingsontwerp dient rekening gehouden met:

- aantasting van het materiaal (bijvoorbeeld het beton van het funderingsblok) door zout/brak water (er zijn periodes waarin het voorland onder water kan komen te staan);
- mogelijke erosie rondom het funderingsblok. Geadviseerd wordt derhalve om in het funderingsontwerp geen horizontale steundruk te rekenen over de bovenste 0,5 m van de fundering.

Aanbevelingen:

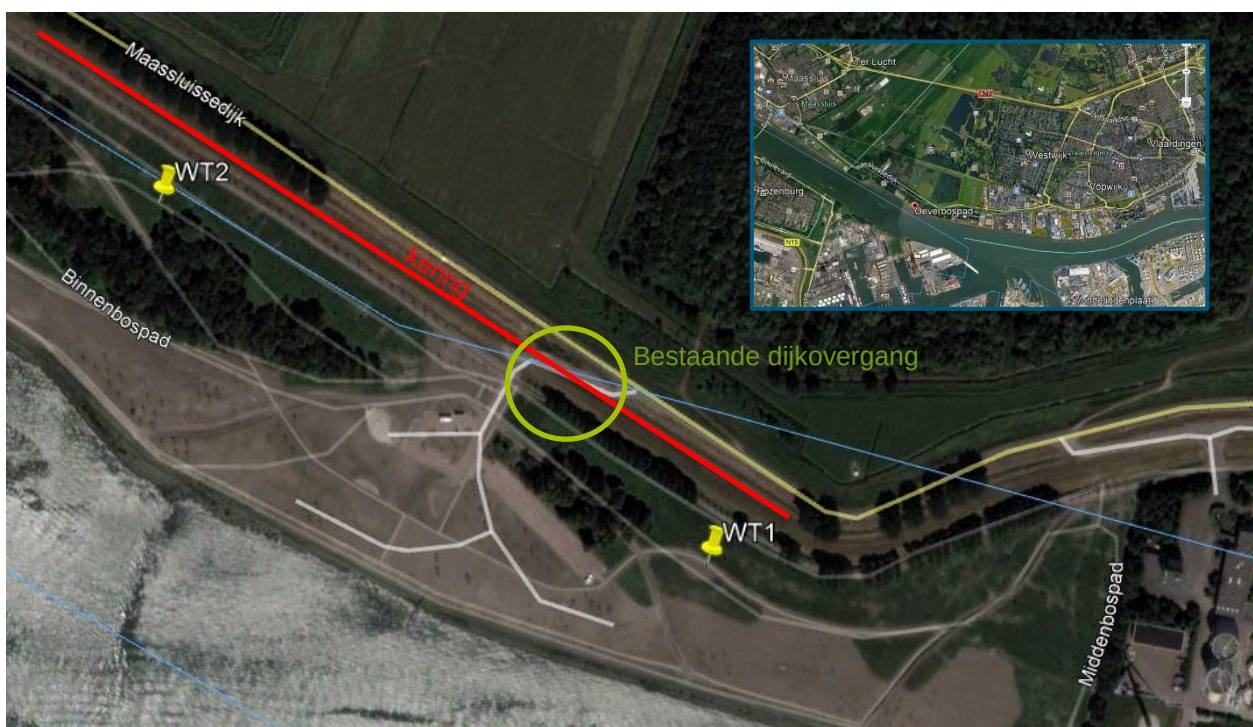
- Voor de uitvoering van de bekabeling wordt aanbevolen om de 'oorspronkelijke bodemopbouw' te herstellen (erosiebestendig);
- Monitoring van trillingen:
Opgemerkt wordt dat de werkelijk optredende trillingen onzeker zijn en kunnen afwijken van de in deze studie aangehouden waarden. Aanbevolen wordt om in de definitieve ontwerp- en planningsfase een monitoringsplan op te stellen, waarin de trillingen ter plaatse van het fundament en het talud worden gemeten. De metingen dienen te worden verricht voorafgaand aan de bouw (nulmeting), tijdens de bouw en tijdens de exploitatie. Hierbij kunnen tevens metingen van de wateroverspanning worden uitgevoerd.
- Monitoring effect lange duur trillingen
Op dit moment wordt bij een ander windturbine project een onderzoek naar het effect van lange duur trillingen op de eigenschappen van de ondergrond uitgevoerd. Met behulp van controle

sonderingen worden de eigenschappen van de grond op verschillende momenten gecontroleerd. Doel van het onderzoek is de onzekerheid hierover weg te nemen. Geadviseerd wordt ook in dit project een 3-tal controlesonderingen uit te voeren nabij de funderingen van de windturbines. Door op verschillende momenten te meten kan het eventuele effect van de trillingen op lange termijn in beeld worden gebracht. Geadviseerd wordt dit op te nemen in het monitoringsplan in de volgende fase.

3 Projectomschrijving

3.1 Projectlocatie

Het plan voor Windpark Vlaardingen betreft de aanleg van 2 windturbines langs Het Scheur in het Oeverbos te Vlaardingen. Windturbines WT1 en WT2 zijn voorzien aan de noordzijde van de Nieuwe Waterweg (zie Figuur 3-1). De weg (Maassluissedijk) ligt parallel aan de dijk, ten noorden hiervan (achterland).



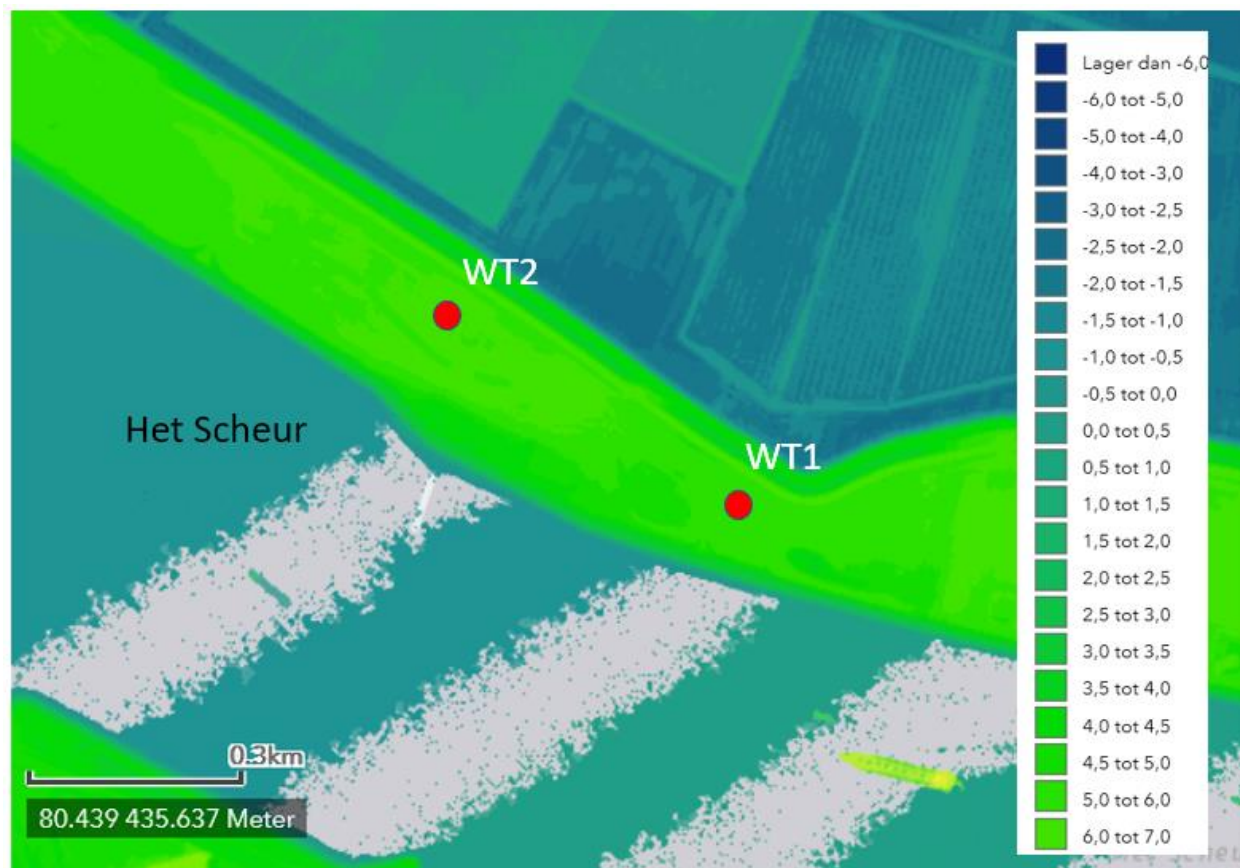
Figuur 3-1 Geplande locaties WT1 en WT2 ten noorden van het Scheur (bron: Google Earth)

WT1 is gepland in het voorland op ca. 36 m uit de kruin van de waterkering, en WT2 op ca. 42 m. Er bevinden zich geen andere windturbines in de nabijheid.



Figuur 3-2 Zicht op de dijk en de dijkovergang vanaf de Maassluissedijk tussen Vlaardingen en Maassluis (bron: Google Earth)

Het terrein is momenteel bebost. De hoogte varieert van ca. NAP+6,0m ter plaatse van WT2 tot ca. NAP+5,5m ter plaatse van WT1.



Figuur 3-3 Hoogtegegevens (AHN Viewer)

In het voorland nabij de dijk bevindt zich een rioolpersleiding. De posities van de windturbines, ten zuiden van de leiding, zijn dusdanig bepaald dat de funderingen buiten de rioolpersleiding blijven. Eventueel verschuiven van de windturbine -indien de resultaten daartoe aanleiding geven – in de richting van de waterkering is daarom geen optie. Verschuiven parallel aan de waterkering is wel mogelijk, maar heeft geen effect op de resultaten van deze beoordeling.

3.2 Windparkonderdelen

Voor de beoordeling van de effecten op de waterveiligheid van de waterkering wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende onderdelen:

- Windturbine en fundatie;
- Civiele werken: kraanopstelplaats en toegangswegen;
- Elektrische werken: windparkbekabeling.

Windturbine en fundatie

Op dit moment staat het toe te passen type windturbine nog niet vast. De huidige keuzes zijn een Vestas V120 met 80 meter ashoogte of een V117 met eenzelfde ashoogte.

Gegevens zijn opgevraagd ten aanzien van de voorgenoemde windturbines. In de effectbeoordeling is uitgegaan van de maatgevende turbine V120 met onderstaande kenmerken (zie Tabel 3-1). Indien gekozen wordt voor een ander type, dan dient te worden nagegaan of de lengte van de rotorbladen gelijk (of korter) is en of de turbineonderdelen een gelijk (of geringer) gewicht hebben.

Er wordt vanuit gegaan dat de fundering zal bestaan uit een ronde funderingsplaat, gefundeerd op grondverdringende palen. De afmetingen van de fundering dienen nog ontworpen (DO fase) te worden na keuze van het type windturbine. De diameter van een fundering varieert veelal tussen de 15 en 21 m. De globale plaatdikte is veelal circa 1,5 m aan de rand en circa 3 m in het midden (dit deel steekt mogelijk 1 m boven maaiveld uit).

Voor de effectbeoordeling wordt uitgegaan van een ontgraving tot 3 m diepte en een diameter 21 m op ontgravingsniveau. Belasting door het heien van palen is nader beschouwd in paragraaf 6.1.

Zodra de definitieve toe te passen windturbine is gekozen en de afmetingen van de fundatie bekend zijn, dient door de initiatiefnemer in de definitieve ontwerpfase te worden geverifieerd of deze vallen binnen de aangehouden afmetingen/gewichten.

Tabel 3-1 Kenmerken windturbine

Onderdeel	Input
Type:	Vestas V120
Nominaal vermogen	2,35 MW
Gerealiseerde IEC klasse	IEC 2
Ashoogte (hoogte rotatiepunt)	81 m
Rotordiameter	120 m
Nominaal toerental	13,6 toeren/min
Maximale lengte van de gondel	10,4 m
Hoogte van de gondel	5,4 m
Breedte van de gondel	3,5 m
Bladzwaartepunt	20,0 m
Oppervlak afgebroken blad	168 m ²
Lengte afgebroken blad	59,0 m
Diameter van de toren	4,0 m
Gewicht gondel	70 ton
Gewicht rotornaaf met bladen	56 ton ¹
Gewicht complete gondel met rotornaaf en bladen	126 ton

Kraanopstelplaats

Naast elke windturbine zal een kraanopstelplaats worden gerealiseerd, zie rode vlakken in Figuur 1-1. De afmetingen hiervan zijn 20x40 m².

De kraanopstelplaatsen dienen geschikt te zijn voor belastingen door rupsbanden of kraanstempels. De rekenwaarde van de maximale funderingsdruk bedraagt veelal 250 kPa (na spreiding door schotten). De fundering van de kraanopstelplaatsen is in deze fase nog niet uitgewerkt en zal in de ontwerpfase nader gedetailleerd worden. Gangbaar is een fundering bestaande uit een laag menggranulaat (0,5 à 1,5 m dikte, afhankelijk van de sterkte van de ondergrond). Meerdere lagen geogrids kunnen worden aangebracht om de laagdikte te minimaliseren.

Voor de effectbeoordeling wordt uitgegaan van een 1 m diepe ontgraving voor de aanleg van de fundering.

Toegangswegen

Transport naar en van de windturbinelocaties zal voor een deel plaatsvinden via de bestaande verhardingen, o.a. via de Maassluisdijk. Daarnaast zal worden aangesloten op de bestaande dijkovergang naar de weg. In Figuur 1-1 zijn de voorgenomen toegangswegen naar de locaties aangegeven. De wegverharding voor de nieuwe wegen bestaat doorgaans uit een laag menggranulaat van circa 400 mm op een laag geogrid. Er vinden in principe geen transporten in de lengterichting op de waterkering plaats in de bouwfase, alleen dwars over de kering bij de bestaande overgang, zie Figuur 1-1. Voor de effectbeoordeling is een extra profiel ter plaatse van de overgang beschouwd.

Windparkbekabeling

Voor de aansluiting van de windturbines zullen kabels worden aangelegd. De ligging van de bekabeling is op dit moment nog niet vastgesteld. Dit wordt veelal pas kort voor de realisatie uitgewerkt. In deze beoordeling zijn algemene aandachtspunten en voorwaarden opgenomen ten aanzien van de aanleg van kabels en leidingen nabij de waterkering. De beoordeling van eventuele effecten dient door de initiatiefnemer in de definitieve ontwerpfase te worden uitgevoerd.

3.3 Projectfasering

In de beoordeling van de invloed van de windparkonderdelen op de functionaliteit van de waterkering zijn de volgende fasen onderscheiden:

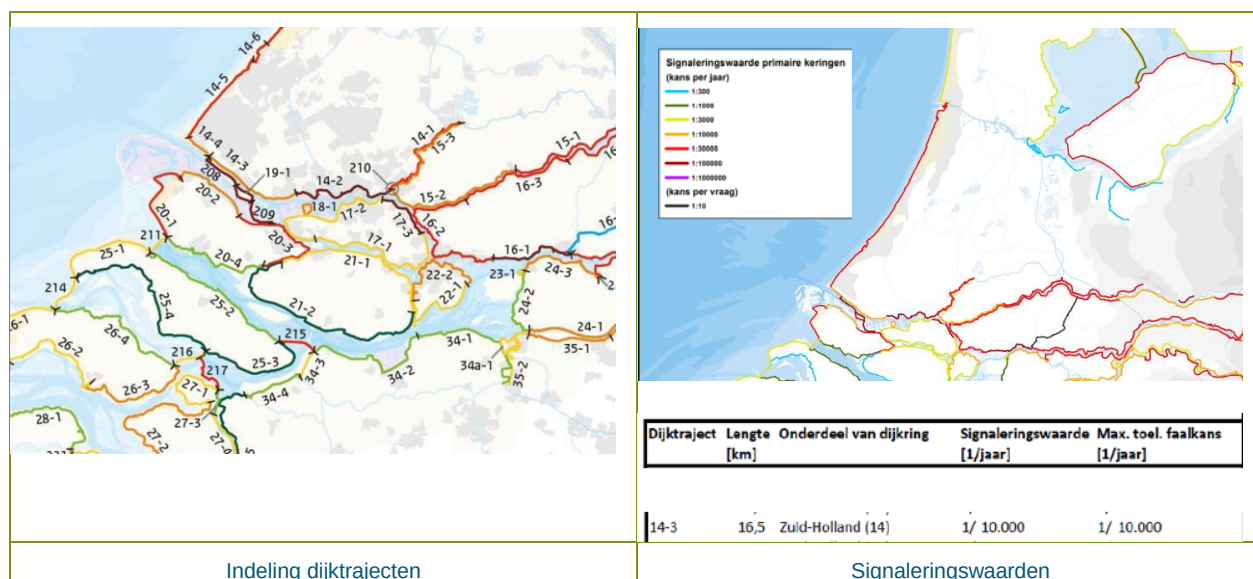
- *Bouwfase*: deze fase betreft de realisatie van alle windparkonderdelen, waaronder het ontgraven ten behoeve van de fundering, het inbrengen van de palen, storten van beton en ontgravingen ten behoeve van de bekabeling;
- *Gebruiksfase*: het operationeel zijn van alle windparkonderdelen. De beoogde planperiode bedraagt 25 jaar;
- *Verwijderingsfase*: deze fase betreft het na de gebruiksfase, deels of volledig, verwijderen van de windparkonderdelen. Bij de verwijdering van de windturbinefundering is ervan uitgegaan dat de paalfundering gehandhaafd blijft.

3.4 Waterkering

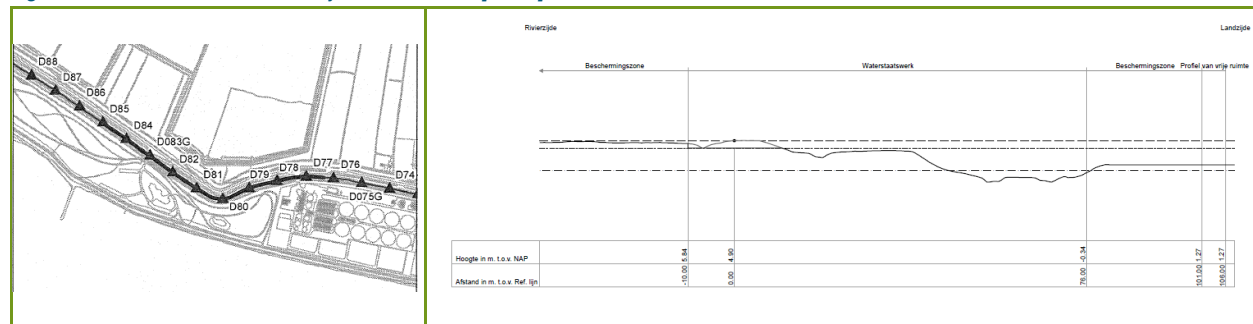
De kenmerken van de te beschouwen waterkering zijn in onderstaande tabel (Tabel 3-2) opgenomen.

Tabel 3-2 Kenmerken van te beschouwen waterkering

Onderdeel	WT1 & WT2
Dijkbeheerder	HHR Delfland
Dijkkring	14 Zuid-Holland
Dijktraject	14-3
Lengte dijktraject	16,5 km
Dijkpaal (Hm) nabij windturbine	D80-D86
Dijkvak	Delflandsedijk
Doorsnede (legger/toetsing)	Dwarsprofiel D86 (bladnr D11, naam RZ 2011)
Signaleringswaarde (normfrequentie)	1/10.000 per jaar
Maximaal Toelaatbare Kans (MTK)	1/10.000 per jaar



Figuur 3-4 Informatie Delflandsedijk uit OI2014V4 [Ref 3]



Figuur 3-5 Locaties profielen uit Legger HH Delfland en leggerprofiel, zie ook bijlage A4

3.5 Blankenburgverbinding

De Blankenburgverbinding verbindt de A20 bij Vlaardingen (noordoever) en de A15 bij Rozenburg (zuidoever) met elkaar middels een nieuwe snelweg, de A24. De nieuwe rijksweg wordt naar verwachting in 2024 opengesteld. De nieuw aan te leggen tunnel onder het Scheur, de Maasdeltatunnel of Blankenburgtunnel, zie onderstaande Figuur 3-6, bevindt zich in de omgeving van de nieuwe windturbines.

De tunnel bevindt zich op ruim 500 m van WT2 en op 1000 m van WT1. Er wordt geen effect van de tunnel op de windturbines of andersom verwacht.

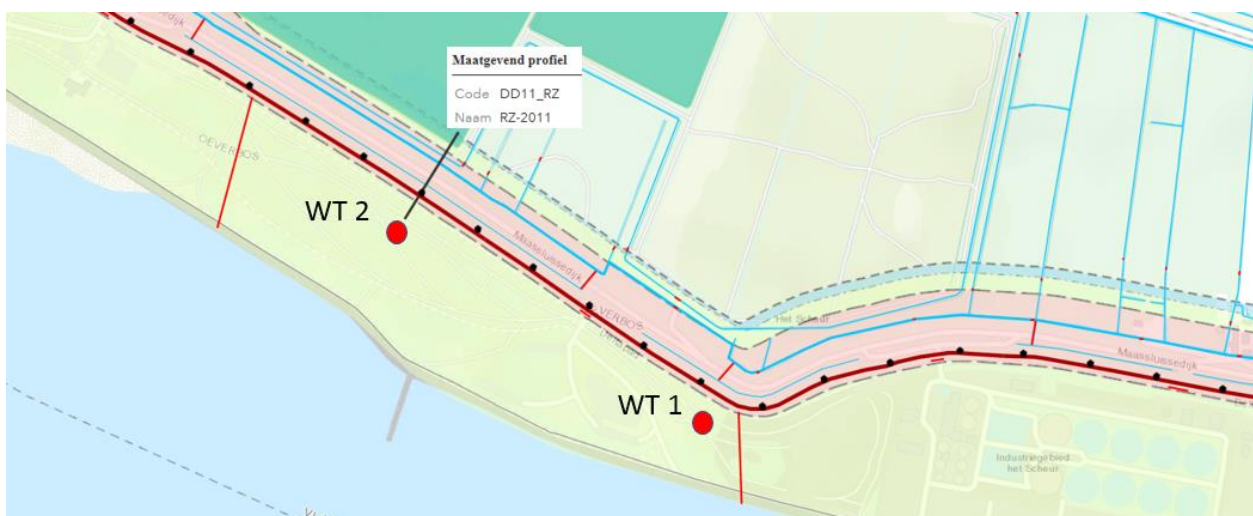


Figuur 3-6 Tracé Blankenburgverbinding (website RWS, www.blankenburgverbinding.nl)

4 Eisen voor de waterkering

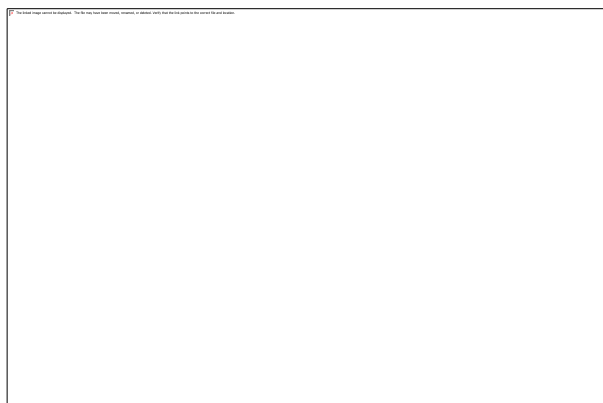
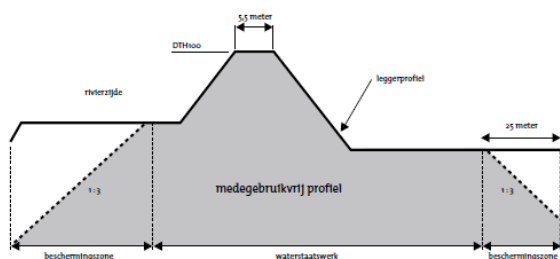
4.1 Zonering waterkering

Onderstaande figuur is overgenomen uit de Legger van HH Delfland. Hierop zijn de kern- en beschermingszone van de waterkering aangegeven en de locaties van de dwarsprofielen. WT1 en WT2 vallen binnen de beschermingszone van de keringen. Dwarsprofiel D86 (DD11-RZ/RZ-2011) is gebruikt voor beide windturbines.



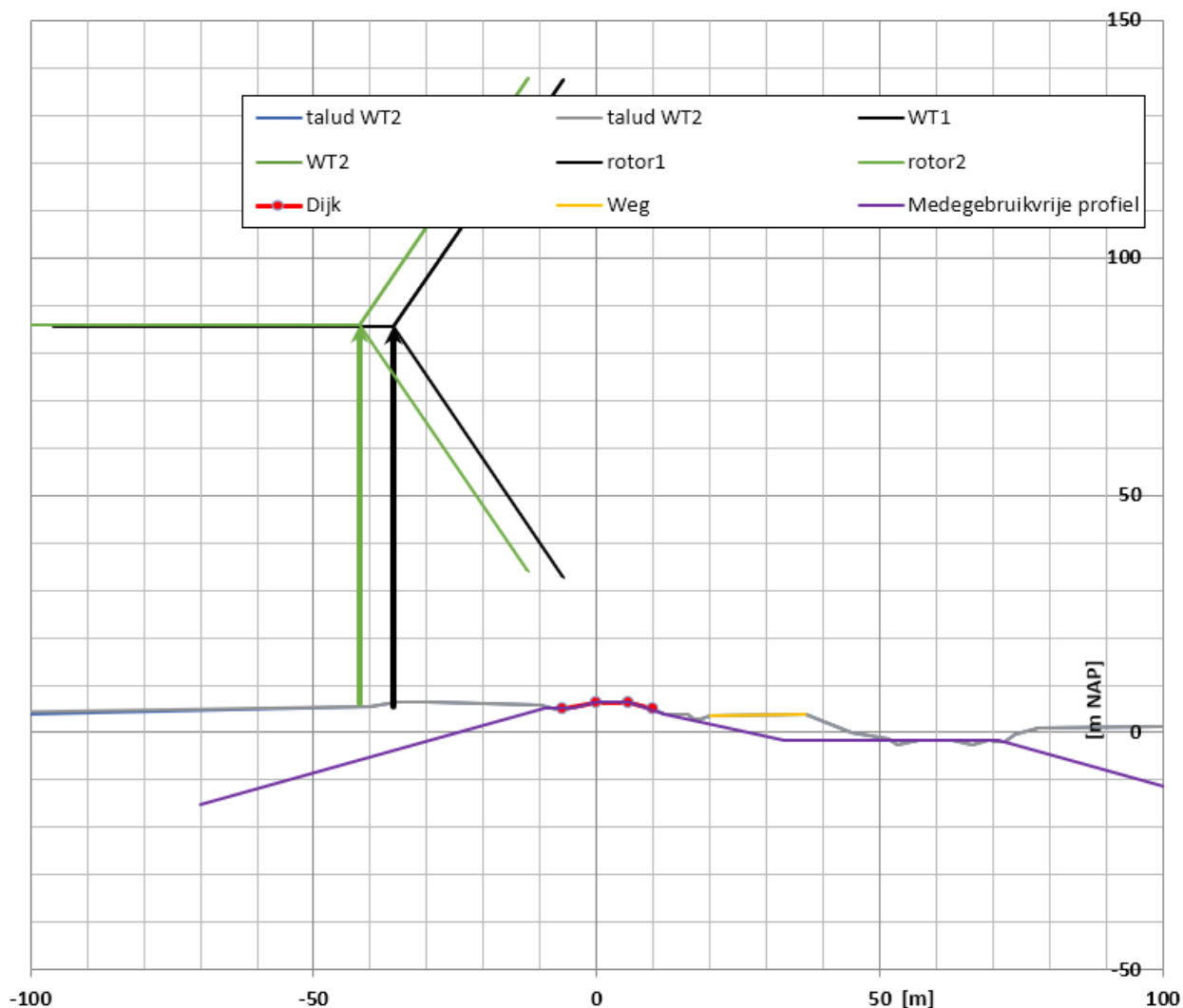
Figuur 4-1 Legger HH Delfland met locatie relevant dwarsprofiel

Bij de beoordeling van medegebruik in de leggerzonering wordt gebruik gemaakt van het 'medegebruikvrij' profiel (zie [Ref 13]). Dit is het profiel dat minimaal nodig is om het waterkerende vermogen van de toekomstige kering te kunnen zekeren, de kering te kunnen onderhouden en in de toekomst te kunnen verzwaren. Langs de Delflandsedijk is door Delfland onderscheid gemaakt in 3 situaties: de zeedijk, het westelijk deel van de rivierdijk en het oostelijk deel van de rivierdijk. De te beschouwen projectlocatie valt in de categorie behorend bij situatie 2: het huidige leggerprofiel is voor de komende 100 jaar voldoende ruim gedimensioneerd. Het bovengrondse deel van het medegebruikvrije profiel valt samen met het huidige legger profiel, zie onderstaande figuur. Ondergronds wordt een lijn van 1:3 aangehouden, vanaf de grens van het waterstaatswerk tot aan de oeverbescherming.



Figuur 4-2 Medegebruikvrije profiel situatie 2 Delflandsedijk (links) en toepassing in dwarsprofiel D086

In Figuur 4-3 is de positie van de toekomstige windturbines aangegeven ten opzichte van het bestaande profiel en het medegebruiksvrije profiel. De windturbines zijn voorzien buiten het gedefinieerde profiel. Bij diepe paalfunderingen is het mogelijk dat de palen het profiel wel doorsnijden. Dit is bij een grondverdringend systeem toegestaan.



Figuur 4-3 Posities windturbines in medegebruiksvrij profiel

4.2 Normspecificatie

De normspecificatie voor de primaire waterkeringen, uitgedrukt in een overstromingskans per dijktraject, is conform [Ref 3] vastgesteld op 1:10.000 per jaar (signaleringswaarde), zie ook Tabel 3-2. De Maximaal Toelaatbare Kans (MTK) is in dit geval ook 1:10.000 per jaar.

4.3 Eisen ten aanzien van veiligheid

Voor de waterkering gelden de volgende eisen:

- Plaatsing van windturbines in de kern- en de beschermingszone van de primaire waterkering wordt slechts toegestaan mits dit geen noemenswaardige negatieve gevolgen heeft voor de waterkerende functie van de primaire waterkering;
- De veiligheid van de waterkering dient gewaarborgd te zijn bij de in paragraaf 4.2 genoemde norm;
- De ontwerplevensduur voor de windturbines is vastgesteld op 25 jaar. Dit betekent dat de invloed van de windturbine gedurende deze periode niet significant dient te zijn;
- Vanuit de beleidsregels [Ref 13] geldt daarnaast:
 - Werken in de beschermingszone zijn toegestaan indien het medegebruikvrije profiel niet wordt doorsnede (zie Figuur 4-2);
 - In de beschermingszone aan de rivierzijde mag het maaiveld niet worden verlaagd.

4.4 Eisen ten aanzien van robuustheid

Ten aanzien van de robuustheid (toekomstvastheid) gelden de volgende eisen:

- Uitgangspunt is dat een ontwerpwaterstand moet worden aangehouden die verwacht wordt aan het einde van de technische levensduur van 25 jaar. Dit is verder uitgewerkt in paragraaf 5.6;
- Constructies inclusief funderingen mogen het profiel van vrije ruimte (ookwel medegebruikvrije profiel) en de waterkering niet doorsnijden. Bovenop het profiel van vrije ruimte zijn zij wel toegestaan. Paalfundaties van bouwwerken mogen buiten de kernzone het profiel van vrije ruimte wel doorsnijden, mits een grondverdringend paalsysteem wordt toegepast.

4.5 Eisen ten aanzien van beheer en onderhoud

Voor de waterkering gelden de volgende eisen:

- Werken mogen niet belemmerend zijn voor de inspectie, de monitoring of het beheer en onderhoud van de waterkering;
- Het uitvoeren van het onderhoud van de kering moet op een doelmatige wijze mogelijk blijven;
- Het gebruik van de waterkering mag niet ten koste gaan van de kwaliteit van de grasmat en/of overige bekledingstypen;
- Werken mogen de toekomstige dijkversterking niet significant belemmeren.

5 Uitgangspunten en randvoorwaarden

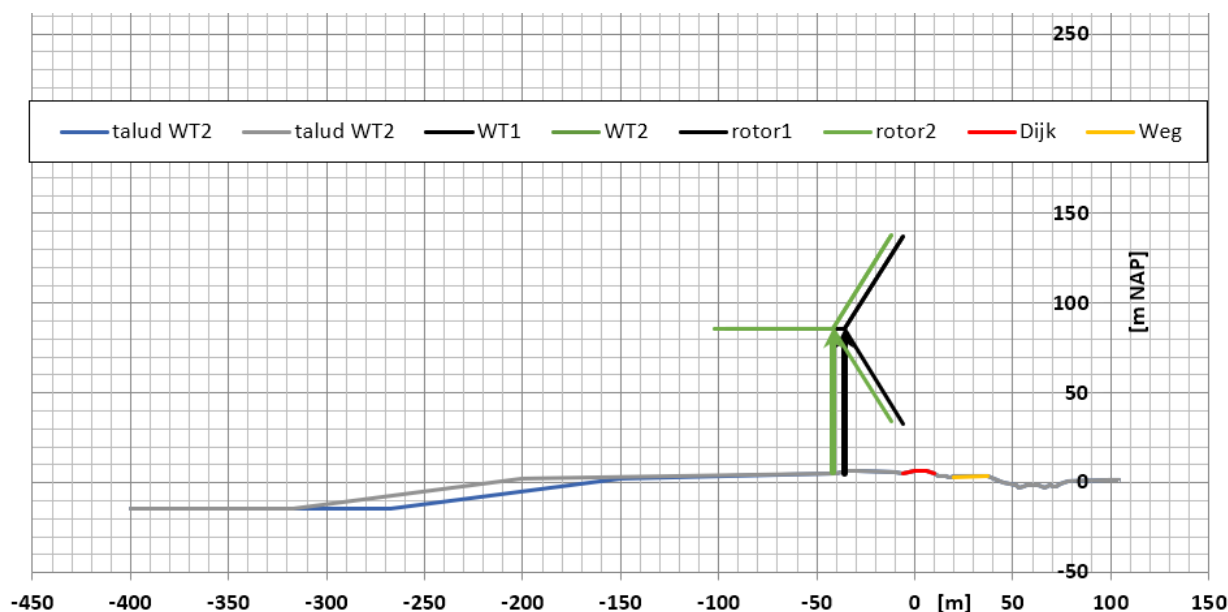
5.1 Beschikbare informatie

Ten behoeve van de beoordeling van de effecten van de windturbine op de waterveiligheid is de waterkering geschematiseerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende onderzoeken en gegevens:

- Beschikbaar grondonderzoek:
 - Sonderingen en boringen uit Dinoloket, zie bijlage A1;
 - Sonderingen uit archief HH Delfland, zie bijlage 0 en [Ref 4];
 - Boring uit archief HH Delfland, zie bijlage 0 en [Ref 5]
- Informatie over bodemopbouw en grondparameters:
 - Proevenverzameling 2.2 [Ref 6];
 - Geotechnisch lengteprofiel [Ref 7];
- Informatie over de waterkering uit:
 - Legger [Ref 8];
 - Voorlopige beoordeling [Ref 9];
 - Schematisatie onderwatertalud [Ref 10].

5.2 Geometrie kering

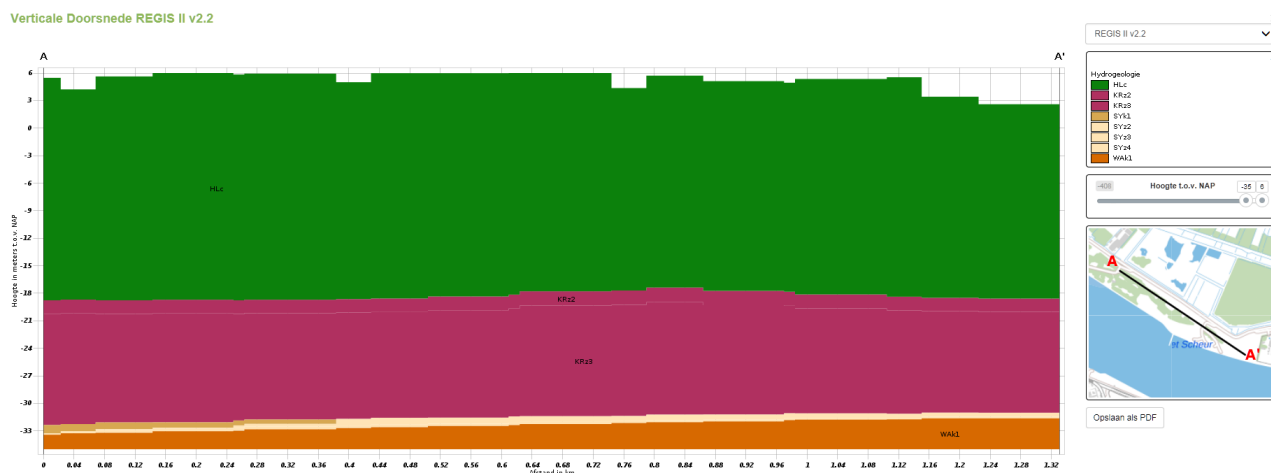
Het navolgende profiel is beschouwd ten behoeve van de beoordeling van de effecten van de windturbines op de waterkering, zie Figuur 5-1. De geometrie van het voorland en Het Scheur is overgenomen uit [Ref 10]. Uit AHN gegevens blijkt dat de hoogte van het voorland circa NAP +6 m bedraagt bij de waterkering en naar het water afloopt tot NAP +2,5 à +3,5 m. De breedte van het voorland is circa 150 m bij WT1 en 200 m bij WT2. De afstand van de windturbines tot aan de waterlijn is 100 m bij WT1 en 150 m bij WT2. De bodem van het Scheur heeft een niveau van NAP -14 m (voor toekomstige situatie is NAP -14,25 m aangehouden). Het onderwatertalud heeft een gemiddelde helling van 1:7.



Figuur 5-1 Beschouwd profiel waterkering (indicatieve locatie windturbines)

5.3 Geologie

Om inzicht te krijgen in de geologische opbouw van het projectgebied is het digitale Dinoloket van NITG-TNO geraadpleegd. In Figuur 5-2 is een geologisch lenteprofiel weergegeven.



Figuur 5-2 Geologisch lengteprofiel (bron: Dinoloket)

Ter plaatse van het projectgebied zijn de achtereenvolgens de volgende geologische formaties aangetroffen:

- Holocene afzetting (HLC), bestaande uit een afwisseling van zandige, kleiige en veenafzettingen;
- Formatie van Kreftenheye (KR), bestaande uit:
 - Zand, matig grof tot uiterst grof (105-300 mm), geelgrijs tot grijsbruin, kalkloos tot kalkrijk, bont, matig tot sterk grindhoudend;
 - Grind, matig tot zeer grof (5,6 – 63 mm), sterk zandig;
- Formatie van Stramproy (SY), bestaande uit:
 - Zand, uiterst fijn tot zeer grof (63 – 420 mm), lichtgrijs, lichtbruin of grijswit, gebleekt, kalkloos tot kalkrijk.

In het grondonderzoek zijn de Holocene afzettingen aangetroffen tot ca. NAP -18 à -22 m. Vanaf dit niveau is zand aangetroffen behorende bij de formaties KR en SY.

5.4 Bodemopbouw

Op basis van de resultaten van de sonderingen en boringen kan de bodemopbouw in het algemeen als volgt worden omschreven:

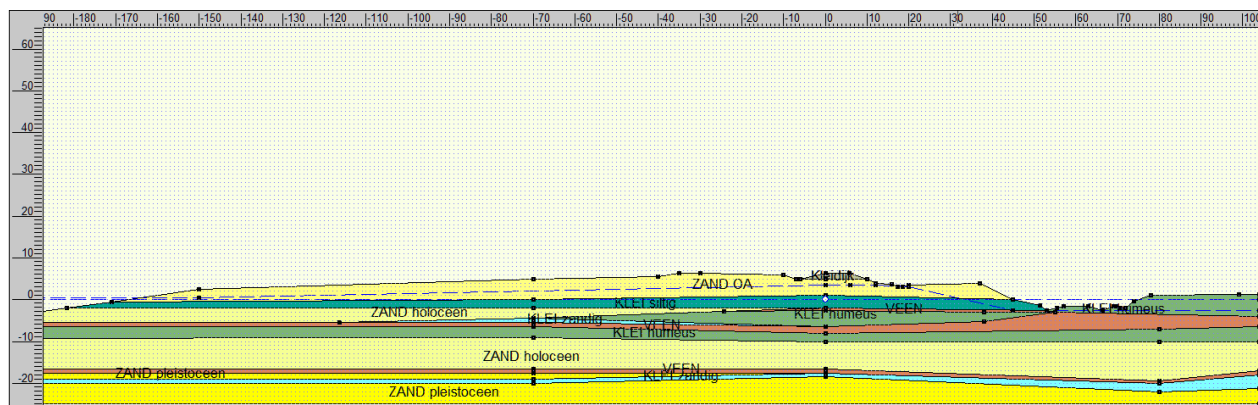
Het blijkt dat de Holocene lagen ter plaatse van de geplande windturbines tot een niveau van circa NAP -10 m uit een toplaag van zand gevolgd door samendrukbare klei- en veenlagen bestaan. Hieronder is een tussenzandlaag (matig tot losgepakt, siltig) aangetroffen, gevolgd door veen. Daaronder is vaster gepakt zand aangetroffen (Pleistoceen), zie ook bijlagen A1, 0 en 0. Uitgangspunt is een kleidijk op een ondergrond van (aangebracht) zand, klei en veen. In het achterland is de bovenste zandlaag niet aangetroffen.

Voor deze beoordeling wordt in detail gekeken naar de profielen ter plaatse van WT1 en WT2. Voor wat betreft de geometrie van de kering is van één geometrisch profiel uitgegaan (DP86, zie Figuur 5-1). De bodemopbouw ter plaatse van de 2 locaties is als aangegeven in de volgende tabel, in de dwarsprofielen welke in de berekeningen zijn gebruikt, zijn laagscheidingen in nog meer detail geschematiseerd.

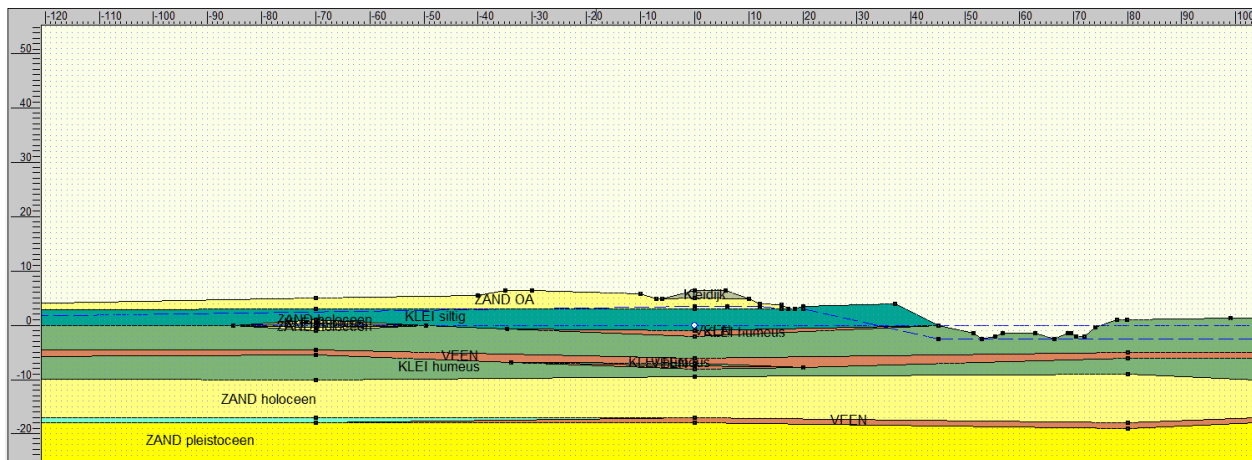
Tabel 5-1 Globale bodemopbouw projectlocatie

WT1		WT2	
Grondlaag	Top [m tov NAP]	Grondlaag	Top [m tov NAP]
Kleidijk	+6,4	Kleidijk	+6,4
Aangebracht ZAND	+4 (voorland) à +6 (dijk)	Aangebracht ZAND	+4 à +6
KLEI (zandig), ZAND (kleiig)	0	KLEI (zandig), ZAND (kleiig)	0
VEEN	-5 à -6	VEEN	-5 à -6
KLEI, siltig, vaak humeus	-6 à -7	KLEI, siltig, vaak humeus	-6 à -7
ZAND, vaak met kleilaagjes	-9 à -10	ZAND, vaak met kleilaagjes	-8 (achterland) à -10
(basis)VEEN	-16,5 à -17	(basis)VEEN	-17
Pleistocene KLEI	-17,5 à -18	Pleistocene KLEI	Nvt
Pleistoceen ZAND, matig vast, grof	-18 à -22	Pleistoceen ZAND, matig vast, grof	-17 à -18,5

Onderstaand is de geschematiseerde bodemopbouw per locatie weergegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de informatie (laagscheidingen) aangegeven in het geotechnisch lengteprofiel [Ref 7].



Figuur 5-3 Geschematiseerde bodemopbouw WT1



Figuur 5-4 Geschematiseerde bodemopbouw WT2

5.5 Grondparameters

In Tabel 5-2 zijn de grondparameters voor de verschillende lagen gepresenteerd (CSSM-methode). Deze zijn overgenomen uit [Ref 6].

Tabel 5-2 Grondparameters (karakteristieke waarden)

grondsoort	Volumieke massa [kN/m ³] Veldvochtig/verzadigd	CSSM model				
		S_{kar} [-]	m_{kar} [-]	POP_{kar} [kPa]	OCR_{kar} [kPa]	ϕ'_{cs} [°]
Klei, humeus	13,5	0,24	0,83	4,4	1,17	39,8
Klei, siltig	15	0,23	0,81	6,7	1,21	36,6
Klei, zandig	17	0,26	0,86	7,2	1,15	33,7
Veen	11	0,27	0,76	4,0	1,13	28,6
Veen, kleiig	12	0,26	0,80	6,2	1,16	27,3
Zand, Holoceen	18					30
Zand Pleistoceen	20					32,5
Zandophoging	19					30
Kleidijk	17,5					20

5.6 Hydraulische belastingen

Waterstanden

De hydraulische belastingen zijn afgeleid conform het document 'Werkwijze bepaling hydraulische ontwerprandvoorwaarden' (Deltares, 2016). Deze werkwijze sluit aan bij het OI2014 [Ref 3].

De ontwerppeilen zijn afgeleid voor het zichtjaar 2050 met behulp van het programma Hydra-NL. De resultaten zijn opgenomen in onderstaande tabel en bijlage 0.

Tabel 5-3 Hydraulische belasting ten behoeve van beoordeling

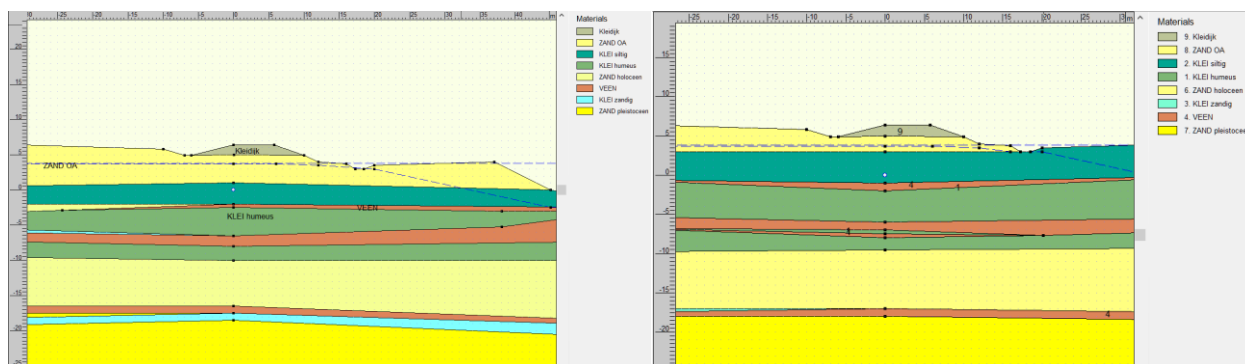
	WT1 en 2
Geotechnische beoordeling behorende bij 1/10.000 jaar waterstand	NAP +3,80 m
Hydraulisch belasting niveau (beschouwing kruinhoogte) Behorende bij 1/83.333 jaar	NAP +5,5 m bij 10 l/s/m NAP +6,6 m bij 1 l/s/m
Dagelijkse waterstand	NAP +0,50 m
Hoge waterstand 1x per jaar	NAP +2,4 m
Waterstand na val HW	NAP +2,8 m

Grondwater

Het verloop van de freatische lijn en het niveau van de stijghoogte van het grondwater in het watervoerend pakket is afgeleid op basis van [Ref 11], geval 4B (kleidijk zonder deklaag in voorland).

Tijdens hoogwater zal het freatisch vlak onder de kruin van de kering een niveau van NAP+3,70 m hebben, de stijghoogte wordt in die fase gelijk gesteld aan MHW (conservatieve aanname).

In het achterland geldt een polderpeil van NAP -2,5 m (zp NAP -2,46 m, wp NAP -2,57 m).



WT1: huidige situatie tijdens HW

WT2: huidige situatie tijdens HW

Figuur 5-5 Illustratie verloop freatische lijn en stijghoogte tijdens hoogwater situatie

5.7 Faalkanseisen

De Maximaal Toelaatbare Kans is uitgesplitst naar verschillende faalmechanismen. Dit resulteert in een faalkanseis per faalmechanisme. Voor de effectbeoordeling is de standaard faalkansruimteverdeling aangehouden, zie Tabel 5-4.

Tabel 5-4 Faalkansruimtefactoren per faalmechanisme

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

Voor de te beschouwen keringen resulteert de faalkansruimteverdeling in de volgende faalkanseisen op doorsnedeniveau, zie volgende tabel.

Tabel 5-5 Faalkanseisen per faalmechanisme op doorsnedeniveau

Faalmechanisme	Faalkanseis $P_{eis;dsn}$ [per jaar]	Berekening (volgens par. 1.2 van OI2014v4)
	WT1 en 2	
Macrostabiliteit binnenwaarts	1 / 2.972.500	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,04}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,033 \cdot L_{traject}}{50}$
Macrostabiliteit Buitenwaarts	1 / 297.250	Voor buitenwaartse macrostabiliteit is de faalkanseis op doorsnedeniveau voor macrostabiliteit gedeeld door de kans 0,1 op een overstroming gegeven macrostabiliteitsverlies buitenwaarts
Piping	1 / 958.333	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,24}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,4 \cdot L}{300}$

5.8 Partiële veiligheidsfactoren

De voor deze beoordeling aan te houden partiële veiligheidsfactoren zijn afgeleid en opgenomen in Tabel 5-6. Deze afleiding is conform [Ref 3] de in bovenstaande Tabel 5-5 opgenomen eisen.

Tabel 5-6 Partiele factoren

Factor	WT1 & WT2
Schadefactor g_n	
STBI – Mohr-Coulomb	1,13
STBI – CSSM	1,16
STBU - Mohr-Coulomb	1,07
STBU – CSSM	1,09
Modelfactor g_d	
MC/Bishop - geen opdrukken	1,00
MC/Bishop – wel opdrukken	1,10
CSSM/Bishop	1,11
Materiaalfactor g_m	1,0
Mohr-Coulomb	Variabel
CSSM	1,0
Schematiseringsfactor g_b	1,15 ¹⁾
Veiligheidsfactor Piping g_{pip}	1,22
Schematiseringsfactor piping $g_{b,p}$	1,15 ¹⁾
Veiligheidsfactor opbarsten g_{up}	1,56
Veiligheidsfactor Heave g_{he}	1,18

1) Schematiseringsfactor varieert van 1,3 tot (ondergrens) 1,0. In dit geval is uitgegaan van 1,15. Dit is niet onderbouwd, maar geschat op basis van homogeniteit van de bodem. Mogelijk kan deze factor voor ontwerpen nog verder omlaag worden gebracht, maar dat is voor deze beoordeling niet nodig. Hier wordt de relatieve afname van de stabiliteit beschouwd.

Veiligheidsfactoren voor de beoordeling

Stabiliteitsberekeningen voor de kwantitatieve beoordeling van de effecten van de windturbines op de waterkering zullen worden uitgevoerd met rekenwaarden voor de grondparameters (dus inclusief materiaalfactoren). Dit leidt tot de volgende veiligheidsfactor waaraan moet worden getoetst, zie Tabel 5-7.

Tabel 5-7 Veiligheidsfactoren stabiliteitsberekeningen

Faalmechanisme	WT1 & WT2-Mohr Coulomb	WT1 & WT2-CSSM
STBI	$\sigma = 1,13 * 1,0 * 1,15 = 1,30$	$\sigma = 1,16 * 1,11 * 1,15 = 1,48$
STBU	$\sigma = 1,07 * 1,0 * 1,15 = 1,23$	$\sigma = 1,09 * 1,11 * 1,15 = 1,39$

6 Belastingen

6.1 Belastingen tijdens de bouwfase

Uitgangspunt in de beoordeling is dat de werkzaamheden welke van invloed kunnen zijn op de veiligheid van de waterkeringen zullen plaatsvinden onder 'normale' omstandigheden en daardoor niet gelijktijdig plaatsvinden met maatgevende hydraulische belastingen. Zie Tabel 5-3 met 'dagelijkse waterstanden'.

Kruinbelasting

Uitgangspunt is dat tijdens de bouwfase geen bovenbelasting op de kruin van de waterkering nabij de windturbine aanwezig is.

Er vinden geen transporten in de lengterichting over de waterkering plaats. Bouwverkeer kruist de kering op circa 200 m van WT2 en 150 m van WT1 (zie Figuur 1-1).

Belasting kraanopstelplaats

De kraanbelastingen bevinden zich direct naast de windturbines.

Deze belastingen hebben een gunstig (tegenwerkend) effect op de stabiliteit (buitenwaarts) van de kering. In de beschouwing is om deze reden geen rekening gehouden met de kraanbelastingen.

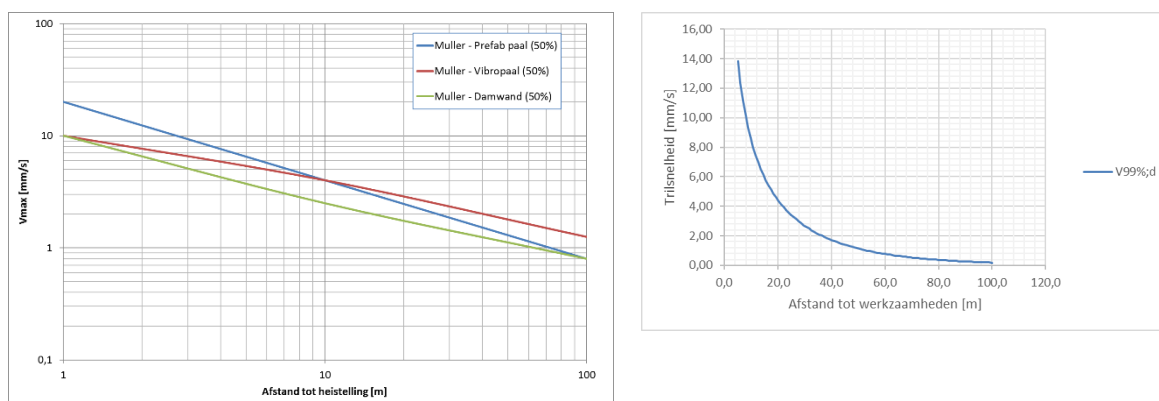
Grondversnellingen door heien

Voor de fundering van de windturbines is uitgegaan van grondverdringende palen die heidend op diepte worden gebracht, zoals prefab betonpalen of vibropalen.

Doorgaans is de dominante frequentie (f) bij heien van prefab betonpalen 10 à 15 Hz en van vibropalen 20 à 25 Hz. De te verwachten trillingssnelheden zijn afhankelijk van de ondergrond, hei-energie en de afstand tot de heistelling. Om een inschatting te maken van de te verwachten trillingen zijn de methodes IFCO (Muller) en CUR166 'Damwandconstructie' toegepast.

Door Muller zijn op basis van monitoringgegevens de verwachtingswaarden voor de trillingssnelheden bepaald, zie Figuur 6-1 (linker figuur).

In CUR166 kan voor verschillende Nederlandse grondprofielen op basis van de potentiële hei-energie een inschatting worden gemaakt van de grondversnellingen. Voor de grondkarakteristieken is het grondprofiel van Rotterdam aangenomen. De trillingssnelheid voor een slagenergie van 100 kNm (globale inschatting) en 1% kans van overschrijding is weergegeven in Figuur 6-1.

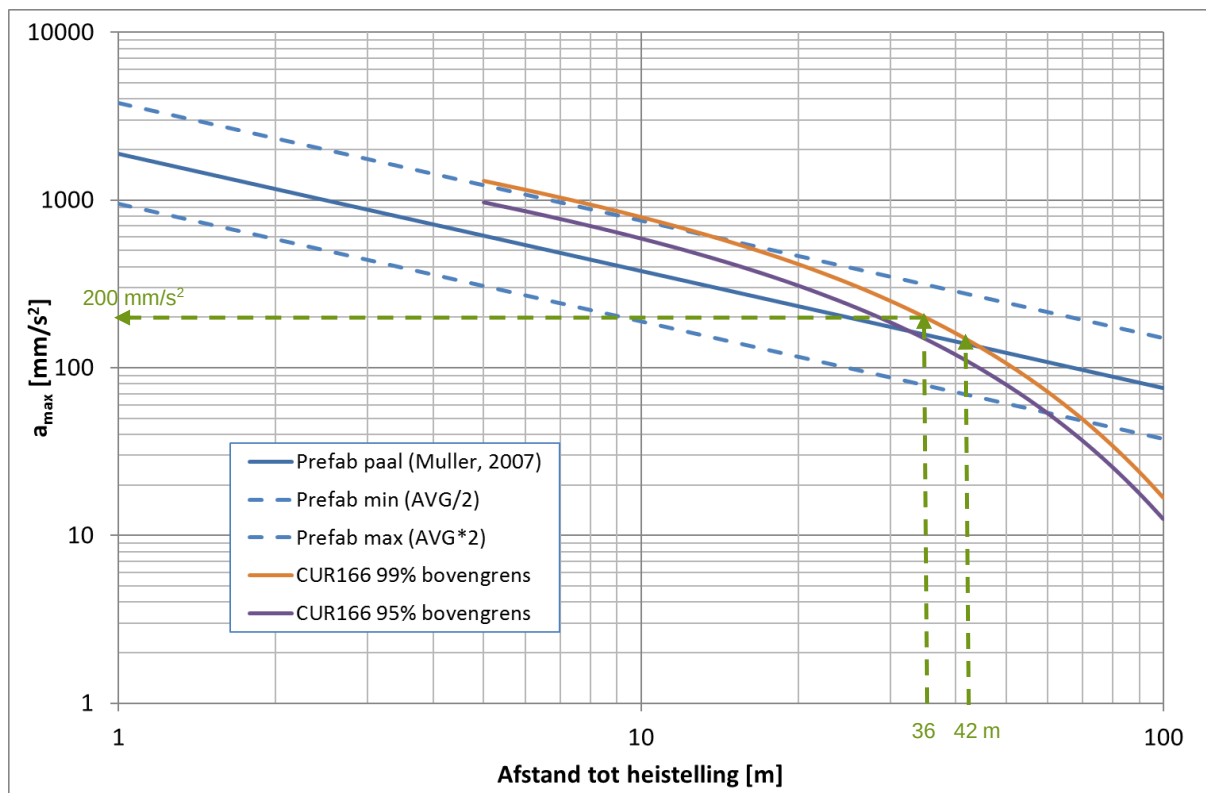


Figuur 6-1 Inschatting trillingssnelheden conform Muller (verwachtingswaarden, links) en CUR166 (99% bovengrens, rechts)

Op basis van de verwachte trillingsnelheden is de bijbehorende grondversnelling bepaald volgens:

$$a_{\max} = (2 \times p \times f) \times v_{\max}$$

De grondversnellingen op basis van beide methoden zijn grafisch weergegeven in Figuur 6-2.



Figuur 6-2 Verwachte grondversnellingen

Duidelijk blijkt dat de versnellingen in de ondergrond het grootst zijn bij de heipaal en snel afnemen met de afstand. De fundering van WT1 is voorzien op minimaal 36 m afstand tot de kruin en WT2 op 42 m afstand tot de kruin.

Bij een afstand tussen de fundering en de kruin van 36 m, is de grondversnelling, op basis van bovenstaande figuur, ca. 200 mm/s². Op een afstand van 42 m is de versnelling ca. 160 mm/s². Gekozen is te rekenen met een versnelling van **0,2 m/s²**, ofwel 0,02g. Voor het binnentalud is de afstand groter en zou met een lagere versnelling kunnen worden gerekend. Dit is niet gedaan, dit is een conservatieve aanpak.

De stabiliteitsberekeningen zijn met het programma D-Geo Stability (versie 18.1) uitgevoerd. Hierbij is deze grondversnelling opgelegd als een aardbevingscomponent. Aangezien in de berekeningsmodellen de versnellingscomponent voor het gehele grondprofiel geldt, is dit een conservatieve modellering. Er wordt geen rekening gehouden met damping.

Voor de stabiliteit is een horizontale versnelling ongunstiger dan een verticale versnellingscomponent. Op korte afstand is de horizontale trillingsrichting dominant. Op een afstand tot de trillingsbron van 1,5 à 2 maal de paallengte (circa 50 à 60 m) wordt de verticale trillingsrichting dominant. Op kortere afstand tot de trillingsbron varieert de verticale component tussen 0,5 en 1,0 maal de horizontale component. In dit geval zijn de horizontale en verticale component aan elkaar gelijkgesteld.

Wateroverspanningen

Naast versnelling zal als gevolg van heien een relatieve wateroverspanning kunnen optreden in de ondergrond. Wateroverspanningen komen beperkt voor in een zone van enkele meters rondom de paal. Doorgaans is de invloed van de relatieve waterspanningen op een afstand van meer dan 10 m van de paal verwaarloosbaar klein.

De afstand tussen het talud en het fundament is voor de te beschouwen locaties minimaal 36 m, er is om deze reden geen rekening gehouden met wateroverspanningen.

6.2 Belastingen tijdens de gebruiksfase

Voor beschouwing van de gebruiksfase wordt rekening gehouden met het optreden van maatgevend hoogwater in combinatie met harde wind. Daarnaast is ook de situatie met een waterstand bij dagelijkse omstandigheden geanalyseerd. Zie Tabel 5-3 voor aangehouden waterstanden.

Kruinbelasting

Volgens WBI2017 hoeft geen rekening te worden gehouden met een verkeersbelasting op de kruin, indien diepe glijcirkels worden beschouwd. Bij de beoordeling wordt daarom onderscheid gemaakt tussen (kleine) glijcirkels die niet leiden tot doorgaande erosie en overstroming én diepe glijcirkels door de kruin. Bij deze laatste is geen verkeersbelasting in rekening gebracht.

Trillingsintensiteit tijdens gebruik windturbines

Tijdens de gebruiksfase ontstaan trillingen in de ondergrond door het draaien van de rotorbladen, door de variaties in windsnelheid en door de trillingen in de constructie. Deze trillingen leiden tot toename van de belasting op de ondergrond door grondversnellingen.

Onderscheid wordt gemaakt in de volgende omstandigheden:

- **Dagelijkse omstandigheden met lage en gemiddelde windsnelheden**
Bij windsnelheden tot 12,5 m/s (gemiddeld 8,5 m/s) zijn de rotorbladen zo ver mogelijk uitgezet. Voor deze dagelijkse omstandigheden wordt in de stabiliteitsberekeningen uitgegaan van een maximale horizontale en verticale grondversnelling van **0,04 m/s²**, zie kader voor toelichting;
- **Draaiende rotor bij hoge windsnelheid**
Bij windsnelheden tussen 12,5 m/s en 25 m/s (hoge windsnelheid) is het nominaal vermogen bereikt. Om overtoeren te voorkomen worden de bladen uit de windrichting gedraaid, zodat de draaisnelheid van de generator gelijk blijft. Op basis van een onderzoek door Deltares (Hölscher, 2016) is voor deze windcondities uitgegaan van een versnelling in de ondergrond nabij de funderingsplaat van **0,08 m/s²**.
- **Stilstaande rotor bij extreme windsnelheid**
Bij windsnelheden hoger dan 25 m/s wordt uitgeschakeld en zijn de bladen in vaanstand. Zodra de bladen stilstaan, is de versnelling tijdens de extreme windomstandigheden, nabij de funderingsplaat circa **0,16 m/s²** (inschatting op basis van artikel van Hölscher (2016))
- **Noodstop of windstoot bij extreme windsnelheid**
Voor een windturbine op een waterkering is verondersteld dat de extreme stormsituatie kan optreden bij een hoogwater dat 1 keer per jaar voorkomt. Dit betekent dat uitgegaan moet worden van een windsnelheid in de range van 30-45 m/s. Bij deze stormsituatie is de turbine uitgeschakeld. De rotor staat dan stil, zodat draaiing geen bijdrage meer levert aan de trillingen. Op basis van onderzoek door Deltares (Hölscher, 2016) is afgeleid dat voor de situatie waarbij de turbine in één klap wordt uitgezet de trillingssnelheid in de bodem in de orde van 5 mm/s zal zijn, met een hoge waarde van 8-10 mm/s. De frequenties liggen in de range van 0,2-5 Hz. Dit leidt tot een maximale versnelling van circa **0,25 m/s²** nabij de funderingsplaat.

Uit metingen is gebleken dat de verticale component snel afneemt bij toenemende afstand. De horizontale trillingen nemen veel minder snel af. De in de berekeningen gehanteerde grondversnellingen zijn samengevat in Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Overzicht grondversnellingen in de gebruiksfase

Fase	Situatie	Grondversnellingen	
		Horizontaal [m/s ²]	Verticaal [m/s ²]
Gebruik (dagelijkse omstandigheden)	Gemiddelde wind (8,5 m/s)	0,04	0,04
Gebruik (extreme omstandigheden)	Noodstop/windstoot	0,25	0,125
	Stilstaande bladen (windsnelheid >25 m/s)	0,16	0,08
	Draaiende bladen (windsnelheid 12,5-25 m/s)	0,08	0,04

De waarde van de grondversnelling onder dagelijkse omstandigheden is gebaseerd op beschikbare metingen bij andere projecten (Fugro, 2012 en Deltares, Hölscher, 2016). De versnellingen zijn gemeten op het fundament nabij opgestelde 3 MW turbines in de Afrikahaven te Amsterdam (2008) en nabij Noordland op de Neeltje Jans (2009). Door Deltares zijn in 2016 metingen verricht bij een windturbine in Gouda. De metingen van Fugro zijn verricht bij lage en gemiddelde windsnelheden tot circa 14 m/s (windkracht tot 6 Bft). De gemeten waarden voor de versnellingen waren:

	Noordland	Afrikahaven
a_{hor}	0 tot 0,025 m/s ²	0,01 tot 0,035 m/s ²
a_{vert}	0,02 tot 0,075 m/s ²	0,015 tot 0,05 m/s ²

Bij metingen door Deltares bij Gouda bedroeg de gemiddelde windsnelheid 14-16 m/s en de maximale windsnelheid 22-24 m/s. De grootste gemeten trillingssnelheid op de fundering is 4 mm/s geweest. De trillingen in de grond waren gemiddeld 1-2 mm/s, met een maximale snelheid van 3 mm/s. Trillingen namen duidelijk af bij toenemende afstand. Dominant voor de horizontale trillingen is de frequentie van 3 Hz. Hierbij bedraagt de versnelling 0,04 m/s².

Daarnaast zijn door Fugro in 2016 trillingsmetingen uitgevoerd rondom een 6MW windturbine nabij de Eemshaven. Op circa 15 m afstand waren aan maaiveld en op diepte nagenoeg geen verhogingen meer waarneembaar ten opzichte van de achtergrondtrillingen. De grootste versnellingen traden op bij opstarten/noodstops, waarbij waarden van 0,015 tot 0,03 m/s² zijn gemeten.

In de stabiliteitsberekeningen is voor het gehele grondmodel een gelijke versnelling opgelegd, zonder rekening te houden met damping. Dit is een conservatieve aanname.

Lange duur trillingen

Op dit moment is er nog onzekerheid over het effect van lange duur trillingen op de eigenschappen van de ondergrond. Bij een ander project wordt dit onderzocht (zie paragraaf 9.2). In onderhavige analyse is een eventueel effect niet meegenomen.

Wateroverspanningen

Tijdens het gebruik worden de cyclische belastingen via het stijve funderingsblok over de palen verdeeld. Wateroverspanningen zullen op korte afstand al zijn afgenomen (<10m). Het effect van de wateroverspanningen in de gebruiksfase is niet relevant voor de macrostabiliteit van de waterkering.

6.3 Belastingen tijdens de verwijderingsfase

Net als bij het heien is het uitgangspunt dat de sloopwerkzaamheden welke van invloed kunnen zijn op de veiligheid van de waterkeringen zullen plaatsvinden onder 'normale' omstandigheden en daardoor niet gelijktijdig plaatsvinden met maatgevende hydraulische belastingen. Zie Tabel 5-3 met 'dagelijkse waterstanden'.

Kruinbelasting

Tijdens de verwijderingsfase is ervan uitgegaan dat er geen bovenbelasting op de kruin aanwezig is.

Belasting kraanopstelplaats

De kraanbelastingen bevinden zich aan de buitenzijde van de waterkering. Deze belastingen hebben een gunstig (tegenwerkend) effect op de buitenwaartse stabiliteit. In de stabiliteitsberekeningen is om deze reden geen rekening gehouden met de kraanbelastingen.

Grondversnellingen door slopen fundament

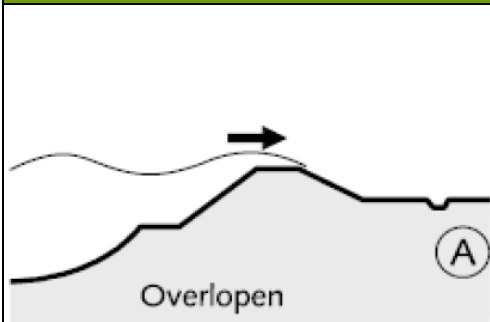
Voor de verwijdering van het blok van de windturbine funderingen zal als hoofdmaterieel gebruik worden gemaakt van een hydraulische graafmachine met een sloophamer. Deze draait doorgaans met 310-390 toeren/min, ofwel een frequentie van 5 à 6 Hz. Bij deze frequentie wordt een versnelling verwacht van circa horizontaal 300 mm/s^2 (**0,3 m/s²**) en verticaal 150 mm/s^2 (**0,15 m/s²**). Door demping zal deze versnelling ter plaatse van de waterkering geringer zijn. Conservatief is hier geen rekening mee gehouden.

7 Beoordeling ondergrondse effecten

7.1 Relevante faalmechanismen

Het beschouwen van mogelijke ondergrondse effecten van de windturbines op de waterveiligheid is bepaald aan de hand van verschillende faalmechanismen. Een korte beschrijving van de faalmechanismen, evenals de potentiële effecten op de sterkte van of de belasting op de waterkering, is gegeven in Tabel 7-1.

Tabel 7-1 Omschrijving faalmechanismen (figuren uit VTV2006)

Faalmechanisme	Omschrijving effecten op belasting/sterkte
 Overlopen (A)	Overlopen in combinatie met doorgaande erosie leidt tot een overstroming. De weerstand hiertegen wordt o.a. bepaald door de hoogte van de kruin. <u>Effecten</u> <u>Bouwfase:</u> - Afname van de kruinhoogte door verdichting/verweking van zandige lagen als gevolg van heitrillingen; - Eventueel: een tijdelijke open ontgraving voor de kruising van kabels leidt tot een tijdelijke kruinhoogteverlaging. <u>Gebruiksfase:</u> - Afname van de kruinhoogte door verdichting/verweking van zandige lagen als gevolg van trillingen van het fundament; <u>Verwijderingsfase:</u> - Afname van de kruinhoogte door verdichting/verweking van zandige lagen als gevolg van trillingen tijdens sloop van het fundament.
 Golfoverslag (B)	Golfoverslag kan leiden tot erosie van de kruin en het binnentalud door de kracht van het stromend water. De belasting wordt gevormd door de hydraulische randvoorwaarden en het daaruit voortvloeiende overslagdebiet. De sterkte wordt bepaald door de erosiebestendigheid van het binnentalud. <u>Effecten</u> <u>Bouwfase:</u> - Eventueel: door de aanleg van kabels aan de buitenzijde kan schade optreden aan de grasbekleding met tijdelijk verminderde erosiebestendigheid; - Door aanleg van het fundament aan de buitenzijde kan schade optreden aan de grasbekleding met tijdelijk verminderde erosiebestendigheid. Echter, de windturbines bevinden zich op een dusdanige afstand van het buitentalud dat deze niet de bekleding beïnvloeden. <u>Alle fasen:</u> - Net als bij overloop kan in alle fasen een kruinhoogtedaling ten gevolge van verdichting/verweking leiden tot toename van het golfoverslagdebiet en erosie/schade aan de kruin en het binnentalud.
 Afschuiven binnentalud (C)	Instabiliteit (afschuiven) van het binnentalud kan optreden, hetzij door infiltratie van het overstromend water bij een combinatie van hoge waterstand en golfoverslag, hetzij door waterdruk tegen de waterkering en verhoogde waterspanning in de ondergrond. Daarnaast bestaat de belasting uit het gewicht van de waterkering en verkeersbelasting. De sterkte wordt bepaald door de geometrie en het gewicht en de schuifsterkte van de ondergrond. <u>Effecten</u> <u>Bouwfase:</u> - Toename van belasting door trillingen tijdens het heien van palen; - Toename van belasting op de kruin tijdens (zwaar) transport. Dit vindt plaats ter plaatse van dwarsprofiel bij huidige overgang, niet in dwarsprofielen met windturbines;

Faalmechanisme	Omschrijving effecten op belasting/sterkte
	Gebruiksfasen: • Trillingen van het fundament als gevolg van cyclische windbelastingen kunnen leiden tot toename van de grondbelasting; Verwijderingsfasen: • Toename van belasting door trillingen tijdens het slopen van het fundament.
	Instabiliteit (afschuiven) van het buitentalud na een snelle daling van de buitenwaterstand. De sterkte wordt bepaald door de geometrie van de waterkering en het gewicht en de schuifsterkte van de ondergrond. Effecten Bouwfasen: • Toename van belasting door trillingen tijdens het heien van palen; • Toename belasting op buitenberm/voorland ter plaatse van kraanopstelplaats en wegen. Deze belasting heeft een positieve bijdrage aan de stabiliteit en wordt daarom niet meegenomen; • Eventueel: afname sterkte door ontgraving voor kabels. Gebruiksfasen: • Trillingen van het fundament als gevolg van cyclische windbelastingen kunnen leiden tot toename van de grondbelasting; Verwijderingsfasen: • Toename van belasting door trillingen tijdens het slopen (fundament).
	Instabiliteit van het binnentalud door uittredend kwelwater door het grondlichaam. De belasting wordt bepaald door de buitenwaterstand en de doorlatendheid van het dijklichaam. De sterkte wordt bepaald door de geometrie van de waterkering en de grondopbouw. Effecten De windturbines en bijbehorende werken hebben geen invloed op de grondwaterstroming door de dijk. Ook blijft de opbouw van de kering ongewijzigd. Er worden hierdoor geen negatieve effecten verwacht.
	Piping betreft kwelstroming door de ondergrond waarbij achter de dijk erosie ontstaat en grond meegevoerd wordt (zandmeervoerende wellen). Voor dit mechanisme zijn het verval (hoge buitenwaterstand) en de stroomsnelheid van belang. De weerstand wordt bepaald door de kwelweglengte en grondeigenschappen. Effecten Bouwfasen: • Eventueel: aanleg van kruisende kabel kan leiden tot erosie door kwelstroming langs de kabel; • Ontgraving ten behoeve van aanleg fundament kan een nieuw intredepunt introduceren met kortere kwelweglengte. Echter, in beide profielen is een zandige laag aangetroffen, direct onder het maaiveld. Voor piping dient daarom als intredepunt de buitenteen te worden aangehouden. Door aanleg van de windturbine wijzigt dit intredepunt niet; • Bij doorsteken van de slechtdoorlatende grondlagen met funderingspalen kan een nieuwe kwelweg ontstaan. Echter, bij gebruik van grondverdringende palen en een gezien de afstand van het fundament ten opzichte van het bestaande intredepunt, is de kans hierop minimaal en niet maatgevend. Gebruiksfasen: • Eventueel: kruisende kabel kan leiden tot erosie door piping/kwelstroming langs de kabel. Verwijderfasen: Geen effect verwacht.

 Erosie buitentalud	Erosie van het buitentalud of de vooroever door stroming of golfbeweging. Harde objecten in of nabij het buitentalud kunnen leiden tot lokale stroomversnelling en dus toename van de belasting. <u>Effecten</u> <u>Bouwfase:</u> • Eventueel: bij aanleg van kruisende leiding in een sleuf wordt de bekleding van de dijk tijdelijk verzwakt; <u>Gebruiksfase:</u> • Het fundament staat in het voorland. Erosie rondom het fundament kan effect hebben op de bekleding van de dijk. Echter, in dit geval is de afstand tot het buitentalud zodanig dat er geen effect wordt verwacht.
 <i>instabiliteit van het voorland (afschuiving en zettingsvloeiing)</i>	Zettingsvloeiing leidt tot een verandering van de geometrie van het voorland van een waterkering en kan daarmee van invloed zijn op andere faalmechanismen zoals overslag/overloop en macrostabiliteit. Eén van de voorwaarden voor het optreden van een zettingsvloeiing is het optreden van een inleidend mechanisme. Dit kan een (flinke) trilling zijn, bijvoorbeeld door heien of neerkomen van een gondel. Er bevinden zich matig tot los gepakte zandlagen in de bodem ter plaatse van de windturbines. <u>Effecten</u> <u>Bouwfase:</u> • Mogelijk inleidend mechanisme door trillingen tijdens het heien van palen. <u>Gebruiksfase:</u> • Mogelijk inleidend mechanisme door trillingen van het fundament als gevolg van cyclische windbelastingen; • Mogelijk inleidend mechanisme door trillingen ten gevolge van val van windturbine onderdeel. <u>Verwijderingsfase:</u> • Mogelijk inleidend mechanisme door trillingen tijdens het slopen (fundament).

Aan de hand van het voorgaande overzicht is gesteld dat de ontwikkeling van het windpark effect kan hebben op de volgende faalmechanismen (bij beschouwing ondergrondse effecten):

Tabel 7-2 Relevante faalmechanismen per projectfase met mogelijk effect

Faalmechanisme	Bouwfase	Gebruiksfase	Verwijderingsfase
Overlopen (HT)	Trilling Aanleg kabels ¹⁾	Trilling	Trilling
Golfoverslag (HT)			
Afschuiven binnentalud (STBI)	Trilling Transport	Trilling	Trilling
Afschuiven buitentalud (STBU)	Trilling	Trilling	Trilling
Microstabiliteit (STMI)	-	-	-
Piping (STPH)	Aanleg kabels ¹⁾	-	-
Bekleding (STBK)	Aanleg kabels ¹⁾	-	-
Voorland/Zettingsvloeiing (VLZV)	Trilling	Trilling	Trilling
Niet-waterkerende objecten (NWO)	Aanleg kabels ¹⁾	Objecten/faciliteiten t.b.v. gebruik windpark (o.a. lantaarnpalen, schakelkasten, etc)	-

1) Er is nog geen kabeltracé bekend in deze fase, onderstaand is een algemene beschouwing opgenomen van kabels die de waterkering kruisen of evenwijdig aan de waterkering worden aangelegd.

Deze potentiële faalmechanismen worden hierna nader kwantitatief beoordeeld. Ten aanzien van piping geldt dat de bekabeling wordt beschouwd als Niet Waterkerende Object (NWO). De bekabeling is zodanig afzonderlijk beschouwd.

7.2 Beoordeling effecten op overloop en golfoverslag (HT)

Tijdens de aanleg van kruisende kabels in een open ontgraving zal de kruinhoogte tijdelijk worden verlaagd. Bij bouw van de windturbines onder dagelijkse omstandigheden is voldoende veiligheidsmarge aanwezig. De huidige kruin heeft een niveau van NAP +6,4 m. De waterstand onder dagelijkse omstandigheden is NAP +0,5. Bij een ontgraving van 1 à 2 m onder de kruin is nog steeds ruim voldoende hoogte over.

Tijdens de aanleg van kabels kunnen werkzaamheden benodigd zijn die de sterkte van de bekleding op de kruin en het binnentalud kunnen aantasten. Tijdens de uitvoering van de graaf- en aanvulwerkzaamheden zal ervoor moeten worden gezorgd dat de grond goed wordt verdicht, goed aanvuilmateriaal wordt gebruikt en de profielopbouw en grasbekleding zoveel mogelijk wordt hersteld (conform RAW).

De ondergrond is niet gevoelig voor verweking/verdichting. De zandlagen zijn voldoende past gepakt en/of de zandlagen worden afgewisseld door kleilagen, zie sonderingen in bijlagen A1 en A2. De weerstand tegen verweking komt niet onder 2,0. Er wordt daarom geen zetting aan het maaiveld en afname van de kruinhoogte verwacht door trilling en verdichting van het zand. Zie bijlage A7 voor analyse van kans op verweking.

Een (eventuele) verhoging/verbreding van de waterkering in buitenwaartse richting is door de aanwezigheid van de windturbine niet onmogelijk.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de plaatsing en aanwezigheid van het windpark geen noemenswaardige effecten zal hebben op de mechanismen 'overlopen' en 'golfoverslag', mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de profielopbouw en grasbekleding.

7.3 Beoordeling effecten op binnenwaarde stabiliteit (STBI)

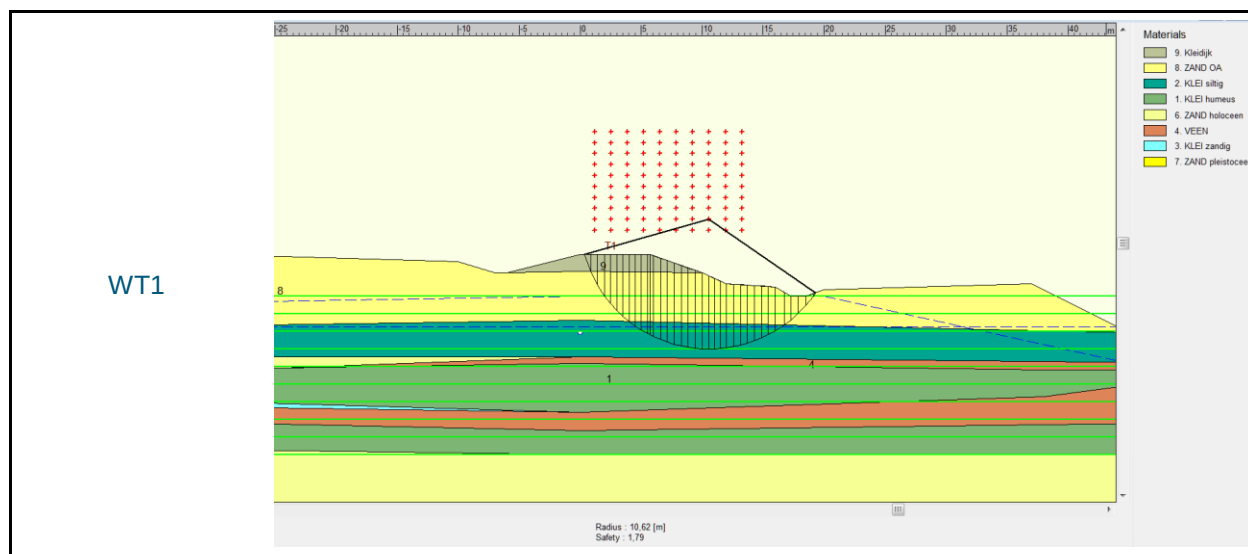
De ontwikkeling van het windpark leidt niet tot verandering van de bodemopbouw van de waterkering of de ondergrond. De geometrie van de kering wijzigt niet ten gevolge van de ontwikkeling van het windpark.

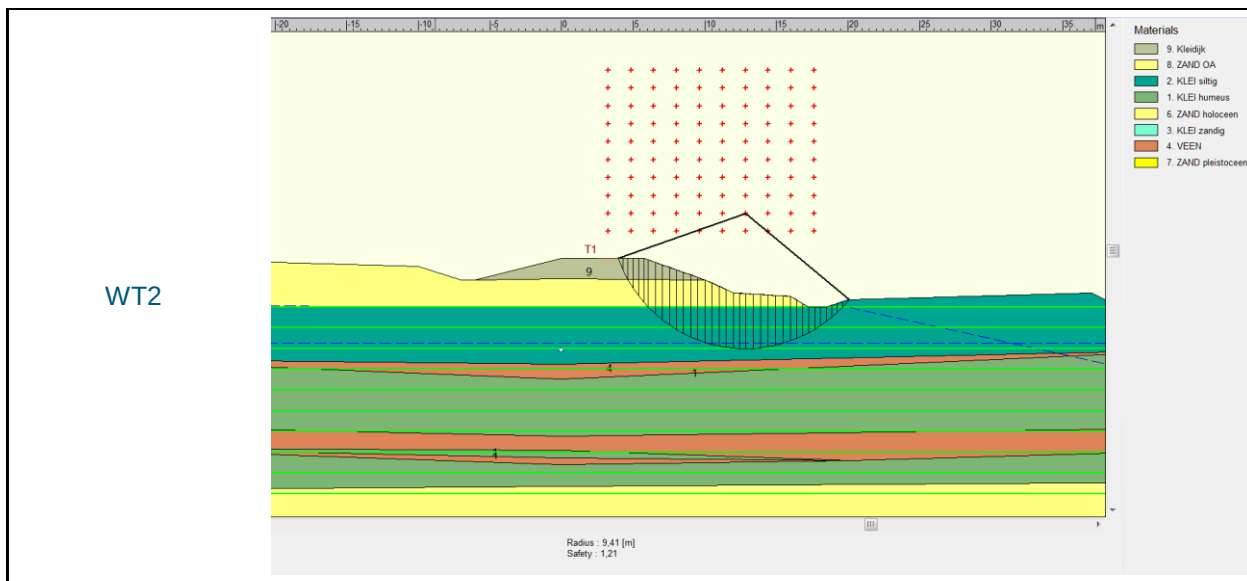
Tijdens de bouw (en het verwijderen) van het windpark wordt de waterkering extra belast door trillingen ten gevolge van het heien (en verwijderen) van de funderingspalen, zie paragraaf 6.1 en 6.3). Door middel van glijvlakberekeningen is nagegaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit, zie bijlage 0.

Tijdens het gebruik van de windturbines wordt de horizontale windbelastingen via de fundering overgedragen naar de ondergrond. Deze belastingen resulteren in geringe trillingen (grondversnellingen). De belastingen blijven veelal beperkt tot de bovenste grondlagen en dempen uit naarmate de afstand tot het fundament toeneemt. In paragraaf 6.2 zijn de te verwachten grondversnellingen afgeleid. Door middel van glijvlakberekeningen (methode Bishop, CSSM parameters) is nagegaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit van de waterkering.

De resultaten van de berekeningen zijn opgenomen in bijlage A8.

Ter illustratie is in onderstaande figuur het resultaat van enkele berekeningen opgenomen.





Figuur 7-1 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen binnentalud met links de Nieuwe Waterweg en rechts het achterland

De resultaten van de stabiliteitsberekeningen zijn samengevat in de volgende tabel.

Opgemerkt wordt dat de buitenwaterstand voor de geotechnische beschouwingen een lager niveau heeft dan het maaiveld ter plaatse van het voorland, zodat (ook in de maatgevende situatie) geen water tegen de kering staat.

Tabel 7-3 Resultaten berekening stabiliteit binnenwaarts

Locatie profiel	Situatie		WS BU	WS BI	SH	Kruin [kPa]	versnelling		Berekende	Additionele faalkans
			[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]		hor	vert	Stab.factor	
WT1	huidig	dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0	0	1,79	
		extreem	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0	0	1,46	
	bouw	dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,02g	0,1002	1,62	<<
		Extreem-draaiend	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,004g	0,004g	1,75	<<
	gebruik	Extreem-stilstaand	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0,008g	0,004g	1,41	0,00025
		Extreem-noodstop	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0,016g	0,008g	1,37	0,00066
		Extreem-noodstop	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0,025g	0,0125g	1,32	0,00213
	sloop	dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,03g	0,015g	1,55	<<
WT2	huidig	dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0	0	1,21	
		extreem	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0	0	1,04	
	bouw	dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,02g	0,02g	1,11	0,07349
		Extreem-draaiend	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,004g	0,004g	1,19	0,01676
	gebruik	Extreem-stilstaand	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0,008g	0,004g	1,01	0,37115
		Extreem-stilstaand	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0,016g	0,008g	0,98	0,57456
		Extreem-noodstop	+3,8	-2,5	+3,8	13,3	0,025g	0,0125g	0,95	0,86991
	sloop	dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,03g	0,015g	1,07	0,14478
WS BU	Waterstand in Het Scheur (Nieuwe Waterweg)									
WS BI	Polderpeil binnenzijde									
SH	Stijghoogte van grondwater in diepere zand									
Hor/vert	Horizontale en verticale versnelling									

Uit de stabiliteitsberekeningen van het binnentalud blijkt het volgende:

- Zelfs onder maatgevende omstandigheden staat geen water tegen de waterkering, het voorland is hoog. Bij eventuele instabiliteit van het binnentalud betreft dit geen waterveiligheidsprobleem, maar een taludinstabiliteit;
- In de huidige situatie onder extreme omstandigheden zonder trillingen, is bij beide profielen een stabiliteitsfactor uitgerekend welke kleiner is dan de gestelde eis ($\geq 1,48$). In onderstaande analyse wordt naar de afname van de stabiliteit ten gevolge van de bouw en aanwezigheid van de windturbines gekeken, en niet naar de hoogte van de factor;
- Tijdens de aanleg van de windturbines (heien van funderingspalen) wordt een stabiliteitsfactor van 1,62 (WT1) en 1,11 (WT2) uitgerekend. De berekende factoren laten een afname zien ten opzichte van de huidige stabiliteitsfactor voor dagelijkse omstandigheden;
- Tijdens gebruik van de windturbines bij dagelijkse windcondities en waterstanden laten de berekende stabiliteitsfactoren een afname zien van 2%, ten opzichte van de referentiesituatie onder dagelijkse omstandigheden;
- Voor de gebruikssituatie onder extreme omstandigheden, tijdens extreem hoog water, met zwaar verkeer op de kruin van de waterkering en extreme wind is de berekende veiligheidsfactor 3% tot 10% lager dan de referentiesituatie;
- Bij de sloop van de fundering van de windturbines bij dagelijkse omstandigheden en waterstanden laten de berekende stabiliteitsfactoren een afname zien van 12% à 13.

Een extra profiel is doorgerekend om het effect van het (zware) transport bij de dijkovergang te bepalen. Hierbij is uitgegaan van een belasting op de kruin van 20 kN/m² over een breedte van 2,5 m en een dagelijkse waterstand. Voor de bodemopbouw is locatie WT1 aangehouden. Daarnaast is uitgegaan van trillingen behorende bij de gebruiksfase. De berekende stabiliteitsfactor is 1,51. Dit is voldoende.

Op basis van bovengenoemde stabiliteitsberekeningen is de additionele faalkans door de aanwezigheid van de windturbines bepaald, zie bijlage A8. Hierbij zijn de volgende stappen gevolgd:

- Op basis van de berekende stabiliteitsfactor is de aanwezige schadefactor bepaald;
- Vervolgens is de bijbehorende beta en kans van optreden (P_{aanw}) bepaald;
- Uitgangspunt is dat eventuele schade binnen 2 weken kan worden hersteld ($P_{herstel}$). Bij WT2 is er vanwege de lage berekende stabiliteitsfactor voor gekozen een hersteltijd van 1 week aan te houden. Dit dient in de vergunning te worden opgenomen;
- Vanwege het hoog gelegen voorland is de kans dat een hoogwater optreedt dat hoger is dan het voorland ($P_{\{Hw>Hvl\}}$) gering, hier 1/85000 per jaar;
- De totale faalkans (P_{totaal}) per situatie is bepaald door te vermenigvuldigen: $P_{aanw} * P_{herstel} * P_{\{Hw>Hvl\}}$;
- Door de berekende faalkans te vergelijken met de normsituatie (eis) is de additionele faalkans bepaald.

De resultaten laten zien dat:

- WT1: de som van alle situaties waarbij trillingen STBI beïnvloeden leidt tot een additionele faalkansbijdrage van 0,003%. Individuele gebeurtenissen hebben een maximale additionele bijdrage van 0,002%;
- WT2: de som van alle situaties waarbij trillingen STBI beïnvloeden leidt tot een additionele faalkansbijdrage van 2,05%. Individuele gebeurtenissen hebben een maximale additionele bijdrage van 0,87%;
- Tijdens de bouw is de additionele bijdrage maximaal 0,073% (WT2);
- Onder dagelijkse omstandigheden is de additionele bijdrage maximaal 0,0168% (WT2);
- Onder extreme omstandigheden is de bijdrage voor WT1 0,003% en voor WT2 1,816% (voor 3 gebeurtenissen samen);
- Bij de sloop is de additionele bijdrage maximaal 0,144%.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat gebruik van heipalen bij de aanleg van de fundering van WT1 en WT2 mogelijk is. Als voorwaarde geldt dat de uitvoering onder normale dagelijkse omstandigheden dient plaats te vinden.

Uit de analyses blijkt verder dat de aanwezigheid van het windpark leidt tot een additionele faalkansbijdrage per situatie van maximaal 0,87%. De additionele faalkans van de windturbines is minder dan 1% en voldoet daarmee aan de eis.

7.4 Beoordeling effecten op buitenwaartse stabiliteit (STBU)

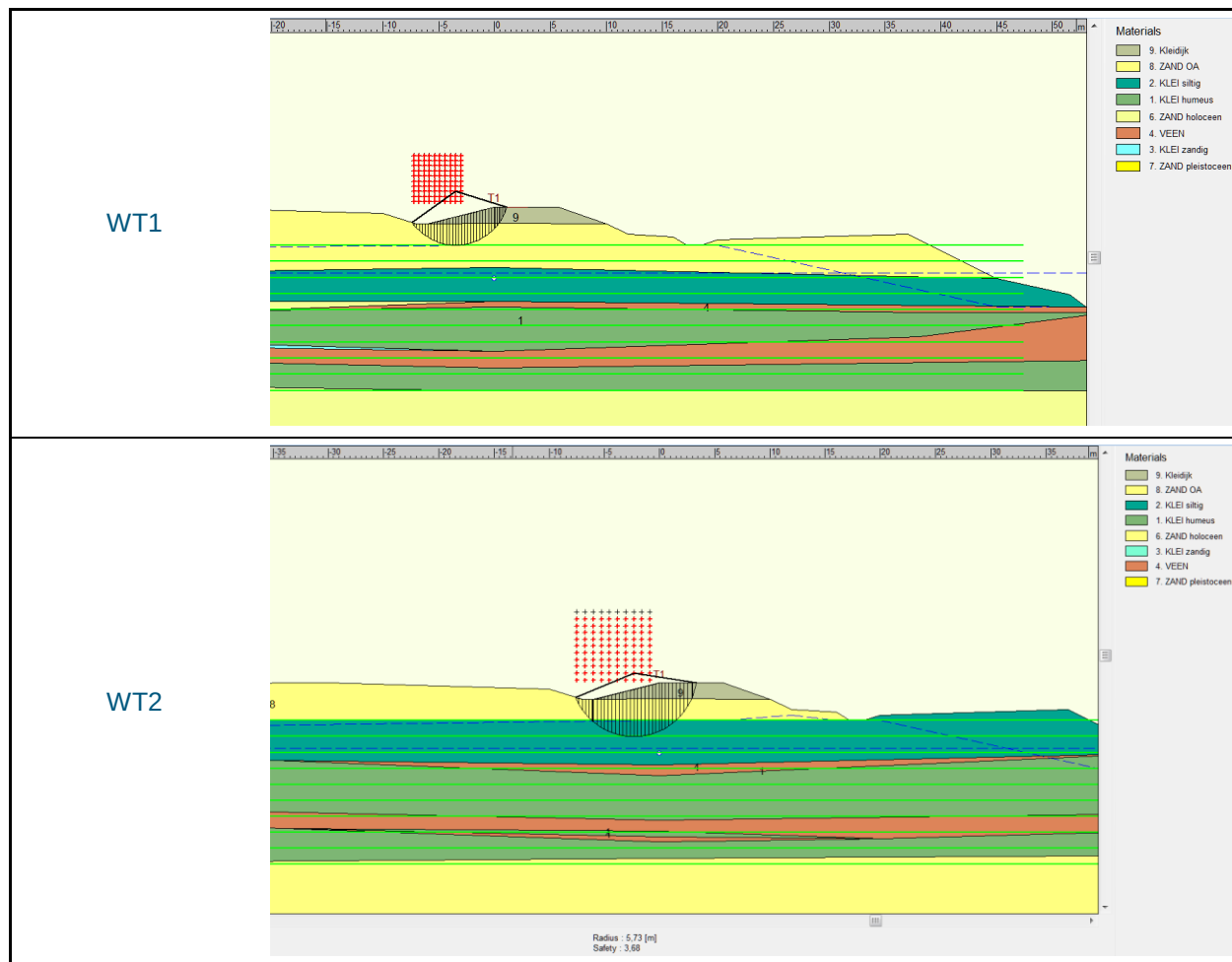
De ontwikkeling van het windpark leidt niet tot verandering van de bodemopbouw van de waterkering of de ondergrond.

Tijdens de aanleg van de windturbine wijzigt de geometrie van de kering niet.

Tijdens de bouw (en het verwijderen) van het windpark wordt de waterkering extra belast door trillingen ten gevolge van het heien van de funderingspalen, zie paragraaf 6.1 en 6.3. Door middel van glijvlakberekeningen is nagegaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit.

Tijdens het gebruik van de windturbines wordt de horizontale windbelastingen via de fundering overgedragen naar de ondergrond. Deze belastingen resulteren in geringe trillingen (grondversnellingen). De belastingen blijven veelal beperkt tot de bovenste grondlagen en dempen uit naarmate de afstand tot het fundament toeneemt. In paragraaf 6.2 zijn de te verwachten grondversnellingen afgeleid. Door middel van glijvlakberekeningen (methode Bishop, CSSM parameters) is nagegaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit van de waterkering, zie bijlage 0.

Ter illustratie is in onderstaande figuur het resultaat van twee berekeningen opgenomen.



Figuur 7-2 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen buitentalud

De resultaten van de stabiliteitsberekeningen staan in de volgende tabel.

Tabel 7-4 Resultaten berekening stabiliteit buitenwaarts

Locatie profiel	Situatie		WS BU	WS BI	SH	Kruin	versnelling		Berekende	Additionele faalkans
			[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[kPa]	hor	vert	Stab.factor	
WT1	Huidig	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0	0	4,89	
		Extreem	+2,8	-2,5	+2,8	13,3	0	0	3,46	
	Bouw	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,02g	0,02g	4,43	<<
	Gebruik	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,004g	0,004g	4,79	<<
		Extreem-noodstop	+2,8	-2,5	+2,8	13,3	0,025g	0,0125g	3,16	<<
	Sloop	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,03g	0,015g	4,22	<<
WT2	Huidig	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0	0	3,68	
		Extreem	+2,8	-2,5	+2,8	13,3	0	0	2,48	
	Bouw	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,02g	0,02g	3,27	<<
	Gebruik	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,004g	0,004g	3,59	<<
		Extreem-noodstop	+2,8	-2,5	+2,8	13,3	0,025g	0,0125g	2,25	<<
	Sloop	Dagelijks	+0,5	-2,5	+0,5	0	0,03g	0,015g	3,11	<<
WS BU	Waterstand in Het Scheur									
WS BI	Polderpeil binnenzijde									
SH	Stijghoogte van grondwater in diepere zand									
Hor/vert	Horizontale en verticale versnelling									

Uit de stabiliteitsberekeningen van het buitentalud van de kering blijkt het volgende:

- De berekende stabiliteitsfactor voldoet voor alle situaties ruim aan de gestelde eis (veiligheidsfactor dient $\geq 1,39$ te zijn);
- Tijdens de aanleg van de windturbines (heien van funderingspalen) neemt de stabiliteitsfactor af van 4,9 naar 4,4 voor WT1 en van 3,7 naar 3,3 voor WT2 ;
- Tijdens gebruik van de windturbines onder dagelijkse omstandigheden neemt de stabiliteitsfactor af tot 4,8 (WT1) en 3,6 (WT2);
- Voor de gebruikssituatie onder extreme omstandigheden, met hoogwater, zwaar verkeer op de kruin van de kering en een noodstop van de windturbine, is de berekende stabiliteitsfactor 3,11 (WT1) en 2,25 (WT2);
- Bij sloop van de fundering van de windturbines is de berekende stabiliteitsfactor 4,22 tot 3,11. Dit is nog voldoende veilig.

Een extra profiel is doorerekend om het effect van het (zware) transport bij de dijkovergang te bepalen. Hierbij is uitgegaan van een belasting op de kruin van 20 kN/m² over een breedte van 2,5 m en een dagelijkse waterstand. Voor de bodemopbouw is locatie WT1 aangehouden. Daarnaast is uitgegaan van trillingen behorende bij de gebruiksfase. De berekende stabiliteitsfactor is 3,3. Dit is (ruim) voldoende.

Op basis van bovengenoemde stabiliteitsberekeningen is de additionele faalkans door de aanwezigheid van de windturbines bepaald, zie bijlage A8 en toelichting in paragraaf 7.3.

De resultaten laten zien dat de additionele faalkansbijdrage voor beide locaties zeer gering is, orde 10^{-200%} a 10^{-440%}.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de plaatsing en aanwezigheid van het windpark zeer geringe effecten zal hebben op de buitenwaartse macrostabiliteit, en dat in alle situaties aan de gestelde eis wordt voldaan.

De additionele faalkans van de windturbines is (veel) minder dan 1% en voldoet daarmee aan de eis.

7.5 Beoordeling effecten op opbarsten, piping en heave (STPH)

Zoals beschreven in paragraaf 5.4 is in het voorland van de te beschouwen locaties een zandige laag aangetroffen. De dijk bestaat uit klei. Deze situatie kan piping gevoelig zijn.

Door de aanleg en het gebruik van de windturbines (inclusief fundering) wijzigt het intredepunt voor piping niet. Er is geen effect van de windturbines op het faalmechanisme piping.

Bij graverij voor de aanleg van kabels dient het aanvullen van de sleuf nauwkeurig te worden gedaan, cohesieve lagen moeten in dunne lagen worden teruggebracht (conform oorspronkelijke opbouw) en voldoende worden verdicht (conform RAW).

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de plaatsing en aanwezigheid van de windturbines geen effecten zal hebben op het mechanisme piping, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw'.

7.6 Beoordeling effecten voor bekleding

Bij graverij ten behoeve van de aanleg van kabels kan de deklaag en bekleding aan het buitentalud lokaal worden verstoord.

Bij het aanvullen van de sleuf moet daarom nauwkeurig worden gewerkt, cohesieve lagen moeten in dunne lagen worden teruggebracht (conform oorspronkelijke opbouw) en voldoende worden verdicht. De erosie bestendige deklaag dient zorgvuldig te worden teruggebracht.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de plaatsing en aanwezigheid van het windpark geen noemenswaardige effecten zal hebben op de erosiebestendigheid van de bekleding, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw' en het realiseren van een erosiebestendige bekleding.

7.7 Beoordeling effecten voorland/zettingsvloeiing

In het bodemprofiel komen matig tot los gepakte zandlagen voor. Conform de werkwijze omschreven in [Ref 16] is beoordeeld of de kans dat het restprofiel het beoordelingsprofiel van de dijk doorsnijdt voldoende klein is, bij optreden van zettingsvloeiing in het voorland.

In bijlage A7 zijn de berekeningen opgenomen.

Op basis van de beoordeling blijkt dat:

- WT2: uit de eenvoudige toets volgt dat het snijpunt van het beoordelingsniveau met het bestaande profiel buitenwaarts ligt van het signaleringsprofiel. Zettingsvloeiing is niet schadelijk, de faalkans is verwaarloosbaar;
- WT1: gedetailleerde toets is doorlopen. Kans op overschrijding van de toelaatbare inscharingslengte door een zettingsvloeiing voor dit traject per jaar is voldoende klein.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de plaatsing en aanwezigheid van het windpark geen noemenswaardige effecten zal hebben op de stabiliteit van het voorland.

7.8 NWO's

Niet-waterkerende objecten welke ten behoeve van het gebruik van het windpark op of bij de waterkering worden geplaatst dienen zodanig te worden geplaatst dat:

- Deze objecten zich buiten het legger profiel bevinden;
- Aansluitingen op bekleding zorgvuldig worden uitgevoerd;
- Bij eventuele fundering op palen dient een grondverdringend paalsysteem te worden toegepast;
- Aanleg van kabels en leidingen dient onder normale omstandigheden te gebeuren. Aanvulling van de sleuf dient zorgvuldig en met herstel van oorspronkelijk bodemprofiel te worden gedaan.

7.9 Additionele faalkansen ondergrondse effecten

In onderstaande tabel is, op basis van de resultaten van de voorgaande paragrafen, de faalkansbijdrage per faalmechanisme van de waterkering opgenomen.

Tabel 7-5 Verzameltabel faalkansbijdrage per faalmechanisme waterkering

Locatie	Faaloorzaak	Faalscenario		Faalkansbijdrage per faalmechanisme [%]						
				HT	STBI	STBU	STPH	BK	ZVL ¹⁾	som
WT1	Trillingen	bouw	dagelijks	nihil	<<	<<	n.r.	n.r.	1,26·10 ⁻⁵	<<
		gebruik	dagelijks		<<	<<	n.r.	n.r.		<<
			Extreem-draaiend		0,00025	<<	n.r.	n.r.		0,00026
			Extreem-stilstaand		0,00066	<<	n.r.	n.r.		0,00067
			Extreem-noodstop		0,00213	<<	n.r.	n.r.		0,00214
		sloop	dagelijks		<<	<<	n.r.	n.r.		<<
	Graverij	bouw	dagelijks	<<	n.r.	<<	<<	<<	n.r.	<<
WT2	Trillingen	bouw	dagelijks	nihil	0,07349	<<	n.r.	n.r.	0	0,07349
		gebruik	dagelijks		0,01676	<<	n.r.	n.r.		0,01676
			Extreem-draaiend		0,37115	<<	n.r.	n.r.		0,37115
			Extreem-stilstaand		0,57456	<<	n.r.	n.r.		0,57456
			Extreem-noodstop		0,86991	<<	n.r.	n.r.		0,86991
		sloop	dagelijks		0,14478	<<	n.r.	n.r.		0,14478
	graverij	bouw	dagelijks	<<	n.r.	<<	<<	<<	n.r.	<<

n.r. = niet relevant

1) kansbijdrage indien wordt uitgegaan van zettingsvloeiingsgevoelige zandlagen over gehele talud (zeer conservatief, hier niet het geval, slechts 4 m zand en voldoende veiligheid tegen verweking).

8 Beoordeling bovengrondse effecten

8.1 Algemeen

Naast de beoordeling van de ondergrondse effecten is het mogelijk falen van de waterkering als gevolg van incidenten van onderdelen van de windturbine of de windturbine als geheel, ook beschouwd. De potentiële faalincidenten voor de windturbines betreffen mastbreuk, gondelval of bladbreuk. Het neerkomen van een onderdeel of de windturbine als geheel op of nabij de waterkering heeft een mogelijk negatief effect op de waterkerende functie.

De invloed van de bovengrondse faalincidenten is beoordeeld als bijdrage aan de autonome normfrequentie. Zoals beschreven in paragraaf 1.3 is als toetscriterium gehanteerd dat de additionele faalkans als gevolg van de turbines niet meer mag bedragen dan 1% van de toelaatbare faalkans op doorsnedeniveau per direct faalmechanisme. Bij dit criterium wordt voor het lengte-effect een conservatieve waarde van (minimaal) $N=10$ aangehouden. De factor $N=10$ is gekozen op basis van ervaringen bij eerdere projecten en in overleg met HH Delfland. Vanuit de beheerder geldt dat het niet aannemelijk is dat (heel) veel meer NWO's worden toegevoegd in 25 jaar.

In dit hoofdstuk wordt de additionele faalkansbijdrage bepaald per turbine en getoetst aan het toetscriterium. De aanpak is als beschreven in paragraaf 1.3. Wanneer de faalkansbijdrage per turbine kleiner is dan het criterium, is aangetoond dat de geplande windturbines niet leiden tot een noemenswaardige risicoverhoging.

8.2 Faalscenario's

Conform het Handboek Risicozonering Windturbines (RVO, 2014) worden de risico's van een windturbine voor personen en objecten in de directe omgeving gevormd door drie faalscenario's:

1. Mastbreuk: het omvallen van de turbine, inclusief gondelhuis en rotor;
2. Het neerkomen van het gondelhuis en/of de rotor;
3. Bladbreuk of het afbreken van delen van een rotorblad bij nominaal toerental en overtoeren.

Het faalmechanisme 'omvallen volledige windturbine' wordt beschouwd als het worst-case scenario dat kan optreden als de verbinding met het fundament of het fundament bezwijkt, waardoor de windturbine als geheel omvalt.

Het faalmechanisme 'neerstorten gondelhuis' houdt in dat de verbinding tussen de toren en het gondelhuis bezwijkt. In dat geval komt het gondelhuis in zijn geheel naar beneden.

Het faalmechanisme 'afworp rotorblad' houdt in dat een rotorblad als geheel of een onderdeel van het rotorblad losraakt tijdens het draaien. Afhankelijk van de positie van het rotorblad en het toerental op het moment van het losraken van het rotorblad, kan een rotorblad enkele honderden meters ver worden geworpen. Bij toerental wordt onderscheidt gemaakt in de faalfrequentie tussen nominaal en overtoeren, zijnde 2x nominaal toerental (zie navolgende paragraaf).

De grootte van de impact wordt onder meer bepaald door de hoek waaronder het rotorblad neerkomt en welk deel van het rotorblad als eerste inslaat. Afhankelijk van het gewicht en de snelheid van het rotorblad is er een risico dat ze, wanneer deze afbreken, een krater veroorzaken op de locatie waar ze terechtkomen. Hiermee vormt plaatsing van de windturbines binnen een afstand van enkele honderden meters uit de waterkering een risico op de standzekerheid van de waterkering.

8.3 Faalfrequentienorm

De faalfrequenties voor de voorgenomen maatgevende windturbine zijn afkomstig uit [Ref 14] (Handboek Risicozonering Windturbines) en zijn in onderstaande tabel weergegeven. De waarden zijn geldig voor windturbines vanaf 1 MW tot en met 5 MW.

Tabel 8-1 Scenario's en faalfrequenties voor de windturbines

Scenario	Faalfrequentie [1/jaar]
Mastbreuk (inclusief gondel/rotor)	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Neerstorten van de gondel en/of de rotor	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Bladbreuk bij nominaal toerental	$8,4 \cdot 10^{-4}$
Bladbreuk bij overtoeren	$5,0 \cdot 10^{-6}$

Opgemerkt wordt dat bovenstaande waarden conservatief zijn (95% waarden) en representatief zijn voor oudere windturbintypes. De incidenten waarop de faalfrequenties zijn gebaseerd gaan tot 2007, waardoor de veiligheidsverbeteringen van de afgelopen 10 jaar niet zijn meegenomen in deze berekeningen. Door verbeteringen van het veiligheidssysteem en verbeterde technologie en kwaliteitscontrole zijn de huidige generatie windturbines veiliger geworden.

8.4 Toetsingscriterium

De invloed van de bovengrondse faalincidenten is beoordeeld als bijdrage aan de autonome normfrequentie. De windturbines worden hierbij beschouwd als niet waterkerende objecten (NWO's). Ten aanzien van NWO's is er binnen het WBI2017 en OI2014 geen faalkansruimte gereserveerd. In principe dient de faalkansruimte voor de bijdrage van NWO's gevonden te worden binnen het betreffende faalmechanisme, waarbij de kansbijdrage niet groter mag zijn dan 1% van de norm op doorsnedeniveau, rekening houdend met een N-factor van 10. De gekozen factor N laat op deze manier ruimte voor andere objecten in het traject.

Op basis van het 1% criterium, $N=10$ en de MTK (Maximaal Toelaatbare Kans) dient de kans op overstroming door bezwijken van een windturbine kleiner te zijn dan:

- WT1 & WT2 - Dijktraject 14-3: $1/10.000 \times 0,01 \times 1/10 = 1 \cdot 10^{-7}$

8.5 Trefafstanden

Omvallen windturbine door mastbreuk

Conform het handboek is het maximale valbereik de som van de ashoogte en een halve rotordiameter, ofwel 81 m plus $120/2 = 141$ m. Waarbij wordt opgemerkt dat de gondel een puntimpact geeft en daardoor de grootste schade zal veroorzaken. De rotorbladen (niet afgeworpen) zullen over het algemeen versplinteren en geen schade veroorzaken.

Gondelval inclusief rotor

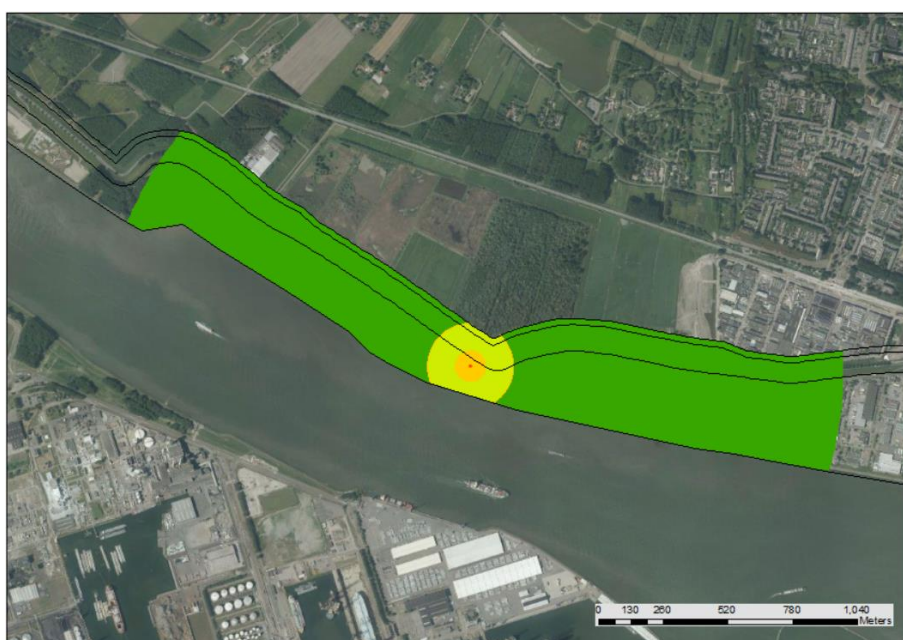
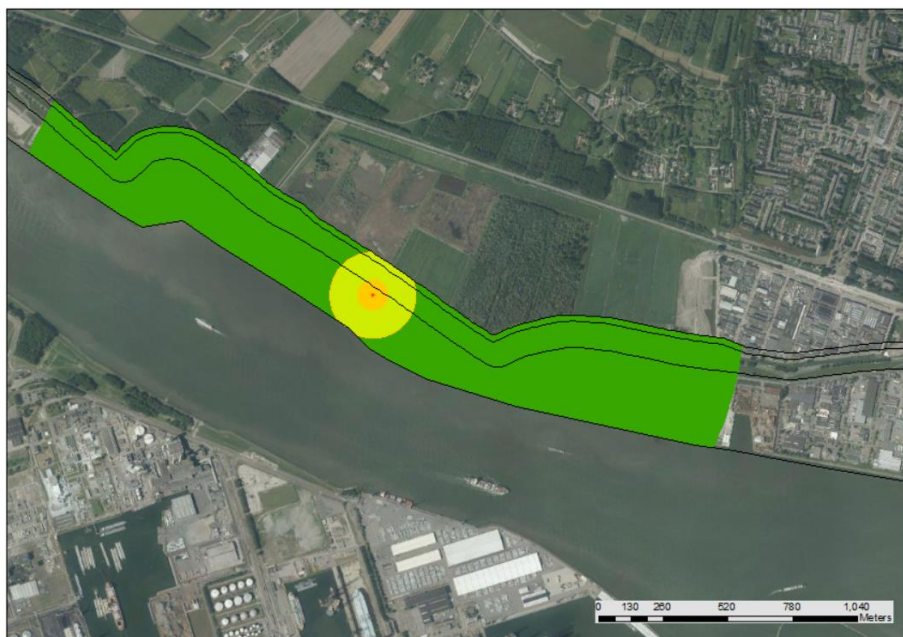
Een gondel die uit de toren valt (inclusief rotor), valt vrijwel recht naar beneden. De gondel kan daarmee over zijn lengte schade veroorzaken, in dat geval 10,4 m vanaf de mast. De rotor heeft daarmee een bereik van ca. 60 m (halve rotordiameter conform het handboek) maar zal bij deze verticale val geen schade veroorzaken (bij bladbreuk wel; zie navolgende alinea). Het treffen van de gondel is dus maatgevend. De afstand vanaf het centrum van de toren tot aan het waterstaatswerk is ca 30 m. Daarmee zal de val van de gondel en rotor geen schade aan het waterstaatswerk of binnenzijde aanrichten.

Bladbreek

Op basis van het Handboek zijn de effectafstanden van bladafwerp bepaald. Hierbij zijn twee scenario's onderscheiden:

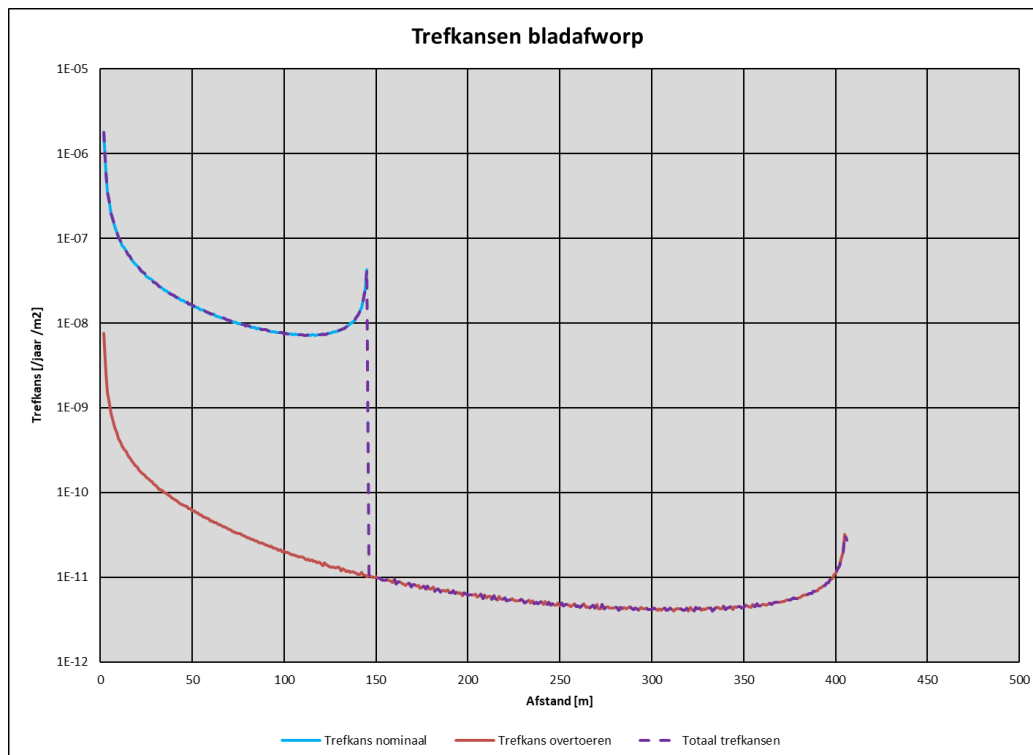
1. Bladbreek bij nominaal toerental
2. Bladbreek bij overtoeren

De werpafstand is bepaald op **144 m** voor het scenario bladbreek bij nominaal toerental. De werpafstand bedraagt **405 m** voor het scenario bladbreek bij overtoeren (2x nominaal toerental). Binnen deze afstanden liggen zowel de beschermingszone, het waterstaatswerk en de persleiding.



Figuur 8-1 Raakfrequentie bladbreek WT1 (onder) en WT2 (boven). Groen=werpafstand bladbreek bij overtoeren, lichtgroen=werpafstand bladbreek bij nominaal toeren en oranje=rotor/gondelval

De berekende trefkans curve voor bladafworp is grafisch weergegeven in Figuur 8-2.



Figuur 8-2 Berekende trefkans bladworp als functie van de afstand

8.6 Kritische strook waterkering

De kans dat de waterkering faalt door neerkomen van de windturbine of windturbineonderdeel is afhankelijk van de trefafstand van het onderdeel en de kritische strook van de waterkering. De kritische strook is gedefinieerd als de zone, waarbinnen het neerkomen van de windturbine of windturbineonderdeel kan leiden tot falen van de waterkering. Bij het neerkomen van de windturbine of windturbineonderdeel buiten de kritische strook zal de waterkering blijven functioneren.

Tot de kritische strook is het gehele Waterstaatswerk gerekend, alsmede de beschermingszone binnen. Dit is een eerste conservatieve aanname.

8.7 Raakfrequenties

Berekend is de kans dat een falende windturbine of windturbineonderdeel neerkomt per zone (waterstaatswerk en beschermingszone binnen en buiten). Vermenigvuldiging van de faalfrequentie (zie tabel 8-1) met de trefkans en het aantal windturbines resulteert in de raakfrequentie.

8.7.1 Per onderdeel

Omvallen windturbine door mastbreuk

In onderstaande tabel zijn de raakfrequenties weergegeven voor het omvallen van de mast:

Tabel 8-2 Raakfrequenties mastbreuk in 1/jaar

Object	WT1	WT2	Totaal
Waterstaatswerk	$4,88 \times 10^{-5}$	$5,55 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-4}$
Beschermingszone binnen ¹⁾	0	0	0
Beschermingszone buiten	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-4}$	$2,60 \times 10^{-4}$
Totaal	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-4}$	$2,60 \times 10^{-4}$

1) wordt niet geraakt (trefkans = 0); zie paragraaf 8.5. Daarmee is de raakfrequentie eveneens 0

Omdat de windturbine in de beschermingszone buiten staat, zal deze altijd getroffen worden door de toren bij een mastbreuk. Wanneer de windturbine in de richting van het waterstaatswerk valt, kan deze ook worden getroffen. De totale faalfrequentie van de toren is $1,3 \times 10^{-4}$ per jaar. Dit is dus ook de totale raakfrequentie van de dijk per windturbine. Het waterstaatswerk wordt slechts in een deel van de gevallen getroffen.

Bij een mastbreuk zal de beschermingszone buitenzijde altijd worden getroffen door de mast, maar niet altijd door de gondel. Het waterstaatswerk wordt niet altijd door de mast of gondel getroffen, maar als de gondel treft, dan zal ook de mast het waterstaatswerk treffen. De beschermingszone binnenzijde wordt nooit door de mast of de gondel getroffen.

Gondelval (inclusief rotor)

In onderstaande tabel zijn de raakfrequenties weergegeven:

Tabel 8-3 Raakfrequentie gondelval in 1/jaar

Object	WT1	WT2	Totaal
Waterstaatswerk ¹⁾	0	0	0
Beschermingszone binnen ¹⁾	0	0	0
Beschermingszone buiten	$4,00 \times 10^{-5}$	$4,00 \times 10^{-5}$	$8,00 \times 10^{-5}$
Totaal	$4,00 \times 10^{-5}$	$4,00 \times 10^{-5}$	$8,00 \times 10^{-5}$

1) wordt niet geraakt (trefkans = 0); treftafstand (10,4 m) kleiner dan afstand tot waterstaatswerk (ca. 30 m) en beschermingszone binnen; zie ook paragraaf 8.5. Daarmee is de raakfrequentie eveneens 0. Het waterstaatswerk en mogelijk de beschermingszone binnen worden mogelijk geraakt door rotorbladen (verticale val) maar veroorzaken geen schade.

Bladbreuk/-worp

De raakfrequenties zijn weergegeven in onderstaande tabel en Figuur 8-1.

Tabel 8-4 Raakfrequentie bladworp in 1/jaar

Object	WT1	WT2	Totaal
Waterstaatswerk	$2,00 \times 10^{-4}$	$1,97 \times 10^{-4}$	$3,97 \times 10^{-4}$
Beschermingszone binnen	$3,88 \times 10^{-5}$	$3,03 \times 10^{-5}$	$6,91 \times 10^{-5}$
Beschermingszone buiten	$5,81 \times 10^{-4}$	$5,26 \times 10^{-5}$	$1,11 \times 10^{-3}$
Totaal	$8,20 \times 10^{-4}$	$7,53 \times 10^{-4}$	$1,57 \times 10^{-3}$

8.7.2 Per zone waterkering

In navolgende tabel is per zone de raakfrequentie aangegeven.

Tabel 8-5 Totale raakfrequenties waterkering - waterstaatswerk

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	$2,00 \cdot 10^{-4}$	0 ¹⁾	$4,88 \cdot 10^{-5}$	[1\]
2	$1,97 \cdot 10^{-4}$	0 ¹⁾	$5,55 \cdot 10^{-5}$	[1\]

1) zie tabel 8-3 voor toelichting

Tabel 8-6 Totale raakfrequenties waterkering – beschermingszone binnen

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	$3,88 \cdot 10^{-5}$	0 ¹⁾	0 ²⁾	[1\]
2	$3,03 \cdot 10^{-5}$	0 ¹⁾	0 ²⁾	[1\]

1) zie tabel 8-3 voor toelichting

2) wordt niet geraakt; zie paragraaf 8.5

Tabel 8-7 Totale raakfrequenties waterkering – beschermingszone buiten

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	$5,81 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	[1\]
2	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	[1\]

8.8 Restprofiel waterkering en responstijd

Indien de windturbine of een windturbineonderdeel neerkomt buiten de kritische strook, dan zal de dijk en intact blijven met voldoende strekte, stabiliteit en hoogte om tijdens herstel de maatgevende

buitenwaterstand te kunnen keren. Er geldt dan geen beperking ten aanzien van de responstijd voor herstel van schade.

Bij neerkomen binnen de kritische strook voor dijken zal schade aan de waterkering optreden door kratervorming. In Bijlage A9 zijn berekeningen gemaakt om de kraterdiepte te bepalen. Hierbij wordt opgemerkt dat kraterdiepte niet afhankelijk is van de grondsoort of van de afmeting van het valgewicht.

Uit deze berekeningen volgt dat bij neerkomen van een complete gondel met rotor een kraterdiepte van circa **2,6 m** (bovengrenswaarde, ondergrens 1,3 m) wordt verwacht, veroorzaakt door de gondel (en niet door de rotor). Bij het neerkomen van een **afgeworpen** rotorblad wordt een indringing van **1,1 m** (bovengrenswaarde, ondergrens 0,5 m) verwacht bij nominaal toerental en **1,6 m** (bovengrenswaarde, ondergrens 0,6 m) bij overtoeren.

Directe schade aan de waterkering

Directe schade aan de waterkering door de krater kan leiden tot verlaging van de kruinhoogte, erosie of afschuiven van de waterkering. Voor het neerkomen van de windturbine of windturbineonderdeel binnen de kritische strook, geldt dat nog wel sprake is van een restprofiel, dat nog een bepaalde waterstand kan keren. Er is in dat geval een responstijd tot repareren. Het repareren betreft een noodsituatie, waarbij een noodoplossing wordt aangebracht om het water te keren. Er wordt vanuit gegaan dat het aanbrengen van een noodoplossing maximaal 14 dagen duurt. In deze periode is er een gereduceerd waterkerend vermogen.

Het restprofiel van de dijk is hieronder per faalincident nader bepaald.

Mastbreuk en gondelval

Bij vorming van een inslagkrater op de kruin van circa 2,6 m neemt de kerende hoogte af. Daarnaast zou door de schokgolf en gewicht van het onderdeel een afschuiving kunnen optreden.

Door de kratervorming kan de kruin dus worden verlaagd van circa NAP +6,4 m naar NAP +3,8 m. In dat geval kan een waterstand van circa NAP +3,3 m nog worden gekeerd. Op basis van historische peilmetingen (zie bijlage A5) is - op basis van interpolatie tussen de beschikbare data van 100 en 30 jaar - bepaald dat deze waterstand gedurende 1x per 50 jaar wordt overschreden. De faalkans van de kering tijdens de herstelperiode is dan:

$$P(\text{falen tijdens herstel; mastbreuk/gondelval}) = 1/18250 \times 14/365 = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ (} 2,1 \cdot 10^{-4} \% \text{)}$$

Val van rotorblad na worp

Bij het neerkomen van een rotorblad op de waterkering zal deze met 1,1 m (nominaal) à 1,6 m (overtoeren) kunnen worden verlaagd (beide waarden zijn bovengrenswaarden)

Bij bladafworp met nominaal toerental zal de kruinhoogte worden verlaagd van NAP +6,4 m naar NAP +5,3 m. Bij deze hoogte kan een waterstand van ca. NAP +4,8 m worden gekeerd, een waterstand die hoger is dan de 1/10.000 waterstand van NAP+3,8 m. Er is derhalve geen kans op overstroming tijdens de herstelperiode.

Bij bladafworp tijdens overtoeren zal de kruinhoogte worden verlaagd van NAP +6,4 m naar NAP +4,8 m. Bij deze hoogte kan een waterstand van NAP +4,3 m worden gekeerd, een waterstand die hoger is dan de 1/10.000 waterstand van NAP+3,8 m. Er is derhalve geen kans op overstroming tijdens de herstelperiode.

Indirecte schade aan de waterkering

De persleiding bevindt zich in de 'beschermingszone buiten' op ca. 5 m van de mast.

In voorgaande paragrafen zijn de navolgende kraterdieptes (bovengrenswaardes) bepaald:

- ten gevolge van neerkomen rotorblad: 1,1 m (nominaal toerental) á 1,6 m (overtoeren)
- ten gevolge van mastbreuk (rotor en gondelval): 2,6 m

Voorgenoemde kraterdieptes zijn dusdanig dat (indirecte) schade is te verwachten van de persleiding. Na een faalincident dient de persleiding direct geïnspecteerd te worden en waar nodig te worden hersteld. Het optreden van lekkage dient uitgesloten te worden.

8.9 Additionele faalfrequentie bovengrondse effecten

De additionele faalfrequentie bij elke van de verschillende faalscenario's is bepaald als product van de totale raakfrequentie (paragraaf 8.7) en de kans dat de beschadigde waterkering faalt tijdens de herstelperiode (zie paragraaf 8.8).

Er geldt dan:

$$\text{Faalfrequentie van waterkering bij falen van een turbine of onderdeel} = \text{Raakfrequentie}_{(\text{scenario})} \times P(\text{falen tijdens herstel})$$

Aangezien er geen kans op overstroming is tijdens de herstelperiode bij het afwerpen van een rotorblad (zie vorige paragraaf), is de faalfrequentie nul.

De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabellen.

Tabel 8-8 Faalfrequentie waterkering - waterstaatswerk

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	0 ¹⁾	0 ²⁾	5,1·10 ⁻¹¹	[1\]
2	0 ¹⁾	0 ²⁾	5,8·10 ⁻¹¹	[1\]

1) geen kans op overstroom tijdens herstelperiode

2) zie tabel 8-3 voor toelichting

Tabel 8-9 Faalfrequenties waterkering – beschermingszone - binnen

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	0 ¹⁾	0 ²⁾	0	[1\]
2	0 ¹⁾	0 ²⁾	0	[1\]

1) geen kans op overstroom tijdens herstelperiode

2) zie tabel 8-3 voor toelichting

Tabel 8-10 Faalfrequentie waterkering – beschermingszone - buiten

WT	Bladworp	Gondel	Mastbreuk (gondel en mast)	Eenheid
1	0 ¹⁾	$4,2 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	[1\]
2	0 ¹⁾	$4,2 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	[1\]

1) geen kans op overstrooming tijdens herstelperiode

Uit voorgaande tabellen blijkt dat in alle gevallen de additionele faalkans kleiner is dan de toegestane faalkanstoename van $1,0 \cdot 10^{-7}$ per jaar. Het maatgevende faalscenario is mastbreuk, waarbij de mast op de waterkering terecht komt.

8.10 Overige effecten

Gezien het feit dat de windmolens buitendijks geplaatst worden, zijn een aantal aanvullende effecten beschouwd.

Stabiliteit voorland/zettingsvloeiing

Er dient beschouwd te worden of de stabiliteit van het voorland (zettingsvloeiing) invloed kan hebben op de fundering van de windmolens.

In paragraaf 7.7 is de stabiliteit van het voorland en de kans op het optreden van een zettingsvloeiing beschouwd waaruit geconcludeerd is dat deze <1% bedraagt. De windmolens liggen ver buiten de inscharingslengte na zettingsvloeiing en worden niet beïnvloed door dit mechanisme.

Onderlopen voorland

In periodes van hoog water zal het voorland onderlopen en daarmee zal de fundering van de windmolen onder water komen te staan.

Bij het funderingsontwerp dient op voorhand rekening gehouden met aantasting van het materiaal (bijvoorbeeld het beton van het funderingsblok) door zout/brak water.

Daarnaast dient in het ontwerp op voorhand rekening gehouden te worden met mogelijke erosie rondom het funderingsblok. Geadviseerd wordt om in het funderingsontwerp geen horizontale steundruk te rekenen over de bovenste 0,5 m van de fundering.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

De twee geplande windturbines van Windpark Vlaardingen zijn voorzien in de beschermingszone van de primaire waterkering van dijktraject 14-3 (Delflandsedijk).

In dit rapport zijn de ondergrondse effecten en de bovengrondse effecten van het windpark op de waterveiligheid beoordeeld. Aangetoond is dat de waterkerende functie gewaarborgd blijft tijdens de bouw, het gebruik en het verwijderen van het park mits bepaalde maatregelen worden genomen. De conclusies zijn hieronder nader beschreven.

Ondergrondse effecten

Op basis van de beoordeling van ondergronds effecten is vastgesteld dat de bouw, gebruik en verwijderen van het windpark effect kan hebben op de volgende faalmechanismen van de waterkering:

- Hoogte;
- Binnenwaartse en buitenwaartse macrostabiliteit;
- Piping;
- Bekleding;
- Voorlandstabiliteit.

De effecten op de mechanismen 'overlopen' en 'golfoverslag' (hoogte) zijn beoordeeld en zijn verwaarloosbaar, mits de uitvoering van eventueel aan te leggen kabels in de waterkering zorgvuldig wordt verricht met herstel van de profielopbouw en grasbekleding. Een eventuele toekomstige verhoging/verbreding van de waterkering is door de aanwezigheid van de windturbines niet onmogelijk.

De effecten op de 'macrostabiliteit binnenwaarts' zijn gedetailleerd beoordeeld en zijn beperkt. Uit de analyses blijkt dat de aanwezigheid van het windpark leidt tot een additionele faalkansbijdrage per situatie van maximaal 0,87%. De additionele faalkans van de windturbines is minder dan 1% en voldoet daarmee aan de eis.

De effecten op de 'macrostabiliteit buitenwaarts' zijn beoordeeld en zijn zeer gering. De additionele faalkans van de windturbines is (veel) minder dan 1% en voldoet daarmee aan de eis.

De effecten op het mechanisme piping zijn beoordeeld. De plaatsing en aanwezigheid van de windturbines heeft geen effecten, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw'.

De effecten op de bekleding zijn beoordeeld en verwaarloosbaar, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw' en het realiseren van een erosiebestendige bekleding.

De effecten op de stabiliteit van het voorland zijn beoordeeld en zeer beperkt. De kans op overschrijding van de toelaatbare inscharingslengte is zeer klein en voldoet aan de eis.

Door uitvoering onder dagelijkse omstandigheden en met monitoring van vervormingen, trillingen en wateroverspanningen worden de negatieve effecten tijdens de uitvoering acceptabel geacht.

Bovengrondse effecten

De invloed van de bovengrondse faalincidenten van een windturbine is beoordeeld als bijdrage aan de autonome normfrequentie van de waterkering.

De volgende scenario's zijn beschouwd:

- Mastbreuk (inclusief gondel/rotor)
- Neerstorten van de gondel en/of de rotor
- Baldbreuk bij nominaal toerental en overtoeren (2x nominaal)

Aangetoond is dat de faalkansbijdrage niet groter is dan 1% van de norm op doorsnedeniveau. Maatgevend faalscenario is mastbreuk, waarbij de mast op de waterkering terecht komt.

In de beoordeling is uitgegaan van conservatieve uitgangspunten. Zo zijn de faalfrequenties, waarop de berekeningen zijn gebaseerd, conservatief en representatief voor oudere windturbinetypes. De incidenten waarop de faalfrequenties zijn gebaseerd gaan tot 2007, waardoor de veiligheidsverbeteringen van de afgelopen 11 jaar niet zijn meegenomen. Door verbeteringen van het veiligheidssysteem en verbeterde technologie en kwaliteitscontrole zijn de huidige generatie windturbines veel veiliger geworden.

Bij het neerkomen van een rotorblad na worp is een kraterdiepte te verwachten van ca. 1,1 m (bovengrenswaarde) bij nominaal toeren en een kraterdiepte van ca. 1,6 m (bovengrenswaarde) bij overtoeren.

Bij mastbeuk (inclusief gondel/rotor) bedraagt de bovengrenswaarde van de kraterdiepte ca. 2,6 m.

Door de krater en de gevolgen daarvan kan ter plaatse van de persleiding een plastische zone of een verwekingszone in de grond ontstaan die de waterkering kan ondermijnen. Na falen van de windturbine of een onderdeel daarvan, dient de persleiding geïnspecteerd te worden op beschadigen en waar nodig te worden hersteld. Het optreden van lekkage dient uitgesloten te worden.

Een instabiel voorland (zettingsvloeiing) heeft geen effect op de fundering van de windmolen omdat de windmolens zich ver buiten de inscharingslengte bevinden.

Bij het funderingsontwerp dient rekening gehouden met:

- aantasting van het materiaal (bijvoorbeeld het beton van het funderingsblok) door zout/brak water (er zijn periodes waarin het voorland onder water kan komen te staan);
- mogelijke erosie rondom het funderingsblok. Geadviseerd wordt derhalve om in het funderingsontwerp geen horizontale steundruk te rekenen over de bovenste 0,5 m van de fundering.

9.2 Aanbevelingen

Aanbeveling voor bouw van het windpark

- Voor de uitvoering van de bekabeling wordt aanbevolen om de 'oorspronkelijke bodemopbouw' te herstellen (erosiebestendig).

Monitoring van trillingen

Opgemerkt wordt dat de werkelijk optredende trillingen onzeker zijn en kunnen afwijken van de in deze studie aangehouden waarden. Aanbevolen wordt om in de definitieve ontwerp- en planningsfase een monitoringsplan op te stellen, waarin de trillingen ter plaatse van het fundament en het talud worden gemeten. De metingen dienen te worden verricht voorafgaand aan de bouw (nulmeting), tijdens de bouw en tijdens de exploitatie. Hierbij kunnen tevens metingen van de wateroverspanning worden uitgevoerd.

Monitoring effect lange duur trillingen

Op dit moment wordt bij een ander windturbine project een onderzoek naar het effect van lange duur trillingen op de eigenschappen van de ondergrond uitgevoerd. Met behulp van controlesonderingen worden de eigenschappen van de grond op verschillende momenten gecontroleerd. Doel van het onderzoek is de onzekerheid hierover weg te nemen.

Geadviseerd wordt ook in dit project een 3-tal controlesonderingen uit te voeren nabij de funderingen van de windturbines. Door op verschillende momenten te meten kan het eventuele effect van de trillingen op lange termijn in beeld worden gebracht. Voorstel voor planning van de uitvoering van de controle sonderingen is als volgt:

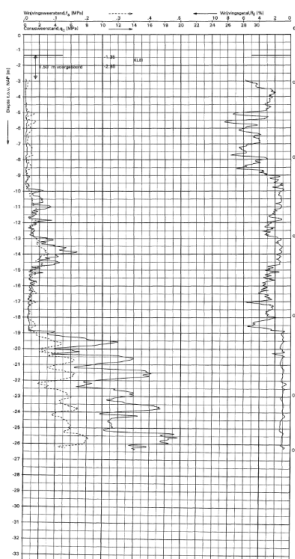
- Bij aanvang van bouwwerkzaamheden;
- Na 1 jaar gebruik;
- Na 5 jaar gebruik;
- Na 10 jaar gebruik;
- Na 15 jaar gebruik.

10 Referenties

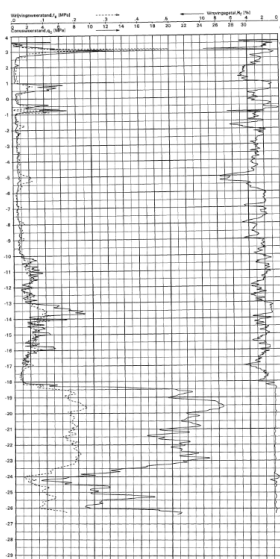
- Ref 1. Memo Windturbines op of nabij primaire waterkeringen, KPR nr 473, 19-07-2018, tevens opgenomen in bijlage A10;
- Ref 2. Factsheet post “overig” in de faalkansbegroting en indirecte mechanismen, KPR, 09-11-2016;
- Ref 3. Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen-normen, OI2014v4, Rijkswaterstaat, februari 2017;
- Ref 4. Grondonderzoek_primaire_waterkering_Delflandsedijk_Rotterdam 1092272, HH Delfland, oorspronkelijk rapport W-5511 volume 2, Fugro 10 december 2001;
- Ref 5. Grondonderzoek_primaire_waterkering_Delflandsedijk_Rotterdam 1092264, HH Delfland, oorspronkelijk rapport W-5511 volume 1, Fugro 10 december 2001;
- Ref 6. Proevenverzameling 2.2 Gebruikershandleiding, HH Delfland, Maart 2018
- Ref 7. Geotechnisch lengteprofiel traject 14_3 deel 2 (van 4), Fugro 25-9-2018
- Ref 8. DWP86 (bladnummer DD11, DD11-RZ/RZ-2011) uit legger HH Delfland
- Ref 9. Email HHR Delfland met figuur voorlopige beoordeling Delflandsedijk WBI2017, d.d. 5/3/2019
- Ref 10. Schematisatie onderwatertalud het Scheur conform Beoordeling Zettingsvloeiing doorsnede 101, Fugro
- Ref 11. Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, TAW, 1 september 2004;
- Ref 12. Actuele waterdata, www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/waterdata
- Ref 13. Beleidsregel Medegebruik Delflandsedijk, Hoogheemraadschap van Delfland, 2011
- Ref 14. Handboek Risicozonering Windturbines (RVO, 2014)
- Ref 15. NPR9998:2018 Nederlandse Praktijkrichtlijn Aardbevingen
- Ref 16. Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 – bijlage III Sterkte en veiligheid, Ministerie van Infrastructuur en Milieu

A1 Bodemopbouw – gegevens Dinoloket

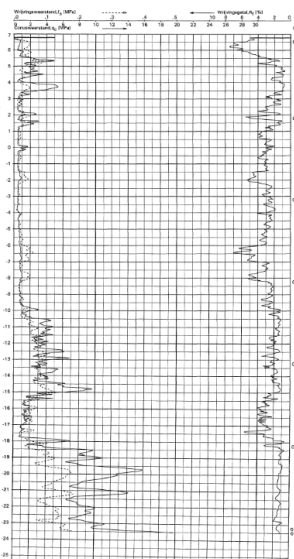




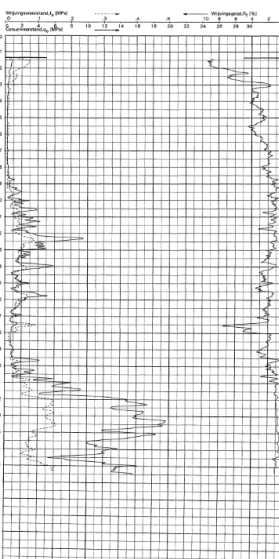
S37D00156



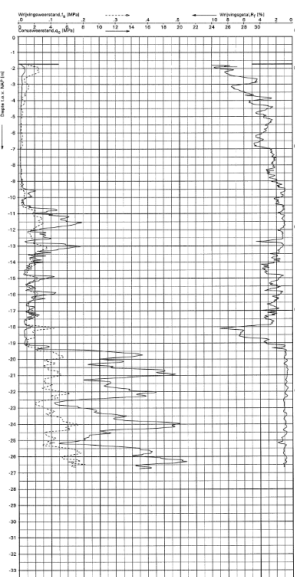
S37D00157



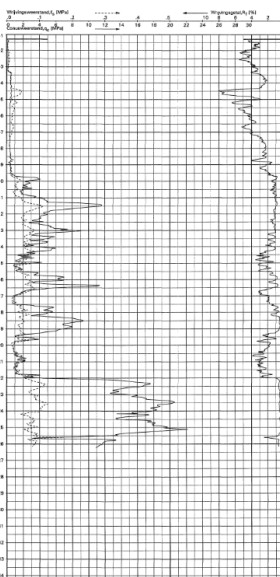
S37D00158



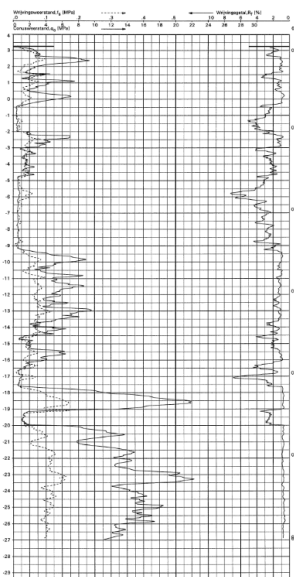
S37D00159



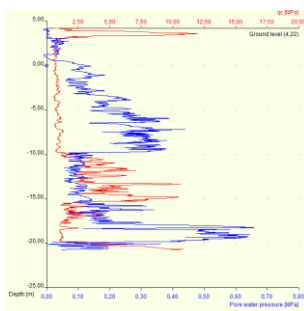
S37D00160



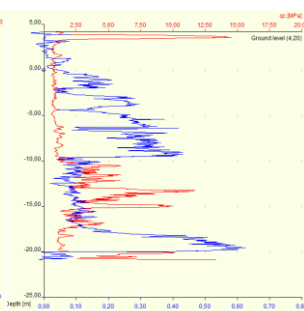
S37D00161



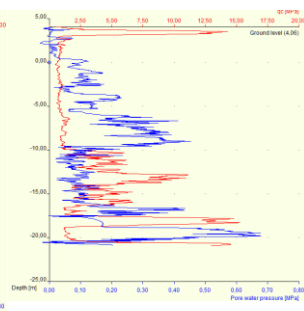
S37D00162



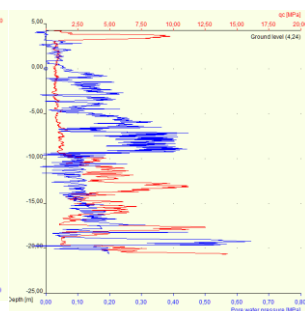
CPT0019268



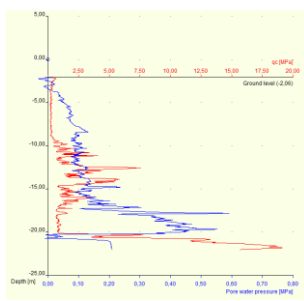
CPT0019269



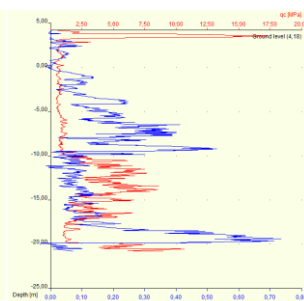
CPT0019272



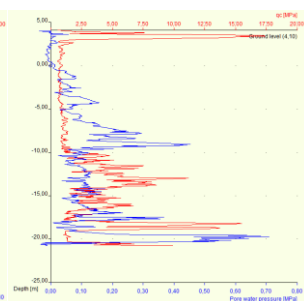
CPT0019273



CPT0019274

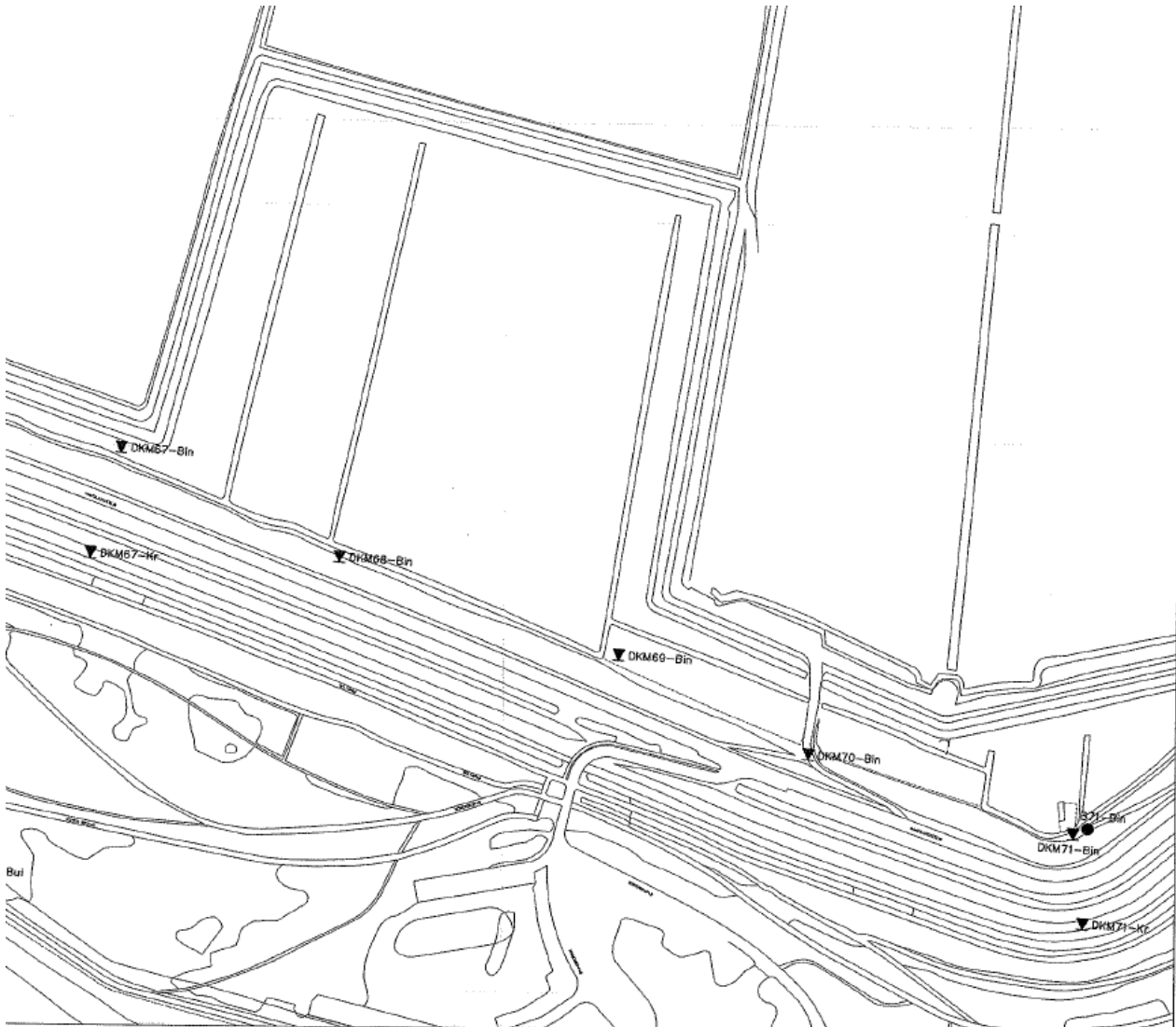


CPT0019275



CPT0019276

A2 Geotechnische informatie

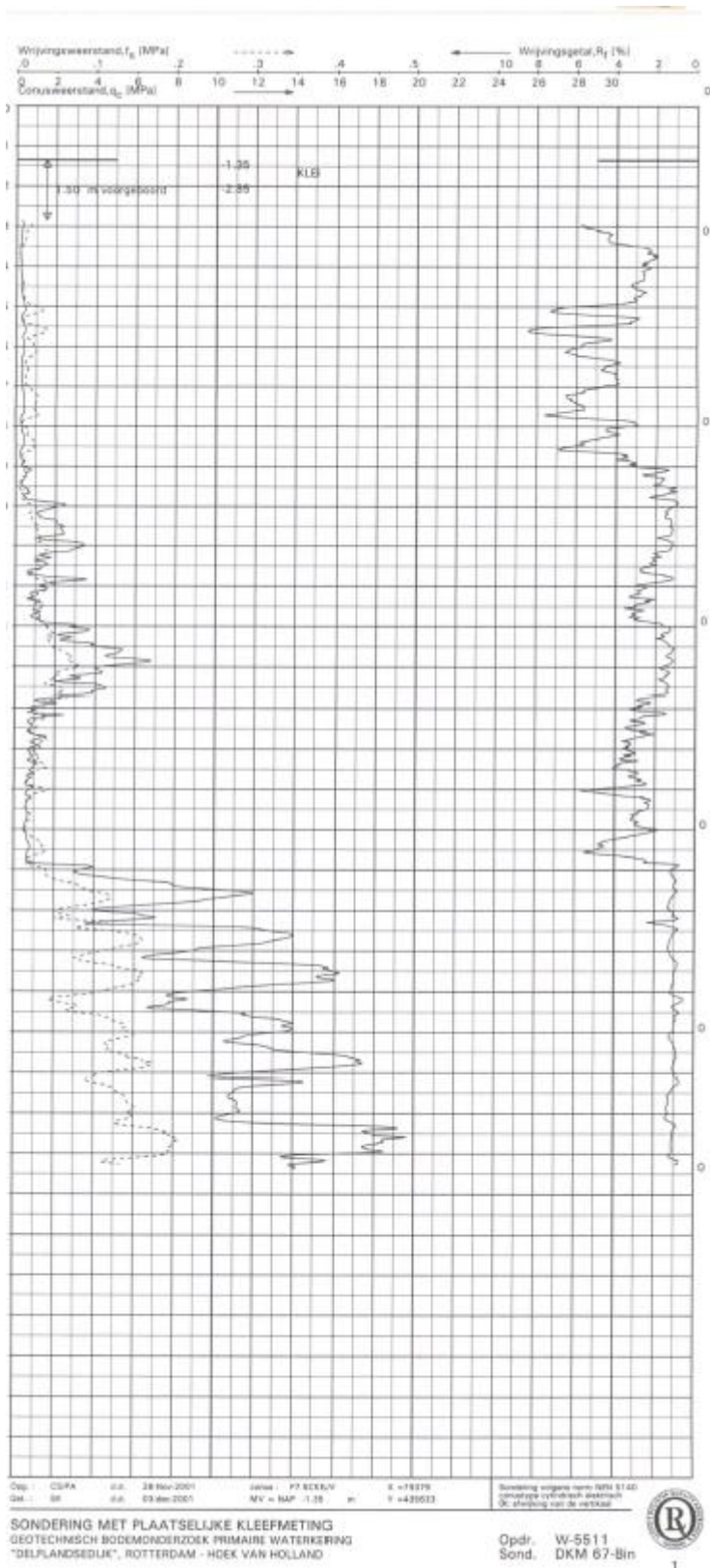


MONSTER NR	DIEPTE t.o.v. NAP [m]	BODEM PROFIEL	BESCHRIJVING BODEM PROFIEL	DIEPTE TEST t.o.v. NAP [m]	VOLUMIEK GEWICHT γ [kN/m ³]	VERZAD. γ_{sat} [kN/m ³]	DROOG γ_d [kN/m ³]	WATER- GEHALTE w [massa %]	PORIEN GEHALTE n [%]	VERZAD. GRAAD s [%]	ONGEDR. SCHUIF STERKTE f _{und} [kPa]	HOEK INWENDING ϕ [°]	COHESIE c' [kPa]	OPMERKINGEN
	-1,0		-0,72 Klei, uiterst siltig, matig humeus, puinhoudend, bruin											
	-2,0		-1,02 Klei, sterk siltig, zwak humeus, roest, grijs											
			-1,92 Klei, sterk siltig, zwak humeus, grijs											
1	-3,0		-2,72 Klei, sterk siltig, zwak humeus, grijs, met veensporen	-2,92	16,0		10,3	54,5	60,2	95,5				
2			-3,12 Klei, uiterst siltig, matig humeus, veenresten, grijs, bruin	-3,82	14,3		7,9	81,6	69,8	93,6				
3	-4,0		-3,92 Klei, sterk siltig, zwak humeus, veenresten, grijs											
4			-4,32 Klei, sterk siltig, matig humeus, veenresten, grijs, bruin											
5	-5,0		-4,67 Veen (mineraalarm), bruin	-4,92	9,8		2,2	348,2						
6			-5,22 Klei, sterk siltig, matig humeus, veenresten, grijs, en enkel veenlaagjes											
7	-6,0		-5,52 Veen (mineraalarm), bruin	-5,92	10,9		3,5	209,9						
8			-5,72 Klei, uiterst siltig, sterk humeus, veenresten, bruin, grijs											
9	-7,0		-5,92 Veen, zwak kleilig, bruin	-6,92	12,2		4,6	162,2						
10			-6,17 Klei, uiterst siltig, sterk humeus, veenresten, grijs, bruin											
11	-8,0		-6,32 Veen, zwak kleilig, bruin	-7,82	15,4		9,3	66,3	64,3	97,4				
12			-7,22 Klei, sterk siltig, zwak humeus, veenresten, grijs											
13	-9,0		-7,52 Klei, sterk siltig, zwak humeus, grijs, met zandinsjes	-8,62	16,3		10,8	51,4	58,6	96,4				
14			-8,72 Klei, uiterst siltig, zwak humeus, veenresten, grijs											
15	-10,0		-9,12 Klei, sterk siltig, zwak humeus, veenresten, grijs, en zandlaagjes	-9,62	18,1		13,8	30,9	46,9	92,6				
16			-9,52 Zand (zeer fijn), zwak siltig, grijs											
17	-11,0		-9,92 Zand (zeer fijn), zwak siltig, grijs, met enkele veeninsjes en kleilaagjes	-10,52	18,1		14,0	29,4	46,1	91,2				
18			-10,32 Zand (zeer fijn), matig siltig, grijs, met enkele kleinsporen											
19	-12,0		-10,72 Zand (zeer fijn), zwak siltig, grijs, met klei en veeninsjes	-11,57	18,4		14,7	25,2	43,6	86,5				
20			-11,12 Zand (zeer fijn), zwak siltig, grijs											
21	-13,0		-11,52 Zand (zeer fijn), zwak siltig, veenresten, grijs, en veen en kleinsjes	-12,57	18,2		14,1	29,7	45,9	92,6				
22			-13,32 Klei, uiterst siltig, zwak humeus, grijs, met veeninsjes en zandlaagjes	-13,42	17,2		12,9	33,1	50,4	86,3				
23	-14,0													
24	-15,0													
25			-15,32 Zand (zeer fijn), matig siltig, grijs, met kleinsjes	-15,22	16,8		12,8	31,2	50,6	80,7				
26			-15,52 Zand (matig fijn), zwak siltig, grijs											
27			-15,72 Klei, sterk siltig, grijs, met zandinsjes	-15,62	18,6		14,8	25,7	43,1	90,0				
28			-15,92 Einde boring											
29														
30														
31														
32														
33														

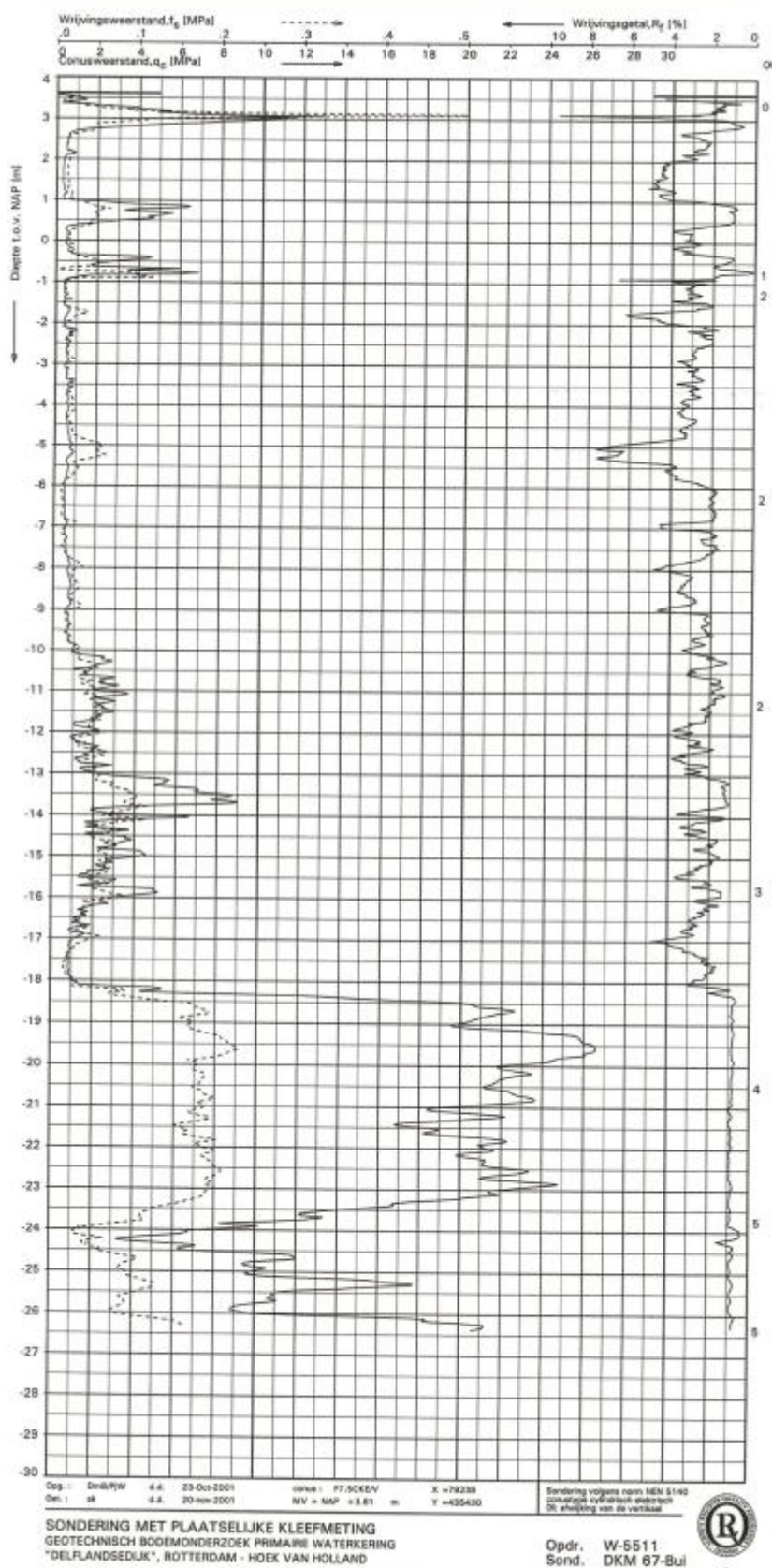
Uitvoering : 29-10-2001 Boring M : NV NAP : -0,72 m. GHG : MV - m. X : 79843,14
 Peiling PB : Boormaster : Jan Gemeten GWS : MV -0,86 m. GLO : MV - m. Y : 43315,76

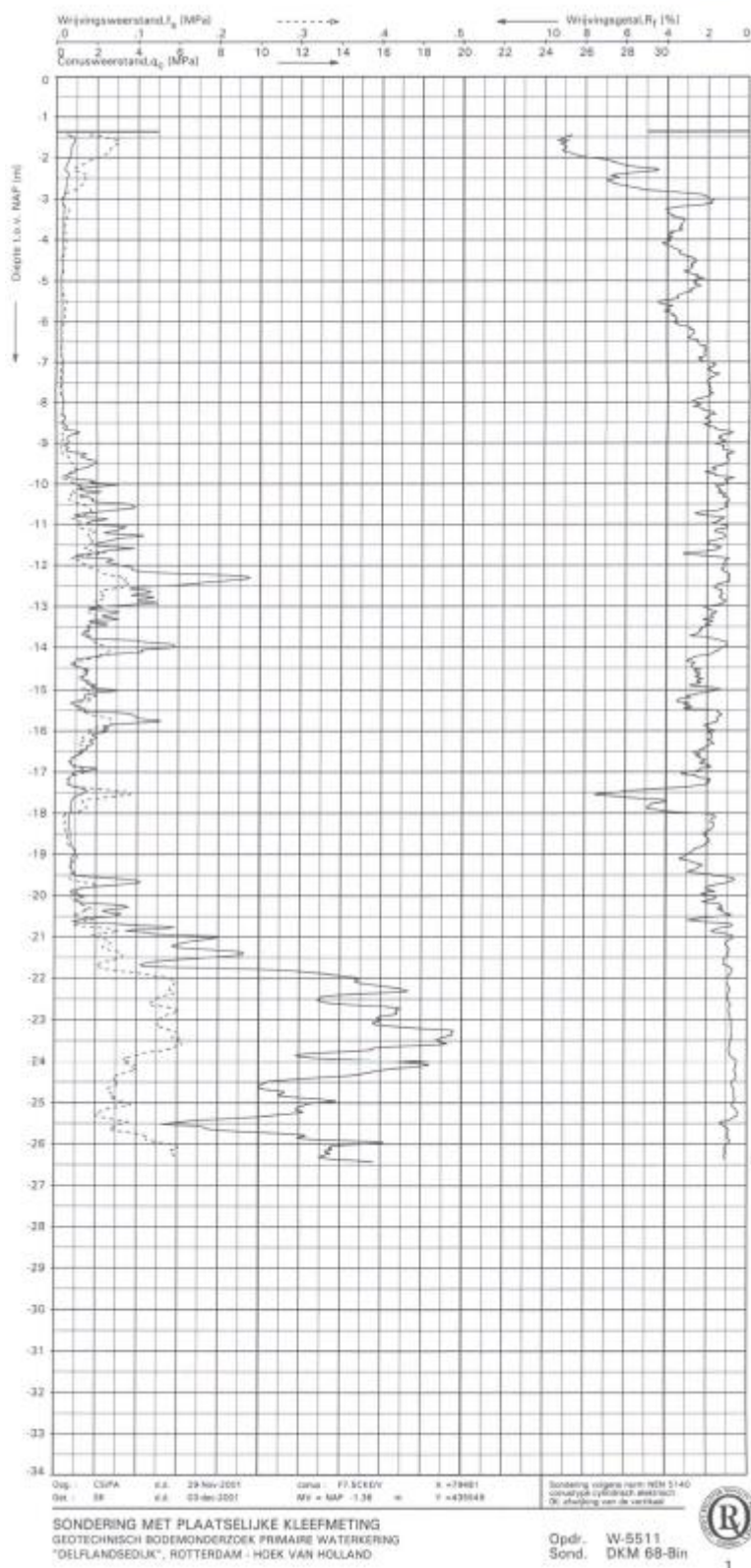
BORING VOLGENS NEN 5119
 GEOTECHNISCH BODEMONDERZOEK PRIMAIRE WATERKERING
 "DEFLANDEDIJK", ROTTERDAM - HOEK VAN HOLLAND

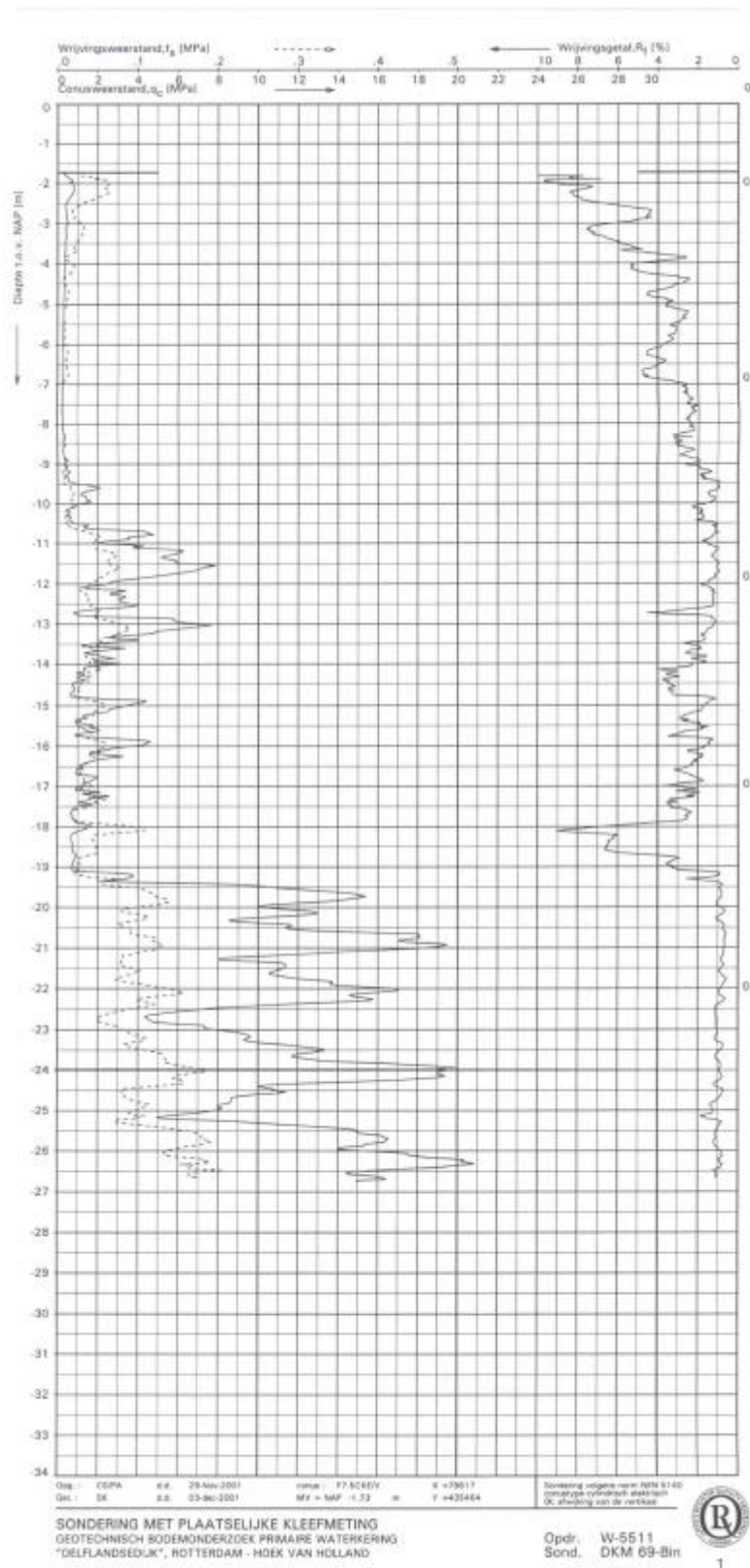
Opdr. : W-5511
 Boring : B 71-Bin

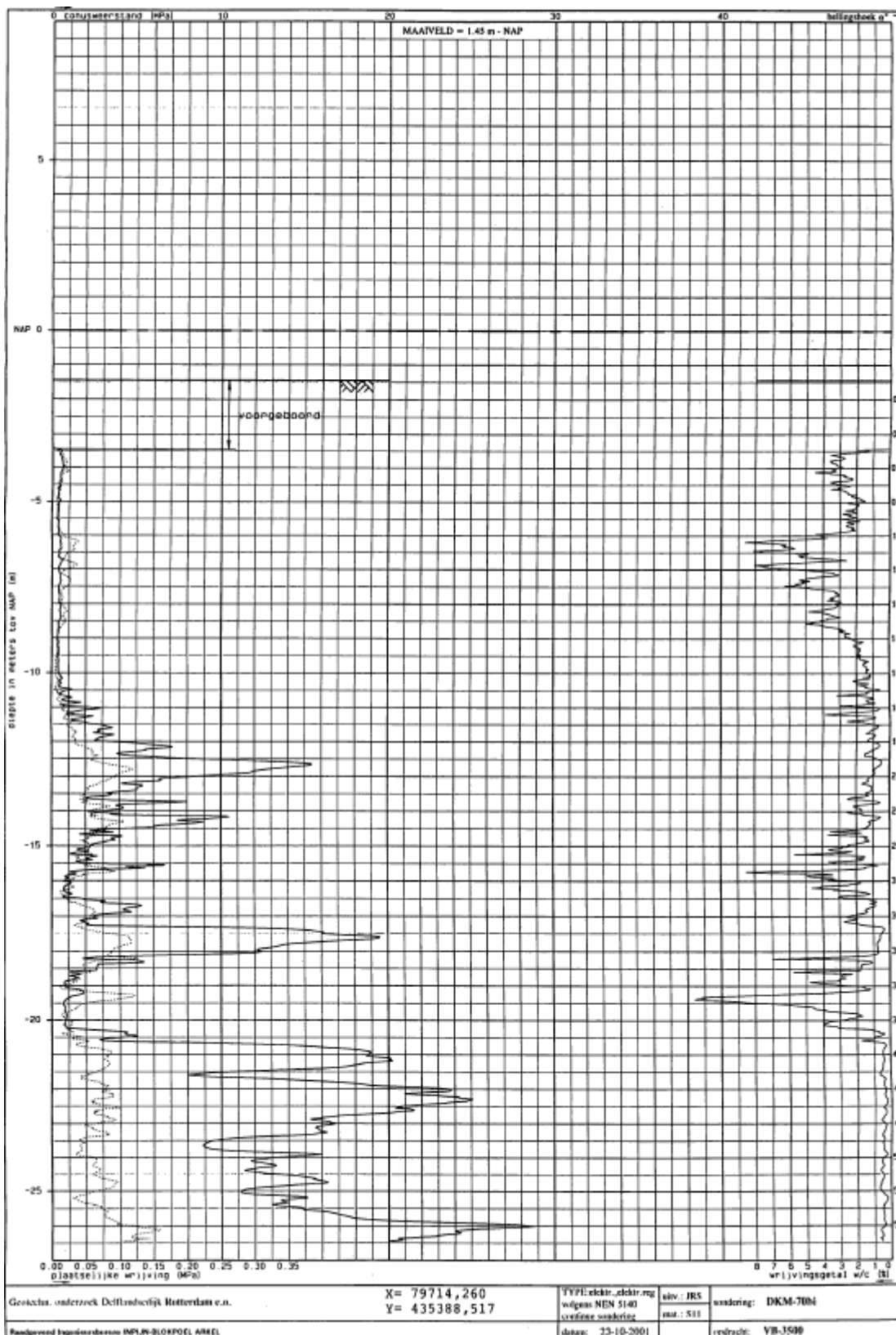


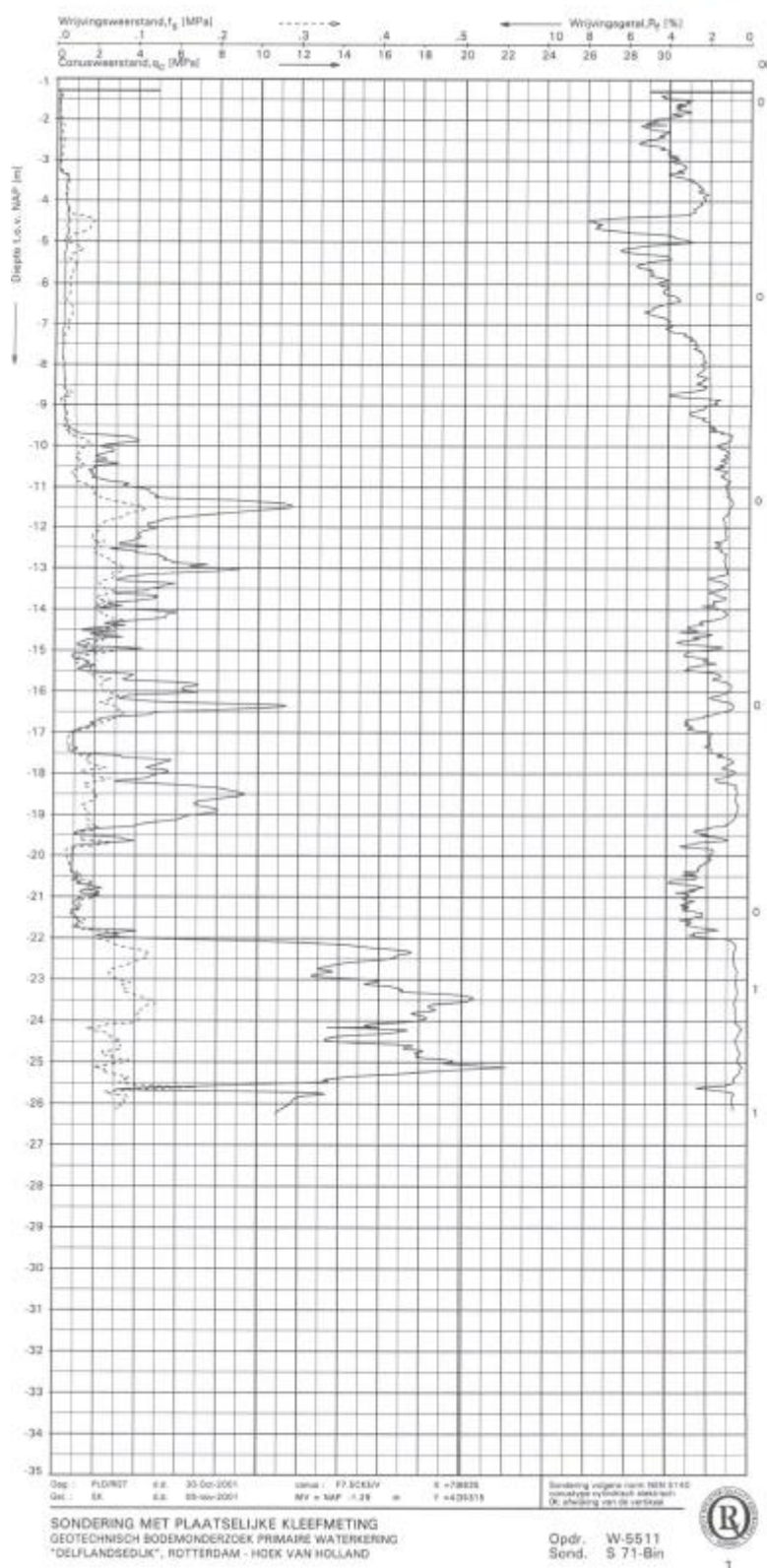




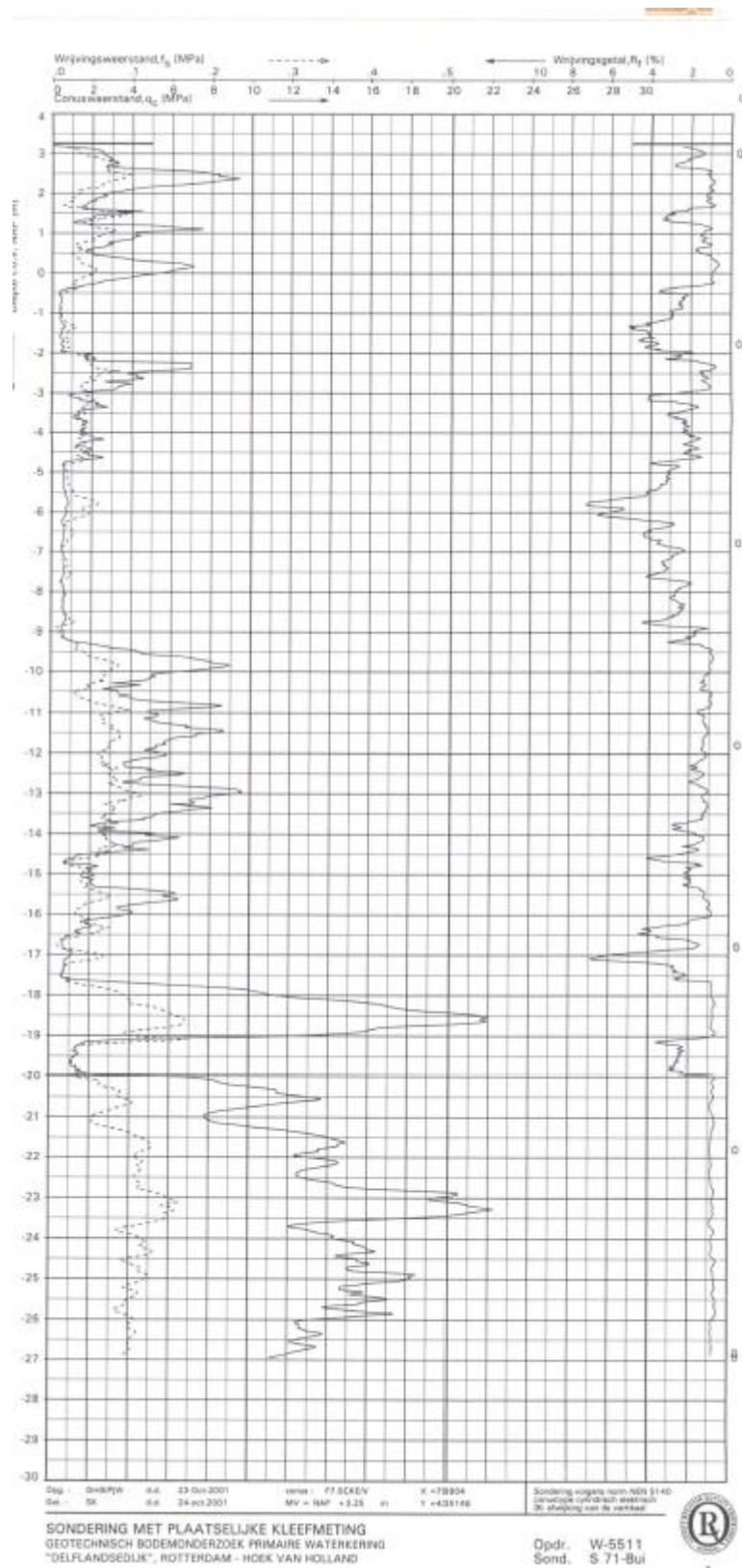








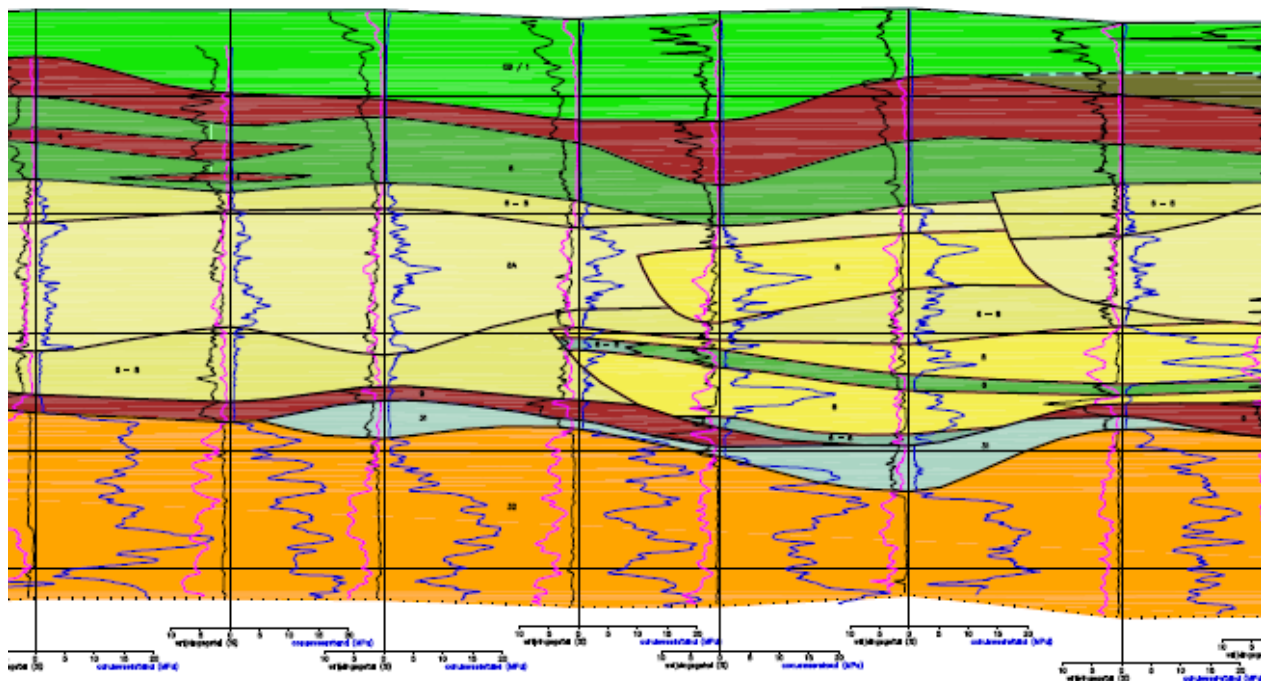
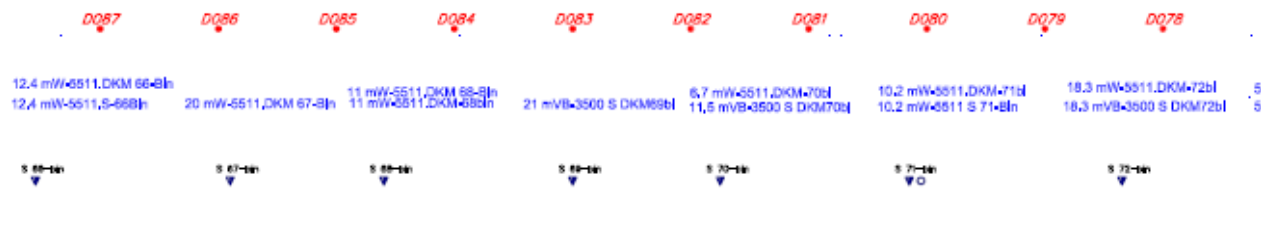




A3 Geotechnisch lengteprofiel

Uit [Ref 7]

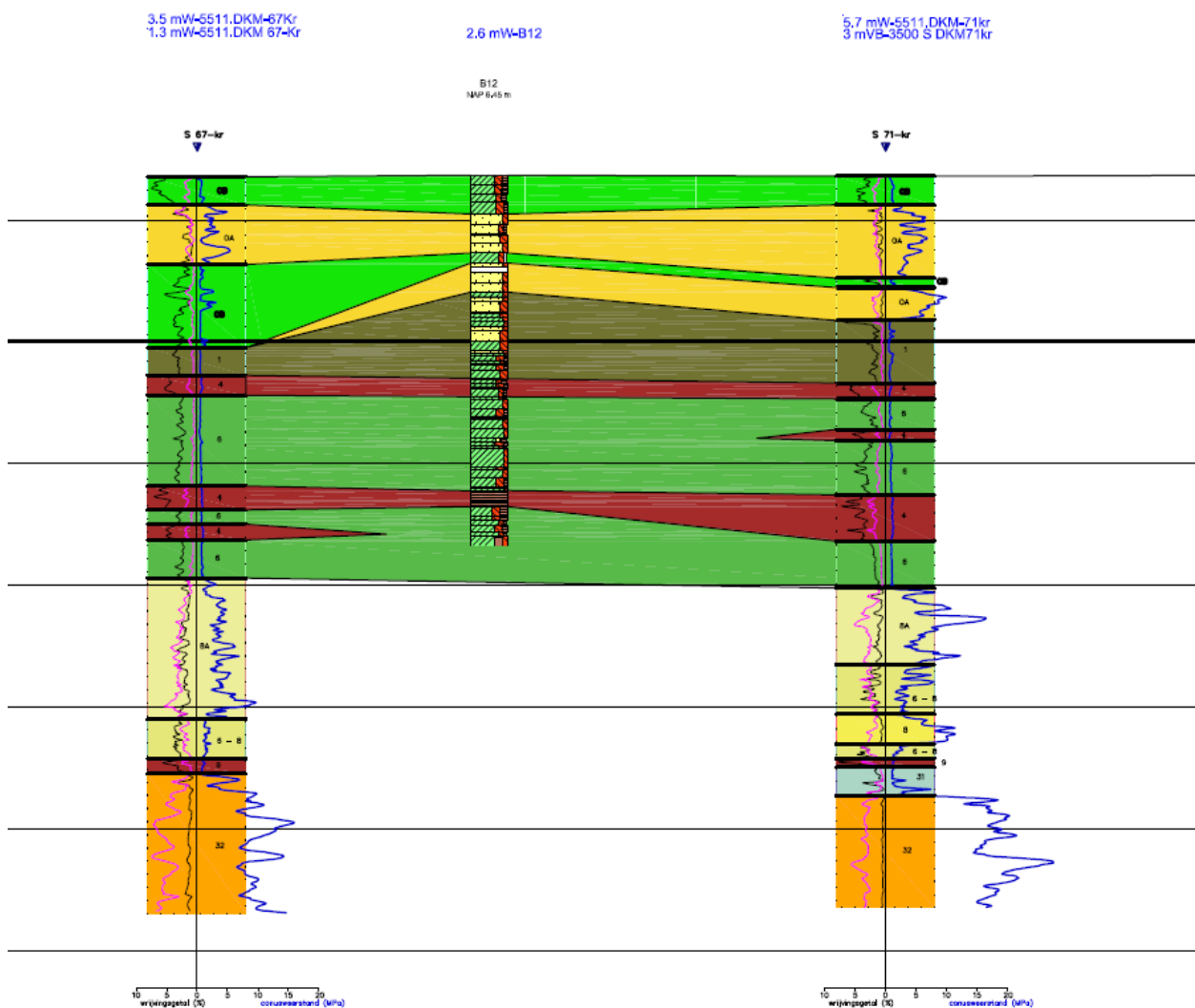
Binnendijks



LITHOSTRATIGRAFISCHE LEGENDA			
DA	Hoofdzakelijk zand	Anthropogene gronden	
DB	Hoofdzakelijk klei		
DC	Hoofdzakelijk veen		
1	Klei, siltig, vaak humeus, plaatselijk met zandlaagjes	Laagpakket van Walcheren (v.h. Duinkerke)	FORM. VAN NAALDWIJK
2	Klei, siltig met matig tot veel zandlaagjes		
1 - 3	Klei, zandig tot zand, kleilig		
3A	Zand met veel kleilaagjes		
3	Zand, vaak met kleilaagjes	Hollandveen	FORM. v. NIEUWKOOP
4	Veen		
15	Klei zwak siltig, humeus met veenstukjes		
6 16	Klei siltig tot sterk siltig, vaak humeus (v.h. Calais)		
7 17	Klei, siltig met matig tot veel zandlaagjes	(v.h. Gorkum)	FORM. VAN ECHTELD
8-15 18	Klei, zandig tot zand, kleilig		
8A 16A	Zand met veel kleilaagjes		
8 18	Zand, vaak met kleilaagjes		
9	Veen	Hollandveen	FORM. v. NIEUWKOOP
22A	Zand fijn	Laagpakket van Deilvliet	FORM. VAN TWENTE
31	Klei, siltig tot zandig	Laag van Wierden	FORM. VAN KREFTENHEYE
32	Zand matig tot grof, vaak grindig		
			Pleistoceen

Ter plaatse van kruin waterkering

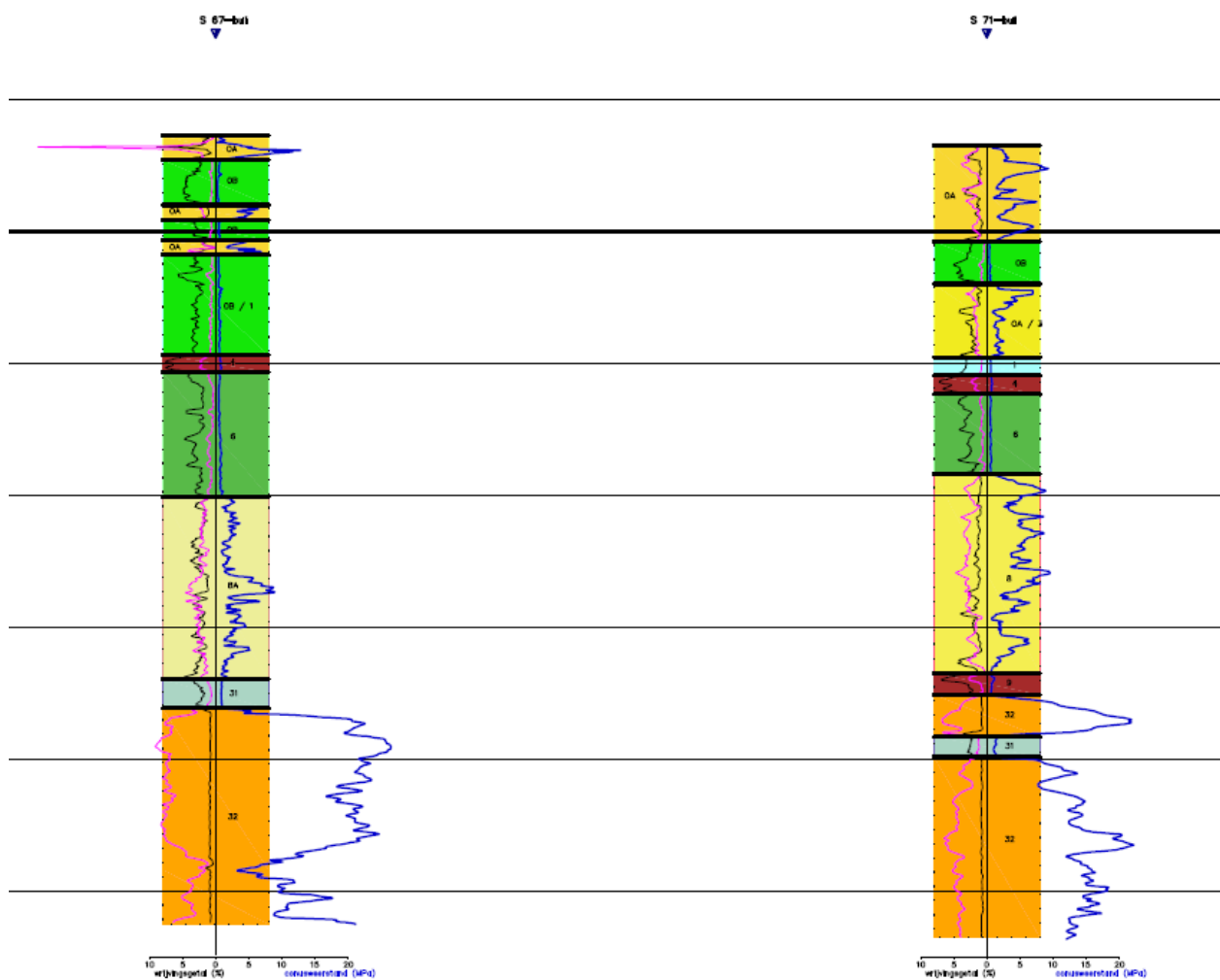
D087 D086 D085 D084 D083 D082 D081 D080 D079 D078



Buitendijks (ter hoogte van toekomstige windturbines)

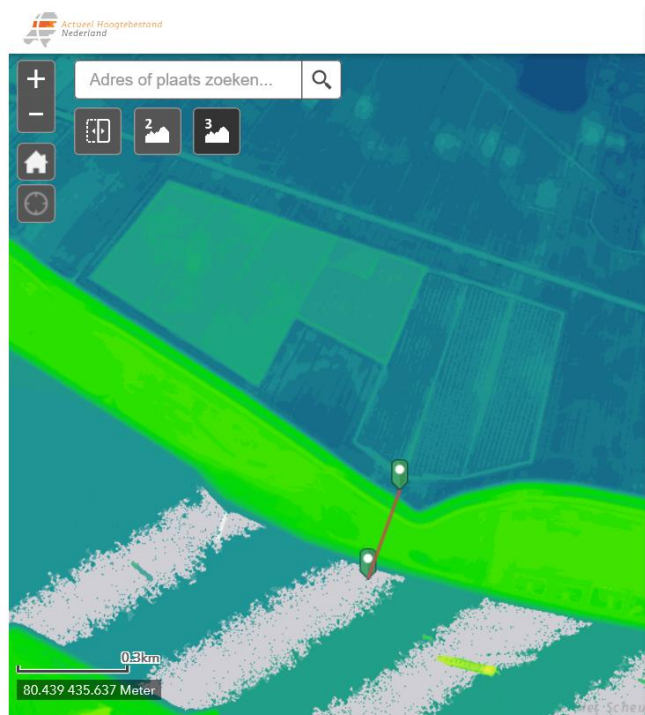
178,4 mW-5511 S 67-Bul
178,4 mW-5511,DKM-67Bul

112,5 mW-5511,DKM-71Bul
112,5 mW-5511 S 71-Bul

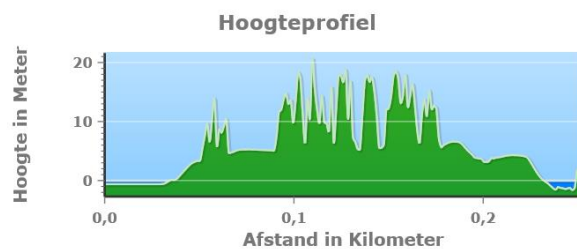


A4 Informatie dwarsprofielen

WT1 - AHN

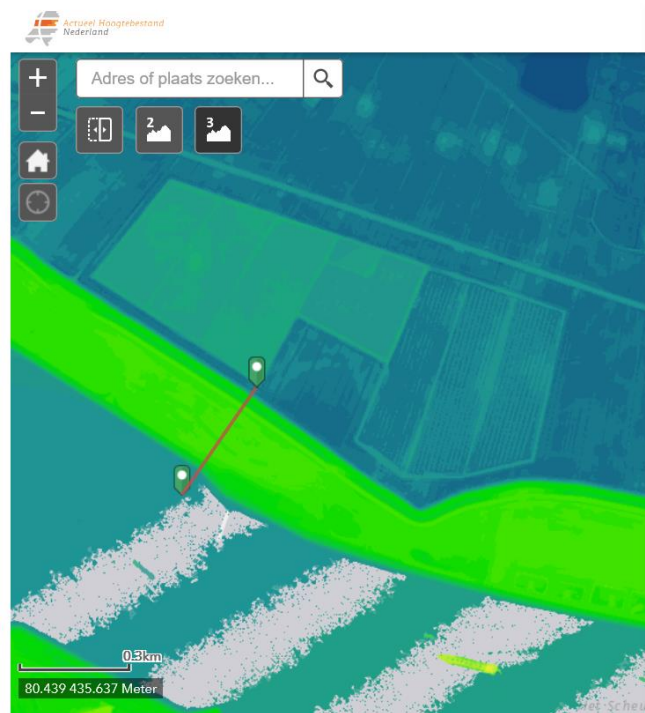


AHN3 - Hoogteprofiel

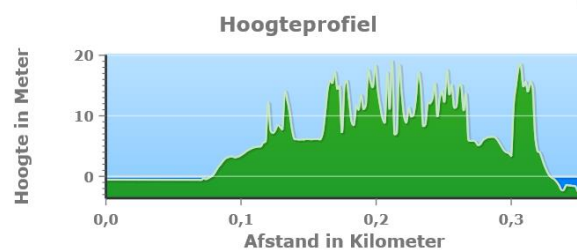


| Kilometer ▼

WT2 - AHN

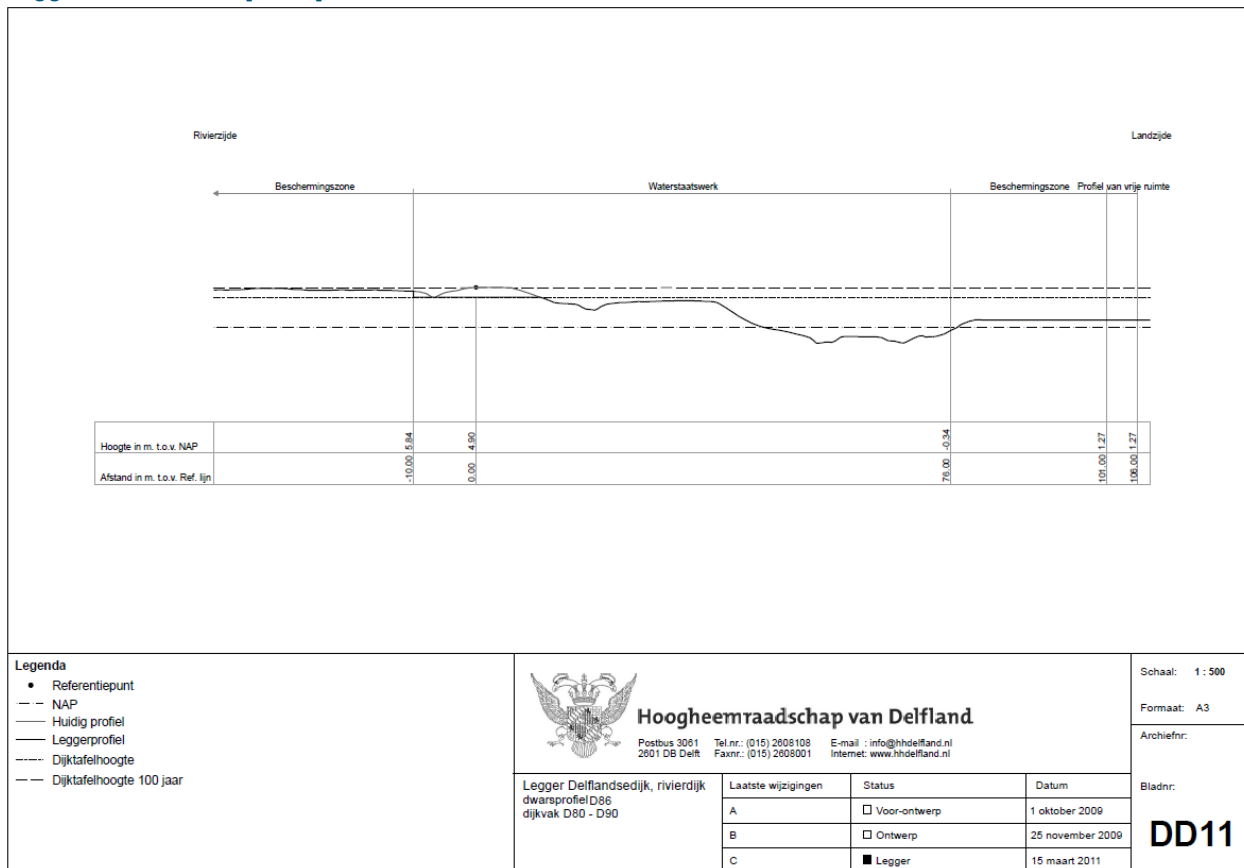


AHN3 - Hoogteprofiel



| Kilometer ▼

Legger HH Delfland [Ref 8]



Onderwateratalud [Ref 10]

WB12017 Delflandsedijk
Zettingsvloeiing
Dijkring: 14-3, Locatie: Vak 14-3-7, Profiel 101

Opdrachtnr.: 1214-0070-013

Bijlage

B

Schematisatie dijprofiel

Invoer Schematisatie Huidig Dijkprofiel

Huidig Dijkprofiel	x	y
1. buitenkruin dijk	0.00	6.50
2. buitenkruin dijk	0.00	6.00
3. geulrand	100.00	6.00
4. teen onderwateratalud	240.00	-14.00
5. geulbodem	400.00	-14.00
6. geulbodem	400.00	-14.00
7. punt einde invoedszone	42.00	6.00

Gemiddelde waterstand	GW	0.13	[m t.o.v. NAP]
Laag waterstand	LLWS/OLW/O	-0.55	[m t.o.v. NAP]
Invoedszone	W	40.0	[m t.o.v. Buitenteen]
Beoordeelingsperiode	T	5	[jaar]

Voorbeeld zonder voorverbestoring

Invoer schematisatie bestoring

Invoer schematisatie bestoring	x	y
1. begin bestoring	96.00	-1.00
2. knik (optioneel)	96.00	-1.00
3. knik (optioneel)	96.00	-1.00
4. einde bestoring	120.00	-6.50

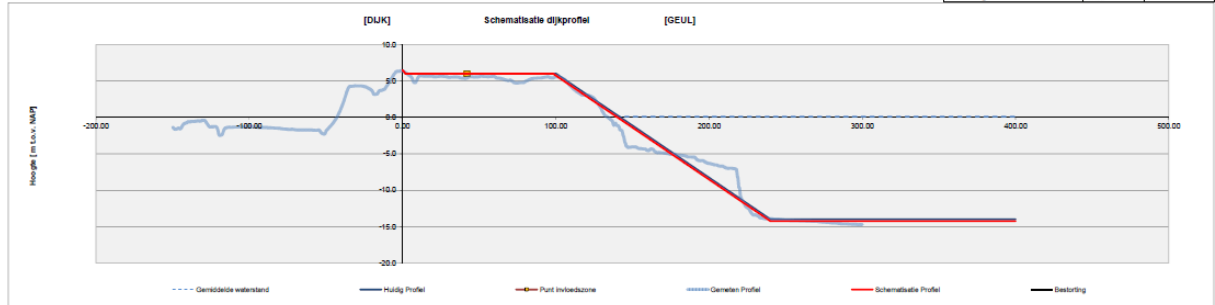
Uitvoer schematisatie bestoring

Uitvoer schematisatie bestoring	x	y
1. begin bestoring	0.00	0.00
2. knik (optioneel)	0.00	0.00
3. knik (optioneel)	0.00	0.00
4. einde bestoring	0.00	0.00

Invoer Schematisatie Toekomstig Dijkprofiel

Dijkprofiel na 5 jaar	x	y
1. buitenkruin dijk	0.00	6.50
2. buitenkruin dijk	0.00	6.00
3. geulrand	96.25	6.00
4. teen onderwateratalud	240.00	-14.25
5. geulbodem	400.00	-14.25
6. geulbodem	400.00	-14.25
7. punt einde invoedszone	42.00	6.00

Migratiesnelheid waterlijn	V _{waterlijn}	-0.35	[m/jaar]
Migratiesnelheid gemiddeld talud	V _{gemiddeld}	-0.35	[m/jaar]
Verticale migratiesnelheid teen	V _{water}	-0.05	[m/jaar]
Horizontale migratiesnelheid teen	V _{water}	-0.35	[m/jaar]
Lokale migratiesnelheid	V _{water}	0.35	[m/jaar]



A5 Afleiding hydraulische belastingen

In onderstaand overzicht zijn de hydraulische belastingen opgenomen welke gelden voor de locaties van de windturbines van WP Vlaardingen.

De waterstanden zijn afgeleid in het programma Hydra-NL 2.3.5, gebruik makende van de corresponderende databases die te downloaden zijn vanuit het WBI-software pakket

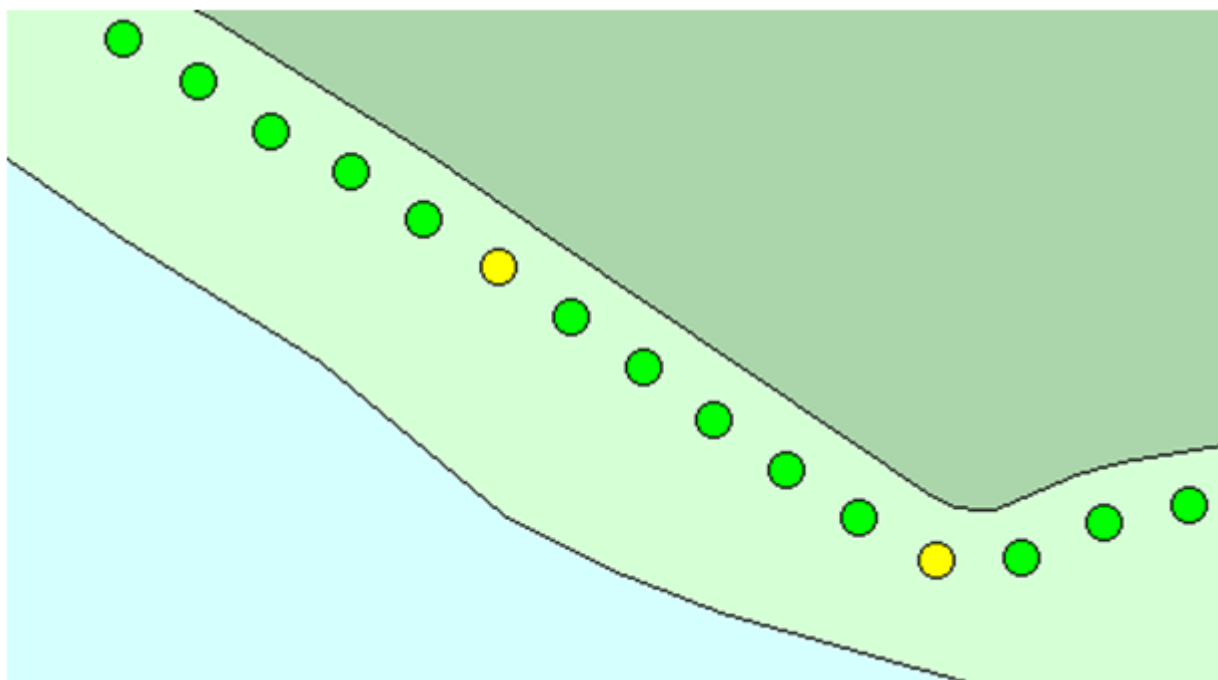
De norm is 1 op 10.000 (zowel afkeurkans als signaleringskans). De N-waarde voor het lengte-effect is 2. Dit betekent het volgende voor de doelkansen:

- Stabiliteitssporen: 1 op 10.000
- Hoogtetoets: 24% van 10.000 gedeeld door 2 (lengte-effect): 1 op 83.333

Aangehouden profiel voor hoogte:

- 1 op 3
- 220gr tov N
- 1 en 10 l/s/m overslageis

Met Hydra-NL de volgende hydraulische uitvoerpunten:



WT1 (links): 014-3_0108_1_NW_km1015

WT2 (rechts): 014-3_0114_1_NW_km1015

Dit levert de volgende resultaten voor 2050:

	WT1	WT2
10.000 jaar waterstand	3.79m+NAP	3.80m+NAP
83.333 jaar HBN (10 l/s/m)	5.28m+NAP	5.51 m+NAP
83.333 jaar HBN (1 l/s/m)	6.25 m+NAP	6.62 m+NAP

10 l/s/m is gangbaar. Ter gevoeligheid is 1 l/s/m ook aangehouden.

Navolgende overzicht toont de waterstanden voor verschillende terugkeertijden:

WT1:

Terugkeertijd (jaren)	Waterstand (m+NAP)
10	3.027
30	3.200
100	3.338
300	3.456
1000	3.555
3000	3.661
10000	3.791
30000	3.980
100000	4.288

WT2:

Terugkeertijd (jaren)	Waterstand (m+NAP)
10	3.039
30	3.209
100	3.346
300	3.463
1000	3.562
3000	3.667
10000	3.796
30000	3.984
100000	4.291

Algemene gegevens

slotgemiddelden 1991.0				waarden maansverloop			gemiddelde over- en onderschrijdings-frequentie per jaar			
type tij	HW-stand	LW-stand	tijverschil	type tij cq grootheid	HW	LW	overschrijding hoogwaterstanden		onderschrijding laagwaterstanden	
							frequentie	stand	frequentie	stand
gem. springtij	122	-48	170	gem. springtij	2.51	10.15	1x per 10.000 jaar	340	1x per 10 jaar	-150
gem. doodtij				gem. doodtij	2.32	8.38	1x per 1.000 jaar	325	1x per jaar	-125
gem. tij	106	-50	156	gem. havengetal	2.43	10.07	1x per 100 jaar	309		
gem. doodtij	99	-45	144	gem. duur rijzing	5.01		1x per 10 jaar	281		
				gem. duur daling	7.24		1x per 2 jaar	248	OLW 1991.0	-80
gem. waterstand:	13						(grenspijl)			
							1x per jaar	237		
							maatgevende waarde 340			
							(Delfland, 1x per 10.000 jaar)			

afvoer Lobith	gemiddeld tij		tijverschil	gemiddeld havengetal	
	HW	LW		HW	LW
984 m³/s	99	-53	152	2.45	10.17
2200 m³/s	106	-50	156	2.43	10.07
6800 m³/s	107	-51	158	2.36	10.17
10000 m³/s	115	-50	165	2.30	10.17

3 jan 1976 283 cm hoogst bekende waarde (periode 1971...1990)

22 jan 1984 -156 cm laagst bekende waarde (periode 1971...1990)

21 nov 1971 296 cm maximale rijzing (periode 1971...1990)

4 jan 1976 280 cm maximale daling (periode 1971...1990)

Jaar- en tienjaarlijkse waarden

jaar of tijdvak	hoogwater					laagwater					gemiddelde waarden			tijver- schil
	hoogste	datum	gem.	laagste	datum	hoogste	datum	gem.	laagste	datum	water- stand	halftij		
1981	225	24 nov	110,6	21	28 feb	85	24 nov	-50,7	-128	11 jan	15,7	29,9	161,3	
1982	222	16 dec	103,5	-20	19 dec	58	16 nov	-50,2	-129	19 dec	14,4	26,7	153,7	
1983	253	2 feb	105,9	9	14 nov	131	2 feb	-49,4	-121	17 feb	15,9	28,3	155,2	
1984	228	4 jan	102,1	31	13 jan	98	3 jan	-53,0	-156	22 jan	12,2	24,6	155,1	
1985	215	6 nov	99,0	15	19 nov	106	6 nov	-54,9	-134	19 nov	11,7	22,0	153,9	
1986	218	15 jan	102,7	28	20 mrt	82	15 jan	-51,7	-133	31 jan	13,6	25,5	154,4	
1987	204	21 nov	105,8	16	9 mrt	48	20 nov	-51,4	-133	15 jan	15,0	27,2	157,1	
1988	222	24 dec	110,3	14	13 feb	72	5 dec	-45,7	-125	19 mrt	20,0	32,3	156,0	
1989	257	14 feb	102,8	41	div	39	9 nov	-48,2	-126	5 apr	15,5	27,3	151,0	
1990	256	27 feb	106,6	28	25 dec	113	12 dec	-48,0	-134	25 dec	17,2	29,3	154,6	
1981/90	257	14 feb 89	104,9	-20	19 dec 82	131	2 feb 83	-50,3	-156	22 jan 8	15,1	27,3	155,3	

Bijzonderheden:

1813 Aanvang waarnemingen.
1 sep 1874 Peilschrijver geplaatst.
23 jun 1967 DNM geplaatst.

A6 Controle opbarsten

Uit [Ref 1]

Controle opbarsten indien geen zandlaag aanwezig is direct onder de dijk.

Het optredende stijghoogteverschil over de deklaag $\Delta\phi$ volgt uit:

$$\Delta\phi = \phi_{exit} - h_{exit} = (h - h_{exit}) r_{exit} \quad (4.6)$$

Het kritieke stijghoogteverschil $\Delta\phi_{c,u}$ volgt uit:

$$\Delta\phi_{c,u} = \frac{D_{deklaag}(\gamma_{sat} - \gamma_{water})}{\gamma_{water}} \quad (4.7)$$

waarmee in het ontwerp de volgende verificatie wordt uitgevoerd:

$$\Delta\phi \leq \frac{\Delta\phi_{c,u}}{\gamma_{up} \gamma_{b,u}} \quad (4.8)$$

Waarin:

- ϕ_{exit} Stijghoogte in de watervoerende laag bij uittredepunt (m+NAP)
- h_{exit} Freatisch niveau, of hoogte van het maaiveld, bij uittredepunt (m+NAP)
- h Niveau van de buitenwaterstand met een kans van voorkomen gelijk aan de maximaal toelaatbare overstromingskans P_{max} (m+NAP)
- r_{exit} Damping- of responsfactor bij uittredepunt (-)
- $D_{deklaag}$ Laagdikte van de cohesieve deklaag (m)
- γ_{sat} Verzadigd volumiek gewicht van de cohesieve deklaag (kN/m³)
- γ_{water} Volumiek gewicht van water (kN/m³)

γ_{up} Veiligheidsfactor voor het deelfaalmecanisme opbarsten, deze is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis.

$\gamma_{b,u}$ Partiële factor voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen (schematiseringfactor) bij het deelfaalmecanisme opbarsten.

	WT1	WT2
ϕ_{exit}	+3,79	+3,80
h_{exit}	+3,0	+3,0
$\Delta\phi$	0,79	0,80
$D_{deklaag}$	(>) 10	(>) 10
$\Delta\phi_{c,u}$	6	6
$\frac{\Delta\phi_{c,u}}{\gamma_{up} \gamma_{b,u}}$	$\frac{6}{1,56 * 1,15}$	$\frac{6}{1,56 * 1,15}$
verificatie	$0,79 \leq 3,34?$ Ja, ok	$0,80 \leq 3,34?$ Ja, ok

A7 Analyse zettingsvloeiing

Uit de resultaten van het beschikbaar grondonderzoek en de geotechnische lengteprofielen blijkt de volgende bodemopbouw op de projectlocatie:

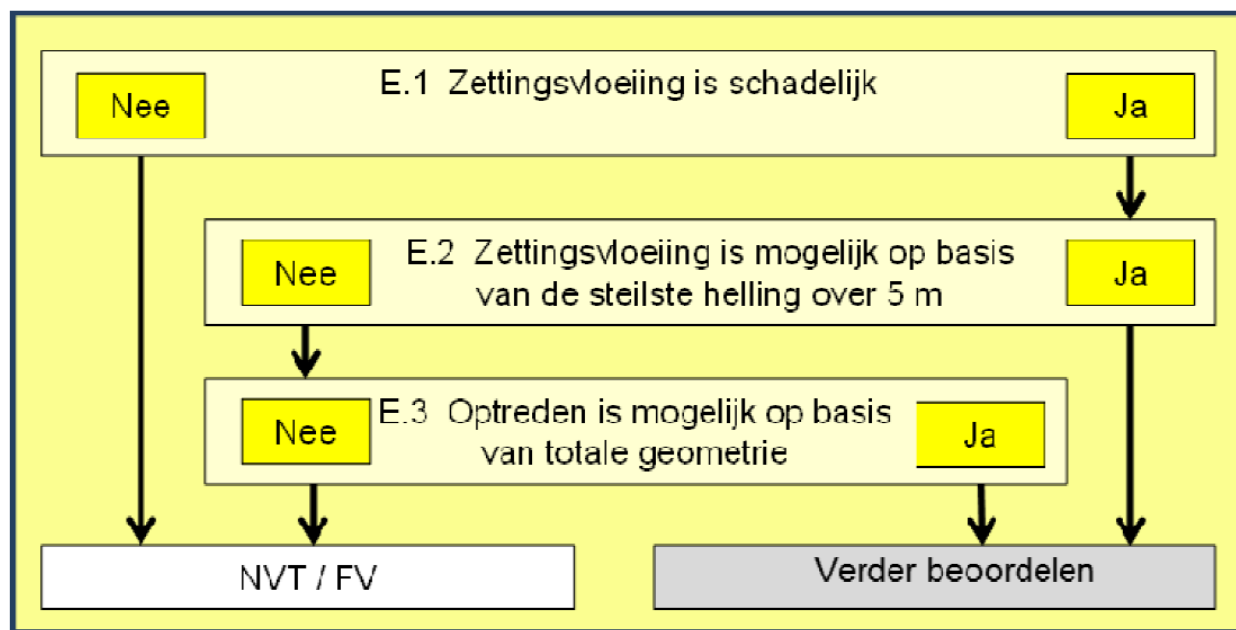
- Ter plaatse van het voorland, toplaag van aangebracht zand, 0 tot 6 m dik, maar veelal 2 tot 4 m dik;
- samendrukbare klei- en veenlagen tot een niveau van NAP -10 m;
- tussenzandlaag (siltig) aangetroffen, tot een niveau van circa NAP -17 m;
- (basis)veen;
- vast gepakt zand (Pleistoceen) vanaf ca. NAP -20 m.

De samendrukbare lagen zijn niet verwekingsgevoelig. Opgemerkt wordt dat het onderwatertalud tot een niveau van NAP -14,25 m reikt (ca. onderste 4 m zand).

Eenvoudige toets

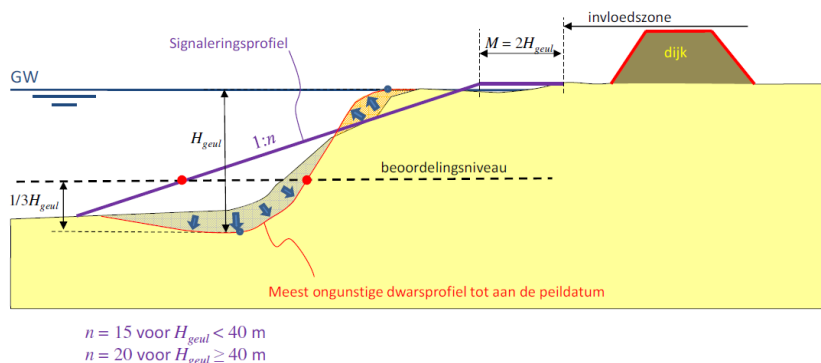
In eerste instantie is de eenvoudige toets conform [Ref 16] uitgevoerd, waarbij er vanuit wordt gegaan dat de gehele vooroever uit verwekingsgevoelige- en bresvloeiingsgevoelig zand bestaat. Dit is, zeker voor de te beschouwen locaties, een (zeer) conservatieve aanname.

Het toetsschema van de eenvoudige toets en te volgen stappen zijn in de volgende figuur opgenomen.



Figuur 10-1 Schema eenvoudige toets op zettingsvloeiingen [Ref 16, figuur 24-1]

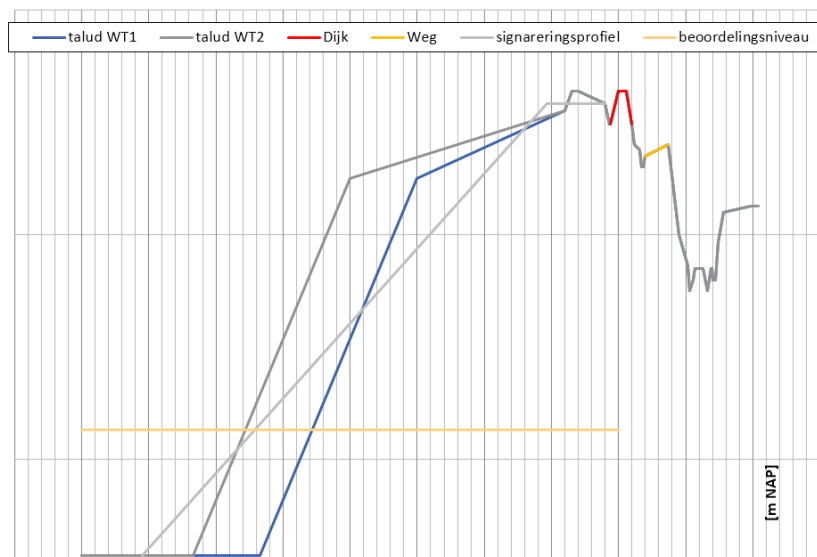
Stap E.1 Is zettingsvloeiing schadelijk voor het waterkerend vermogen van de kering?



Het signaleringsprofiel is geconstrueerd, waarbij de volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

- Invloedszone is 10 m (uittredepunt glijcirkel buitenwaarts ligt op slechts 1 m uit buitenteen);
- H_{geul} is 16,75 m (diepte geul is NAP -14,25 m, hoogte voorland NAP +2,5m);
- $M = 2 \cdot H_{geul} = 33,5$ m;
- Helling 1:15

Beoordelingsniveau is NAP -8,7 m



Het snijpunt van het beoordelingsniveau met het bestaande profiel ligt bij WT2 buitenwaarts van het signaleringsprofiel, bij WT1 niet.

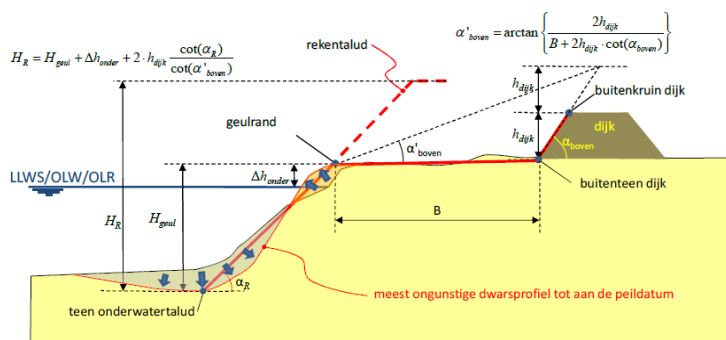
Bij WT2 is zettingsvloeiing niet schadelijk, de faalkans is verwaarloosbaar. Voor WT1 wordt doorgegaan met de volgende stap.

Stap E.2 Is de gemiddelde helling van het onderwatertalud steiler dan of gelijk aan 1:4?

Het onderwatertalud heeft een helling van 1:7, voor WT1 wordt doorgegaan met de volgende stap.

Stap E.3 Kan zettingsvloeiing optreden op basis van het totale profiel?

- 1) Kan verwekingsvloeiing optreden?



Is $\cot \alpha_R \leq (H_R/24)^{1/3}$?

Helling rekentalud ($\cot \alpha_R$) is 7, H_R is 24 m.

Er wordt niet voldaan aan de eis, verwekingsvloeiing kan niet optreden.

2) Kan bresvloeiing optreden?

- Maximaal toegestane helling is 1:3, hier wordt aan voldaan.
- De onbestorte hoogte van het onderwatertalud mag niet hoger zijn dan 40 m. Hier wordt aan voldaan.
- Voor de zandlagen in het onderwatertalud geldt dat $d_{50, \text{gemiddeld}} > 0,2 \text{ mm}$. Volgens de informatie van Delfland [Ref 10] is deze waarde 0,15 mm. Hier wordt niet aan voldaan.

Voor WT1 kan op basis van de eenvoudige toets niet tot een oordeel worden gekomen. Verder met gedetailleerde toets.

Gedetailleerde toets

Stap A Bepaal optredingskans zettingsvloeiing

$$F(ZV | S_i) = \left(\frac{5}{\cot \alpha_R} \right)^5 \cdot L_{vak} \cdot \frac{V_{lokaal}}{V_{zeeland}} \cdot 0,025 \cdot \left\{ 0,5 \cdot \left(\frac{H_R}{24} \right)^{2,5} \cdot \left(\frac{1}{10} \right)^{-10(0,05 + \psi_{sm, \text{jaar}})} + 0,5 \cdot \left(\frac{H_{geul}}{24} \right)^5 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-4}}{d_{50, \text{gemiddeld, jaar}}} \right)^5 \cdot F_{cohesivelayers} \right\}$$

Met :

En: $P(ZV | S_i) = 1 - e^{-F(ZV | S_i)}$

Voor WT2 geldt:

WT2-Scheur					
NWW					
kleilaagjes					
$\cot(\alpha_R)$	[-]	7,00	h_{dijk}	[m]	2,5
H_R	[m]	23,65	Strekking	[m]	3850
ψ_{sm}	[-]	-0,01	B	[m]	200
$d_{50, \text{gemiddeld}}$	[mm]	0,150	d geul	[m]	16,75
$F_{cohesivelayers}$	[-]	1,00	Δh_{onder}	[m]	3,05
V_{lokaal}	[m/jaar]	0,35	H	[m]	27,85
$V_{zeeland}$	[m/jaar]	1,00			
h_{onder}	[m]	22,9	$F(ZV S_i)$	[/m/jaar]	0,0020
h_{boven}	[m]	5	$F(ZV S_i)$	[/vak/jaar]	7,6E-03
$\cot(\alpha_{onder})$	[-]	7,00			
$\cot(\alpha_{boven})$	[-]	4,00	$P(ZV S_i)$	[%]	0,76%
$\cot(\alpha'_{boven})$	[-]	44,00			

Stap B Locatie specifieke bodemschematisatie gebruikt, $P(ZV)=0,76\%$ ($7,55 \cdot 10^{-3}$)

Stap C Overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte bepalen

$$L = ax - Db$$

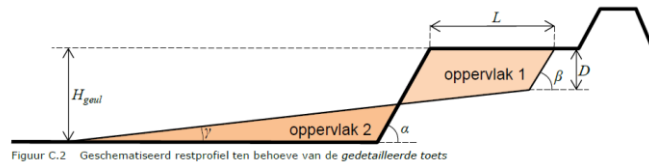
Met:

$$x = \frac{-cH + \sqrt{(cH)^2 + (1-c) \left(\frac{D^2 b}{a} + H^2 c \right)}}{(1-c)}$$

$$a = \cot \gamma - \cot \alpha$$

$$b = \cot \gamma - \cot \beta$$

Met:



WT2-Scheur		
NWW		
H	[m]	16,75
c	[-]	1,4
D	[m]	7,20
b	[-]	13,9
a	[-]	9,80
x	[-]	11,0
cotan(y)	[-]	16,8
cotan(b)	[-]	2,9
cotan(a)	[-]	7,00
Voor WT1: L	[m]	7,4

Voor WT1:

Ltoelaatbaar is 200 m

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L(\cot \gamma(\beta)) = 0$$

$$\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta \sigma_{\cot \gamma})$$

P(L>Ltoelaatbaar/ZV) is berekend met

En door beta te variëren.

$$P(L>L_{\text{toelaatbaar}}/ZV) = 1,66 \cdot 10^{-5}$$

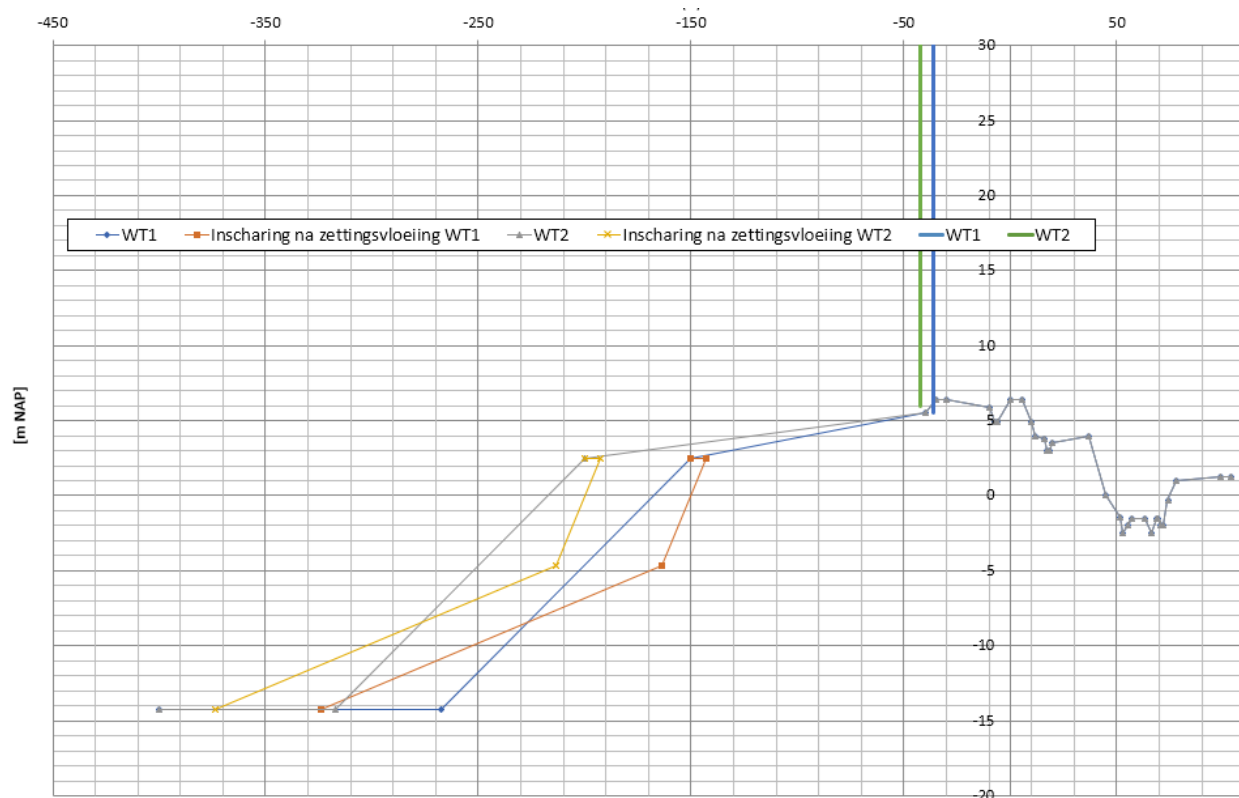
Stap D Bepaal kans op overschrijding van toelaatbare inscharingslengte door een zettingsvloeiing per dijkvak per jaar:

$$P(L>L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{traject}} = P(ZV) * P(L>L_{\text{toelaatbaar}}/ZV) = 7,55 \cdot 10^{-3} * 1,66 \cdot 10^{-5} = 1,26 \cdot 10^{-7}$$

$$\text{Peis,traject} = P_{\text{voorland}} * L_{\text{traject}} = 1 \cdot 10^{-2} * 16,5 = 0,165$$

$$\text{Peis,traject} = 0,165 > P(L>L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{traject}} = 1,26 \cdot 10^{-7}$$

Voor WT1 geldt dat aan de eis wordt voldaan



A8 Resultaten stabiliteitsberekeningen

Samenvatting resultaten stabiliteitsberekeningen

WP Vlaardingen						eis stabfactor	STBI	STBU	
Veiligheidsanalyse			MTK	0,0001	[1/jaar]		1,48	1,39	
			Peis:l (STBI)	3,364E-07	[1/jaar]	modelfactor=	1,11		
resultaten stabiliteitsberekeningen			Peis:l (STBU)	3,364E-06	[1/jaar]	normaliseringsfactor=	1,15		
Profiel	faalmc	fase	WS Sche	WS AL	SH zand BIT	hor.trilling	vert.trilli	kruinbelasti	stab.fac
WT1	STBI	huidig-dagelijks	0,5	-2,5	0,5	0	0	0	1,79
WT1	STBI	huidig-extreem	3,80	-2,5	3,80	0	0	13,3	1,46
WT1	STBU	huidig-dagelijks	0,50	-2,5	0,50	0	0	0	4,89
WT1	STBU	huidig-extreem	2,80	-2,5	2,80	0	0	13,3	3,46
WT1	STBI	bouw	0,50	-2,5	0,50	0,02g	0,02g	0	1,62
WT1	STBU	bouw	0,50	-2,5	0,50	0,02g	0,02g	0	4,43
WT1	STBI	gebruik-dagelijks	0,50	-2,5	0,50	0,004g	0,004g	0	1,75
WT1	STBI	gebruik-noodstop	3,80	-2,5	3,80	0,025g	0,0125g	13,3	1,32
WT1	STBI	gebruik-bladen stil	3,80	-2,5	3,80	0,016g	0,008g	13,3	1,37
WT1	STBI	gebruik-bladen draaiend	3,80	-2,5	3,80	0,008g	0,004g	13,3	1,41
WT1	STBU	gebruik-dagelijks	0,50	-2,5	0,50	0,004g	0,004g	0	4,79
WT1	STBU	gebruik-noodstop	2,80	-2,5	2,80	0,025g	0,0125g	13,3	3,16
WT1	STBU	gebruik-bladen stil	2,80	-2,5	2,80	0,016g	0,008g	13,3	3,26
WT1	STBU	gebruik-bladen draaiend	2,80	-2,5	2,80	0,008g	0,004g	0	3,35
WT1	STBI	sloop	0,50	-2,5	0,50	0,03g	0,015g	0	1,55
WT1	STBU	sloop	0,50	-2,5	0,50	0,03g	0,015g	0	4,22
WT2	STBI	huidig-dagelijks	0,50	-2,5	0,50	0	0	0	1,21
WT2	STBI	huidig-extreem	3,80	-2,5	3,80	0	0	13,3	1,04
WT2	STBU	huidig-dagelijks	0,50	-2,5	0,50	0	0	0	3,68
WT2	STBU	huidig-extreem	2,80	-2,5	2,80	0	0	13,3	2,48
WT2	STBI	bouw	0,50	-2,5	0,50	0,02g	0,02g	0	1,11
WT2	STBU	bouw	0,50	-2,5	0,50	0,02g	0,02g	0	3,27
WT2	STBI	gebruik-dagelijks	0,50	-2,5	0,50	0,004g	0,004g	0	1,19
WT2	STBI	gebruik-noodstop	3,80	-2,5	3,80	0,025g	0,0125g	13,3	0,95
WT2	STBI	gebruik-bladen stil	3,80	-2,5	3,80	0,016g	0,008g	13,3	0,98
WT2	STBI	gebruik-bladen draaiend	3,80	-2,5	3,80	0,008g	0,004g	13,3	1,01
WT2	STBU	gebruik-dagelijks	0,50	-2,5	0,50	0,004g	0,004g	0	3,59
WT2	STBU	gebruik-noodstop	2,80	-2,5	2,80	0,025g	0,0125g	13,3	2,25
WT2	STBU	gebruik-bladen stil	2,80	-2,5	2,80	0,016g	0,008g	13,3	2,33
WT2	STBU	gebruik-bladen draaiend	2,80	-2,5	2,80	0,008g	0,004g	0	2,41
WT2	STBI	sloop	0,50	-2,5	0,50	0,03g	0,015g	0	1,07
WT2	STBU	sloop	0,50	-2,5	0,50	0,03g	0,015g	0	3,11

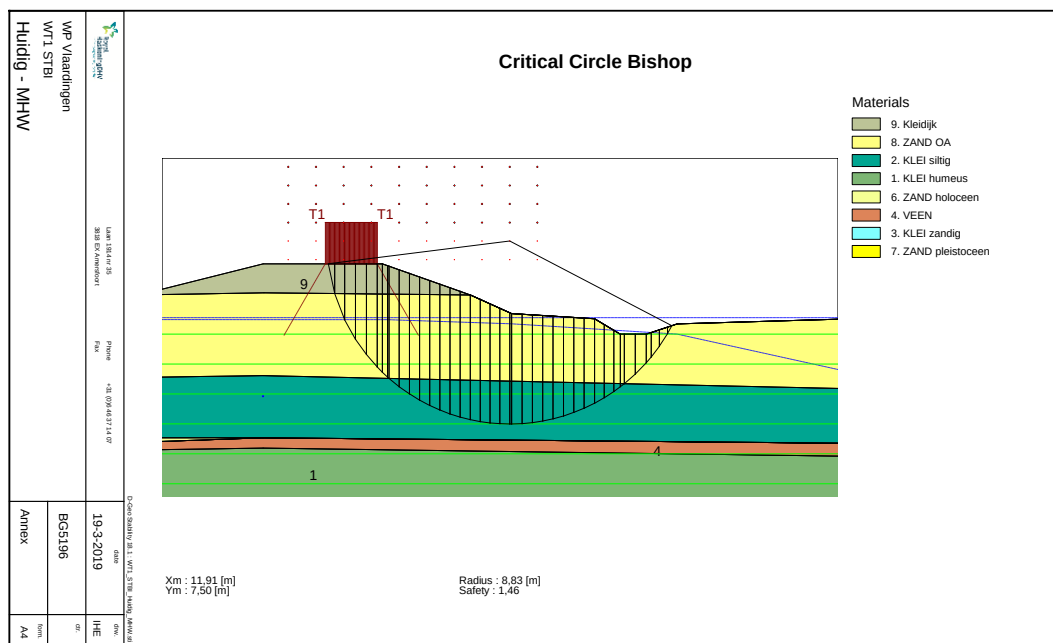
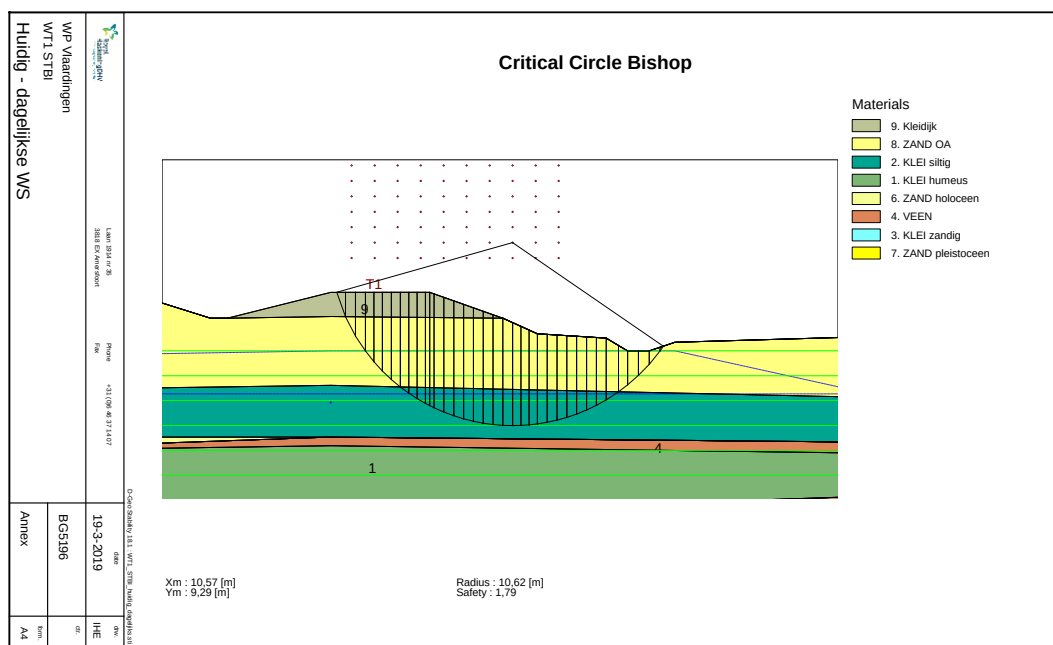
Bepaling additionele faalkans

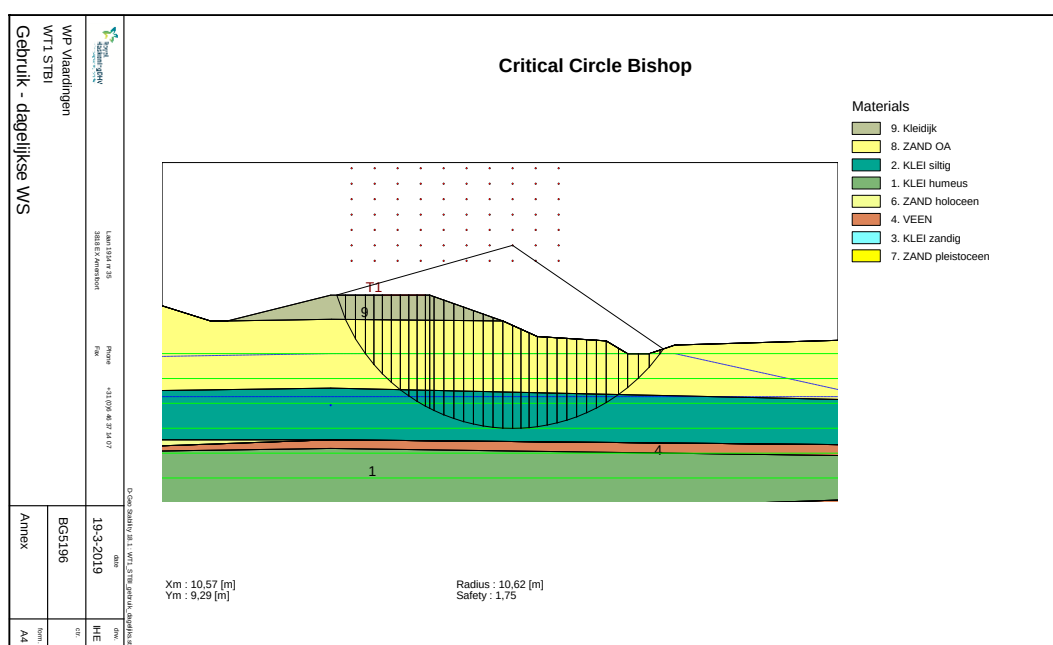
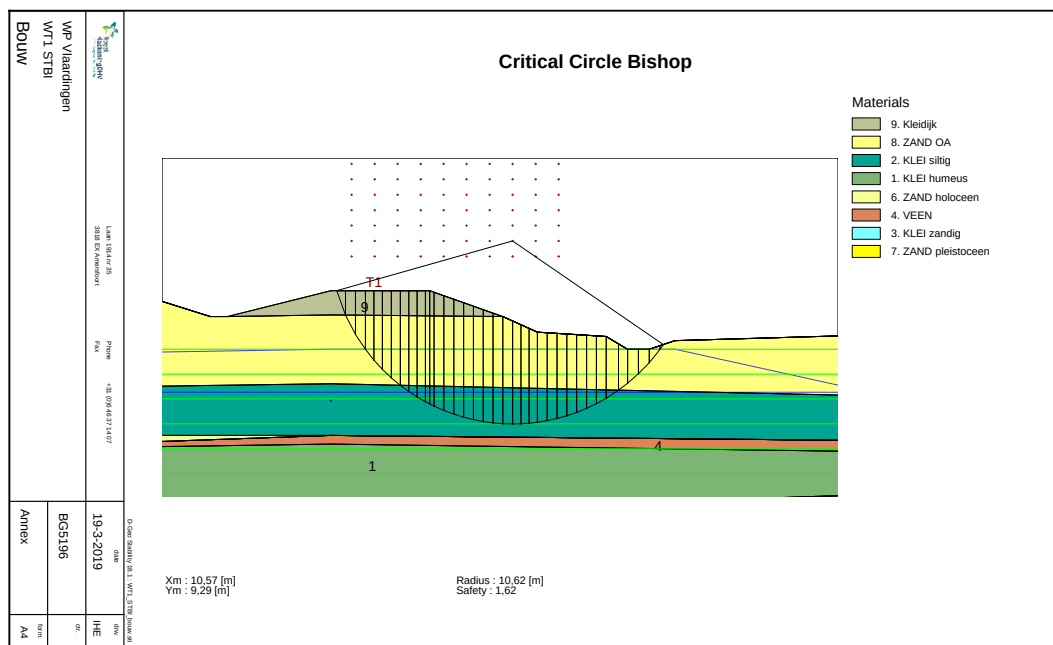
WP Vlaardingen										
Veiligheidsanalyse										
resultaten stabiliteitsberekeningen						default: 2 weken	1,17647E-05			
						onder voorwaarde: 1 week				
Profiel	faalmc	fase	$\gamma_{n,aanw}$	β_{aanw}	P_{aanw}	$P_{HERSTEL}$	$P \{H_W > H_{VL}\}$	P_{TOTAAL}	additional faalkans WT	
WT1	STBI	huidig-dagelijks	1,40227	6,61515	1,86E-11	3,85E-02	1,18E-05	8,40E-18		
WT1	STBI	huidig-extreem	1,14375	4,89168	5,00E-07	3,85E-02	1,18E-05	2,26E-13		
WT1	STBU	huidig-dagelijks	3,83079	22,80525	2,03E-115	3,85E-02	1,18E-05	9,20E-122		
WT1	STBU	huidig-extreem	2,71054	15,33691	2,17E-53	3,85E-02	1,18E-05	9,80E-60		
WT1	STBI	bouw	1,26910	5,72730	5,10E-09	3,85E-02	1,18E-05	2,31E-15	0,0000007%	
WT1	STBU	bouw	3,47043	20,40285	7,89E-93	3,85E-02	1,18E-05	3,57E-99	0,0000000%	
WT1	STBI	gebruik-dagelijks	1,37094	6,40624	7,46E-11	3,85E-02	1,18E-05	3,37E-17	0,0000000%	
WT1	STBI	gebruik-noodstop	1,03408	4,16052	1,59E-05	3,85E-02	1,18E-05	7,18E-12	0,0021354%	
WT1	STBI	gebruik-bladen stil	1,07325	4,42165	4,90E-06	3,85E-02	1,18E-05	2,22E-12	0,0006587%	
WT1	STBI	gebruik-bladen draaiend	1,10458	4,63055	1,82E-06	3,85E-02	1,18E-05	8,25E-13	0,0002453%	
WT1	STBU	gebruik-dagelijks	3,75245	22,28299	2,70E-110	3,85E-02	1,18E-05	1,22E-116	0,0000000%	
WT1	STBU	gebruik-noodstop	2,47552	13,77013	1,93E-43	3,85E-02	1,18E-05	8,72E-50	0,0000000%	
WT1	STBU	gebruik-bladen stil	2,55386	14,29239	1,22E-46	3,85E-02	1,18E-05	5,52E-53	0,0000000%	
WT1	STBU	gebruik-bladen draaiend	2,62436	14,76242	1,28E-49	3,85E-02	1,18E-05	5,79E-56	0,0000000%	
WT1	STBI	sloop	1,21426	5,36172	4,12E-08	3,85E-02	1,18E-05	1,87E-14	0,0000055%	
WT1	STBU	sloop	3,30591	19,30610	2,39E-83	3,85E-02	1,18E-05	1,08E-89	0,0000000%	
WT2	STBI	huidig-dagelijks	0,94790	3,58603	1,68E-04	3,85E-02	1,18E-05	7,60E-11		
WT2	STBI	huidig-extreem	0,81473	2,69819	3,49E-03	3,85E-02	1,18E-05	1,58E-09		
WT2	STBU	huidig-dagelijks	2,88288	16,48589	2,32E-61	3,85E-02	1,18E-05	1,05E-67		
WT2	STBU	huidig-extreem	1,94281	10,21875	8,17E-25	3,85E-02	1,18E-05	3,70E-31		
WT2	STBI	bouw	0,86957	3,06377	1,09E-03	1,92E-02	1,18E-05	2,47E-10	0,0734948%	
WT2	STBU	bouw	2,56169	14,34461	5,76E-47	3,85E-02	1,18E-05	2,60E-53	0,0000000%	
WT2	STBI	gebruik-dagelijks	0,93224	3,48158	2,49E-04	1,92E-02	1,18E-05	5,64E-11	0,0167613%	
WT2	STBI	gebruik-noodstop	0,74422	2,22815	1,29E-02	1,92E-02	1,18E-05	2,93E-09	0,869911%	
WT2	STBI	gebruik-bladen stil	0,76772	2,38483	8,54E-03	1,92E-02	1,18E-05	1,93E-09	0,574563%	
WT2	STBI	gebruik-bladen draaiend	0,79123	2,54151	5,52E-03	1,92E-02	1,18E-05	1,25E-09	0,371145%	
WT2	STBU	gebruik-dagelijks	2,81238	16,01585	4,95E-58	3,85E-02	1,18E-05	2,24E-64	0,0000000%	
WT2	STBU	gebruik-noodstop	1,76263	9,01755	9,62E-20	3,85E-02	1,18E-05	4,35E-26	0,0000000%	
WT2	STBU	gebruik-bladen stil	1,82530	9,43536	1,95E-21	3,85E-02	1,18E-05	8,82E-28	0,0000000%	
WT2	STBU	gebruik-bladen draaiend	1,88797	9,85317	3,32E-23	3,85E-02	1,18E-05	1,50E-29	0,0000000%	
WT2	STBI	sloop	0,83823	2,85486	2,15E-03	1,92E-02	1,18E-05	4,87E-10	0,144776%	
WT2	STBU	sloop	2,43635	13,50900	6,92E-42	3,85E-02	1,18E-05	3,13E-48	0,0000000%	

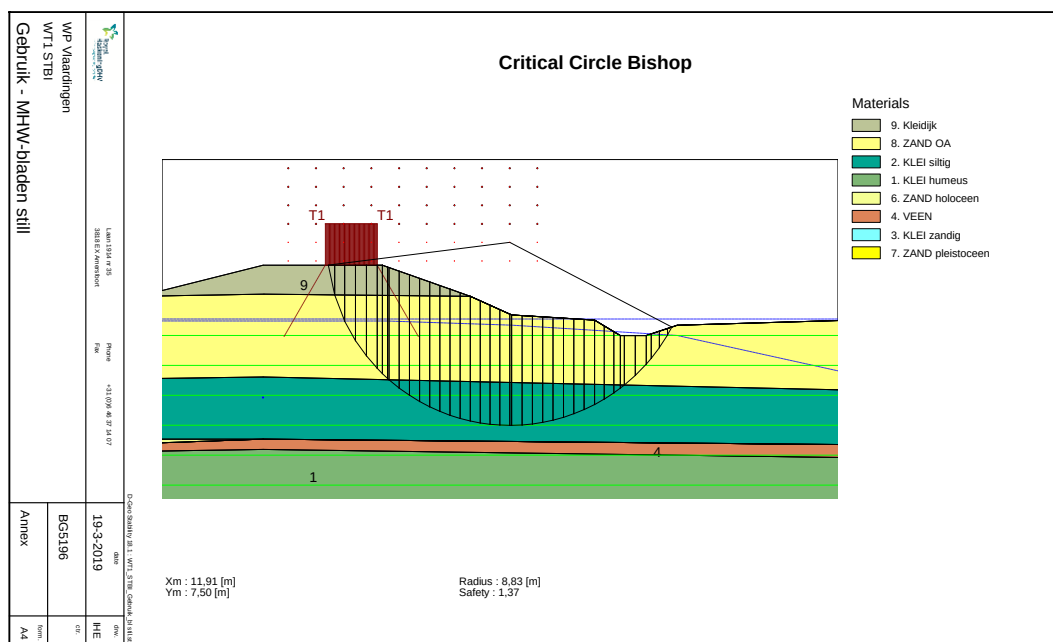
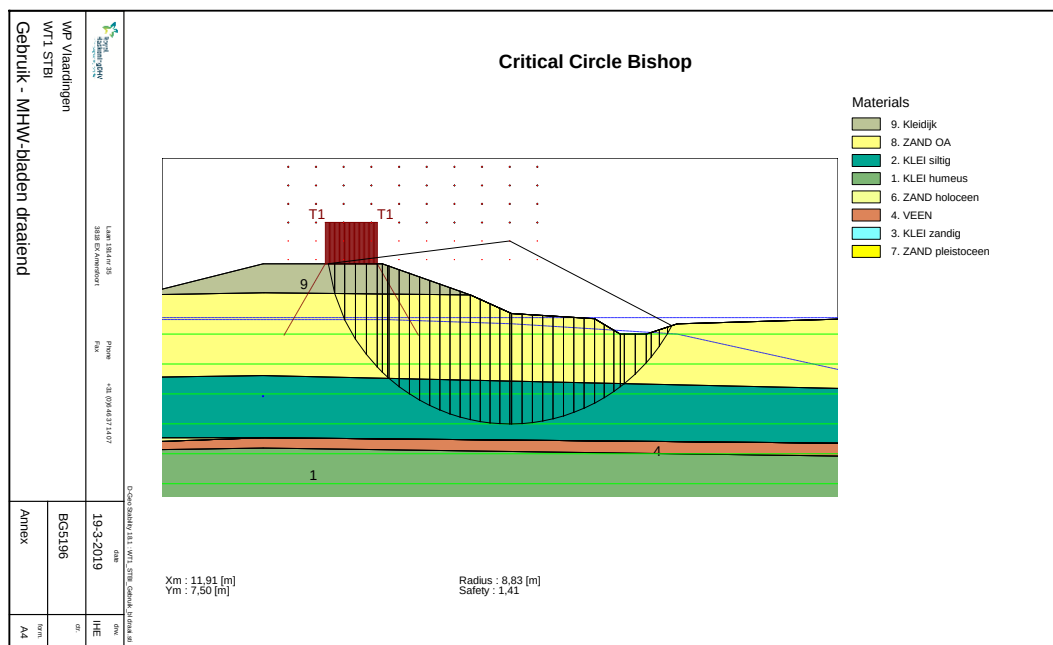
Totaal per faalmechanisme

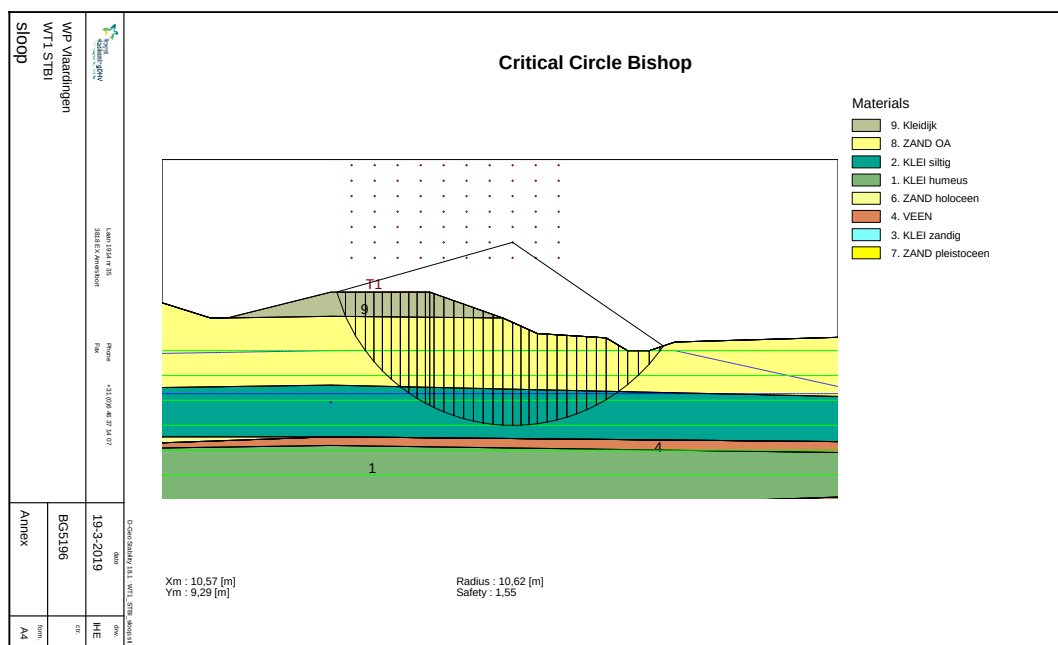
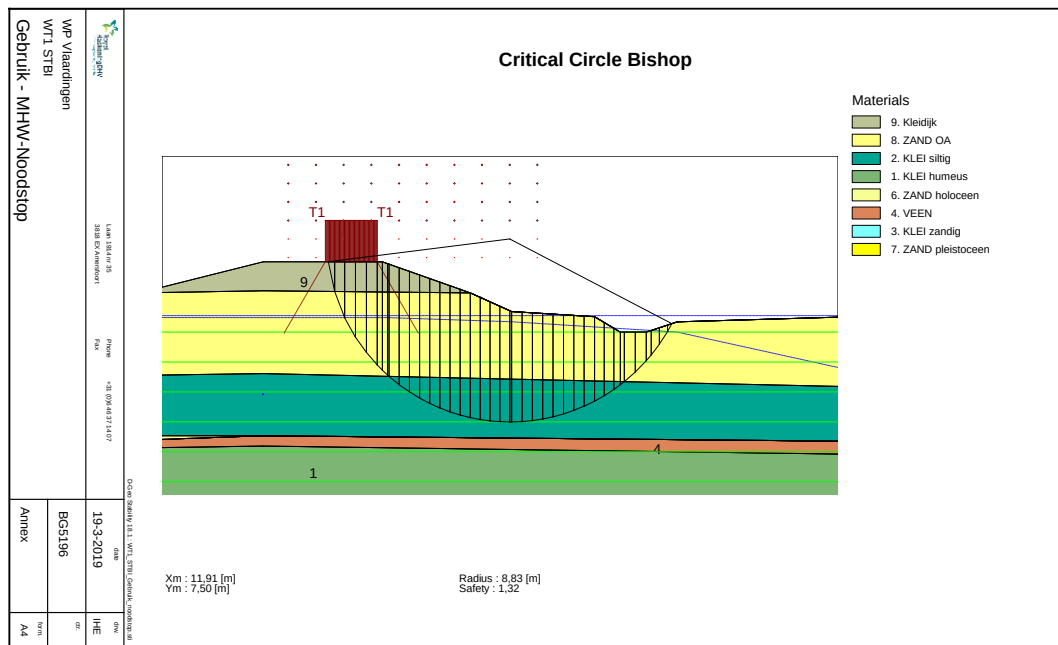
WT1	STBI	0,0030456%
	STBU	0,0000000%
WT2	STBI	2,0506512%
	STBU	0,0000000%

WT1- STBI

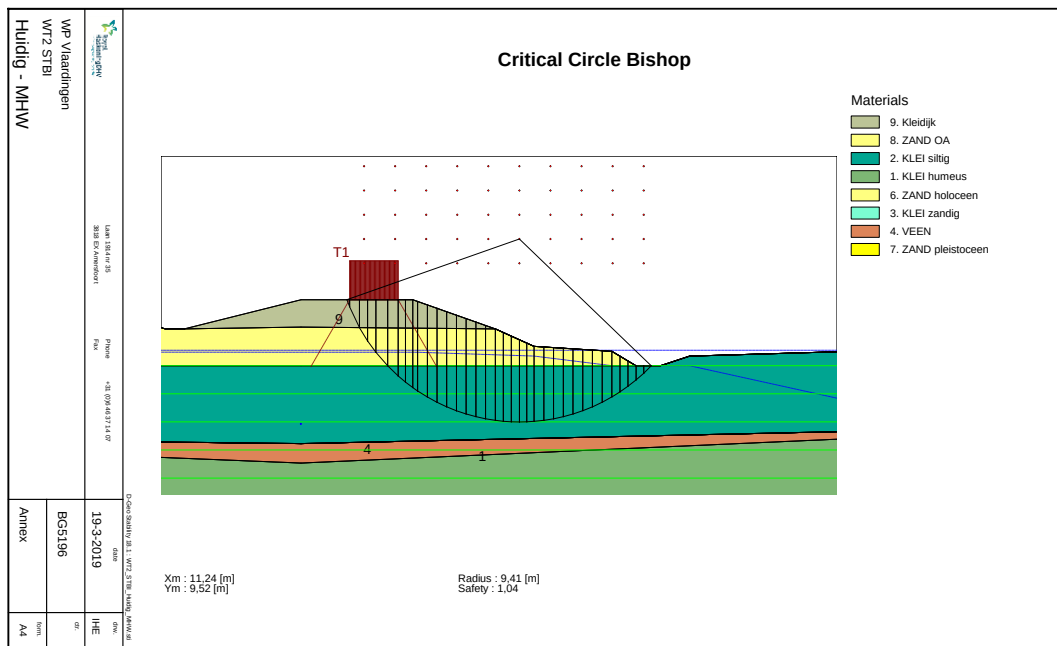
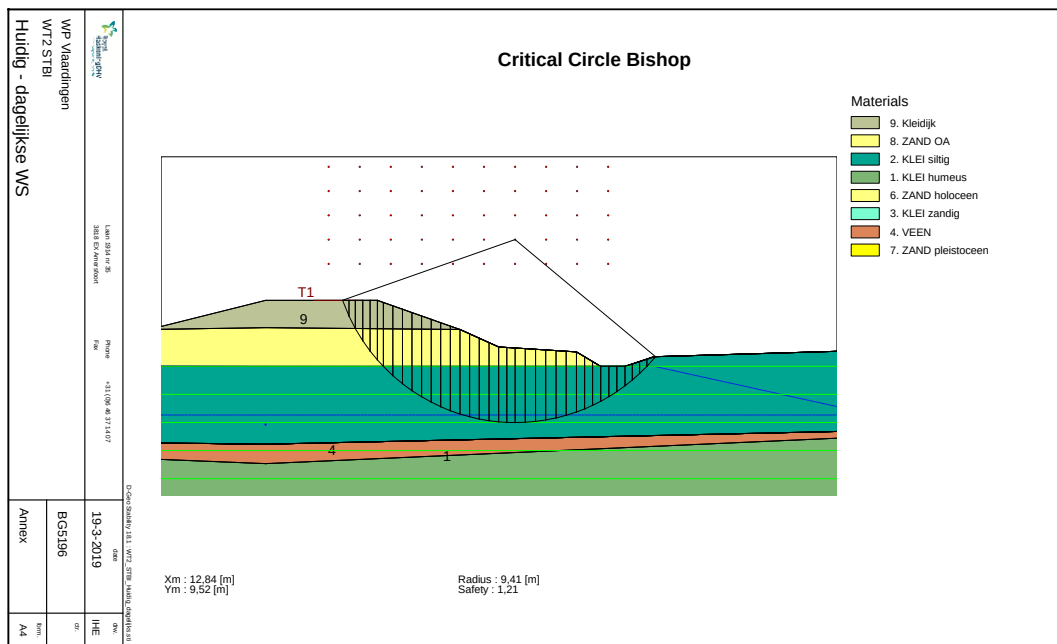


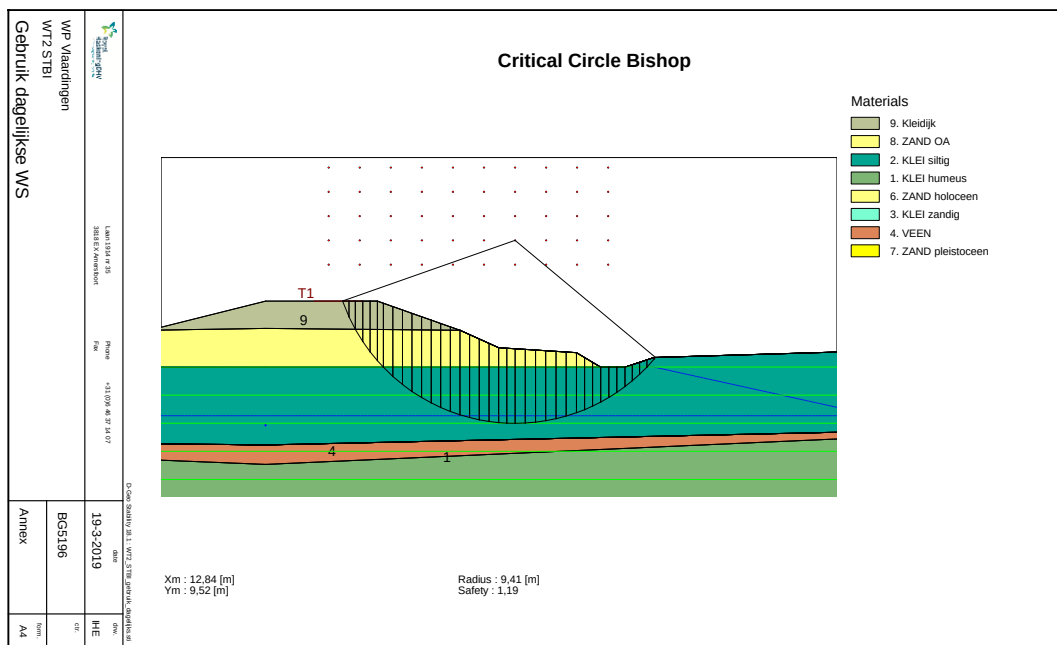


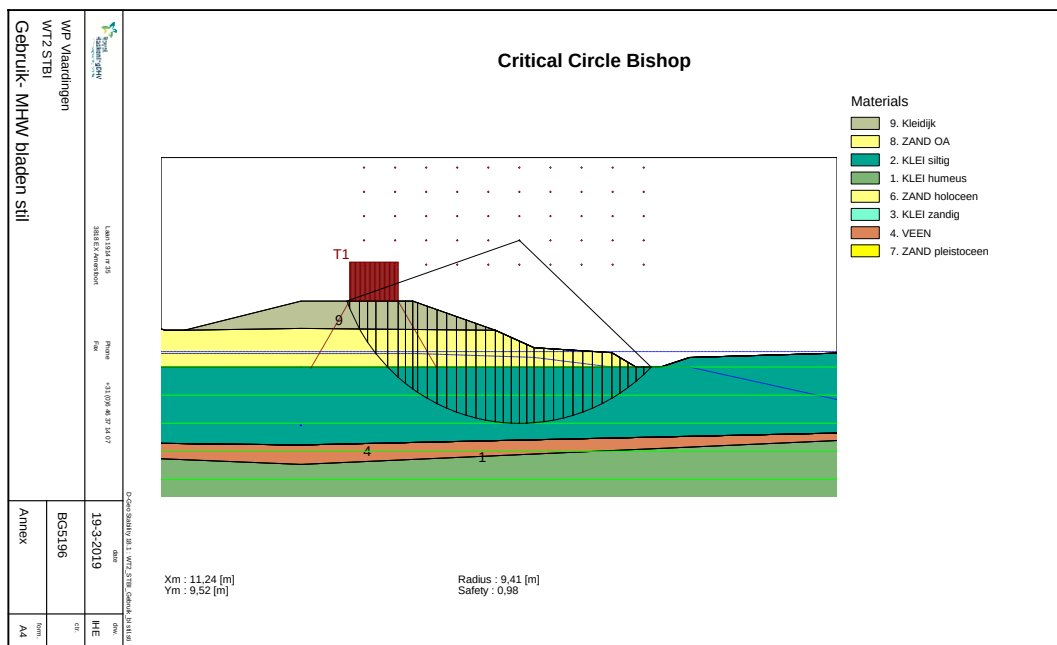
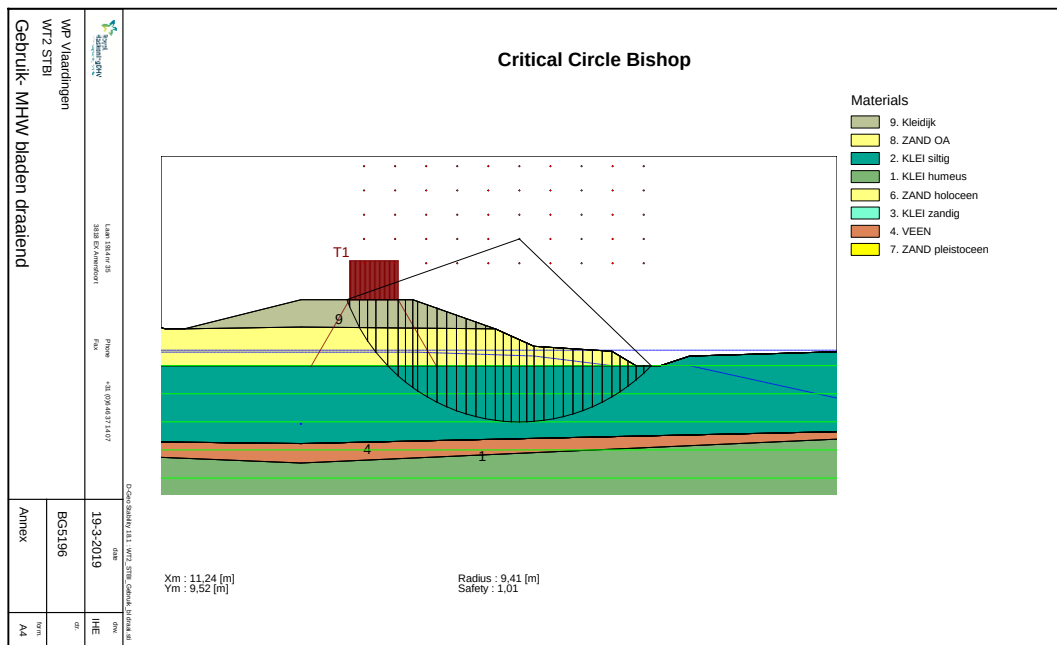


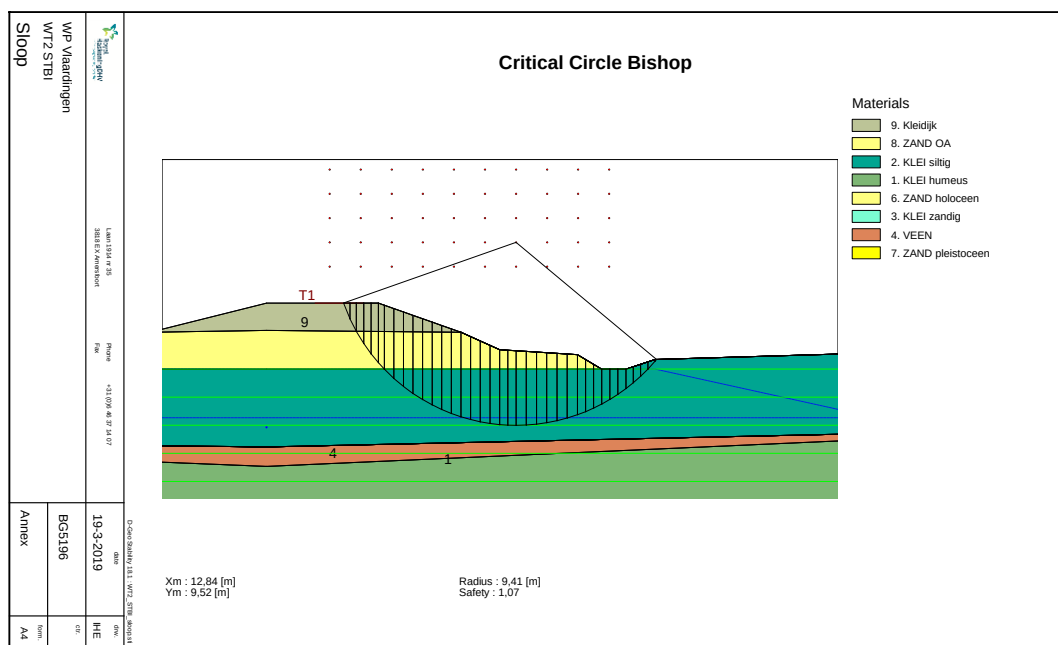
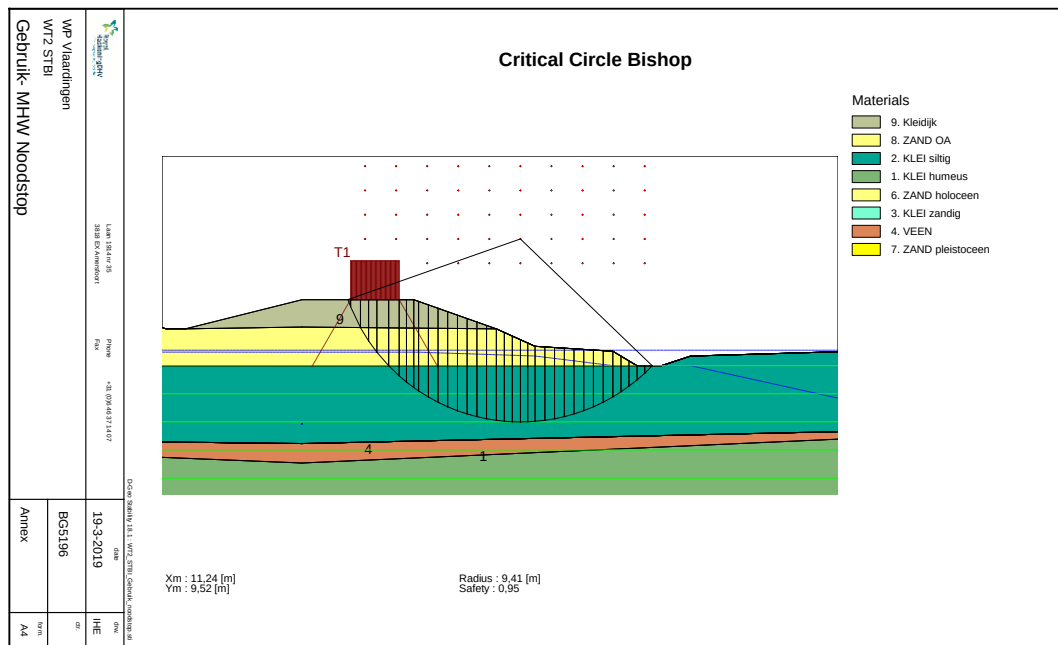


WT2- STBI

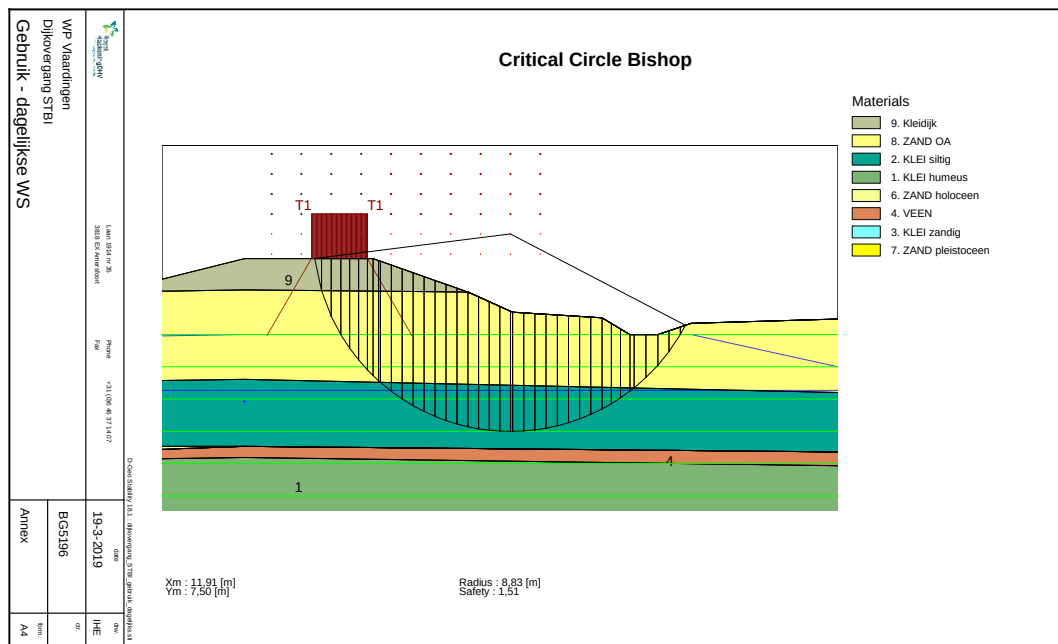


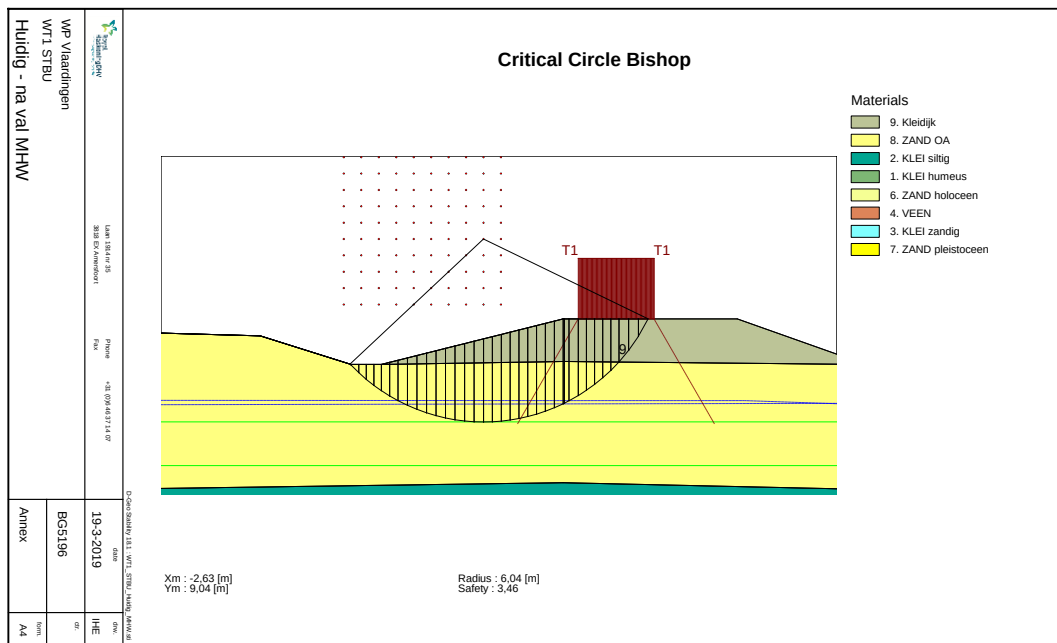


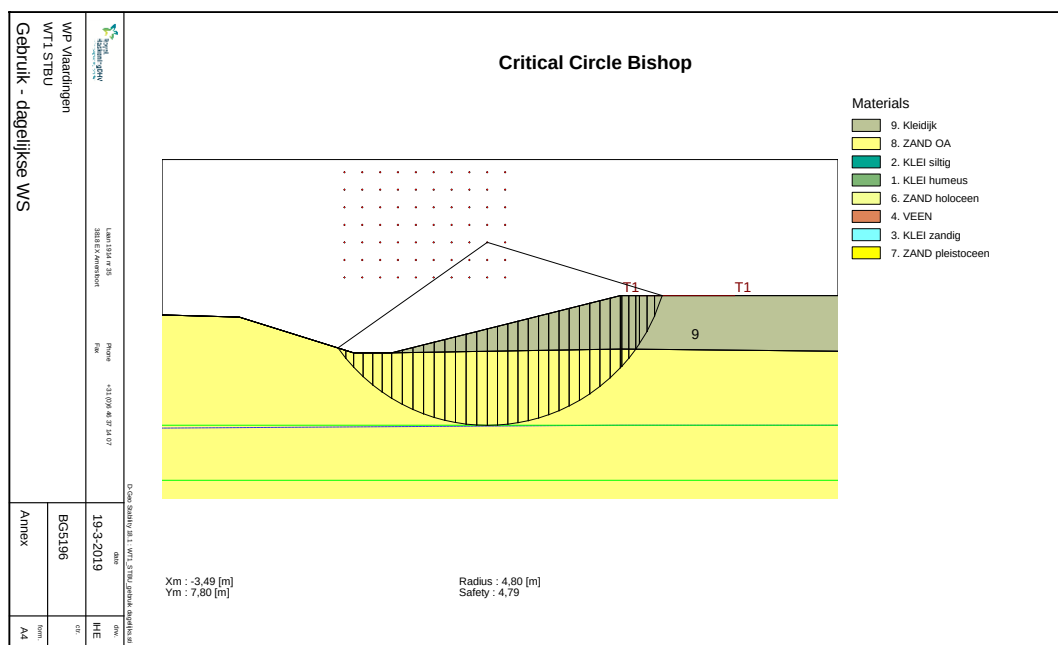
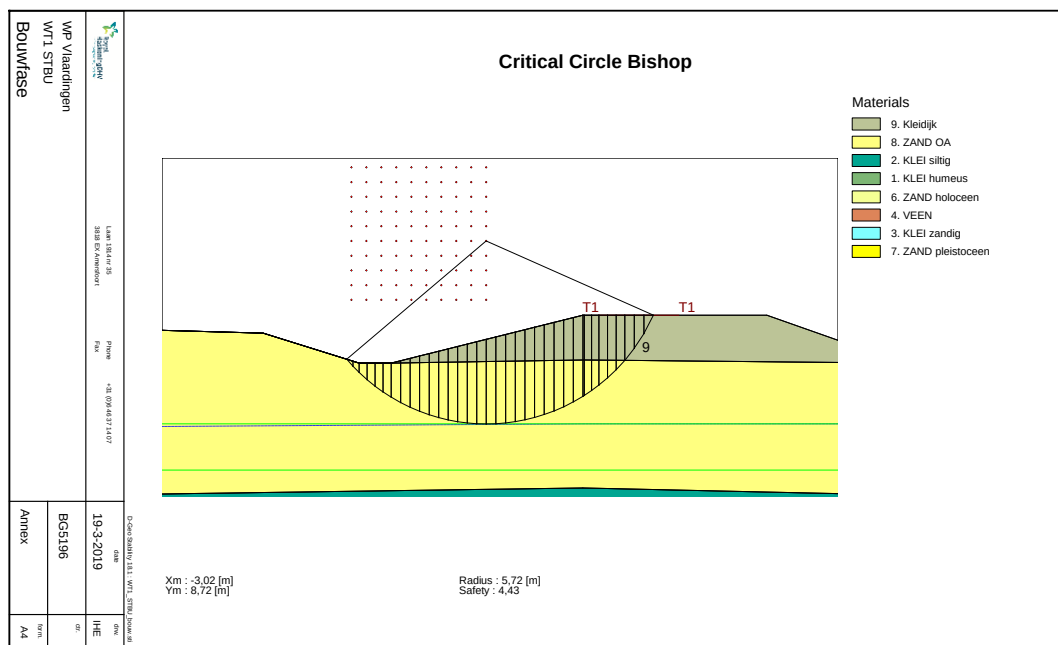


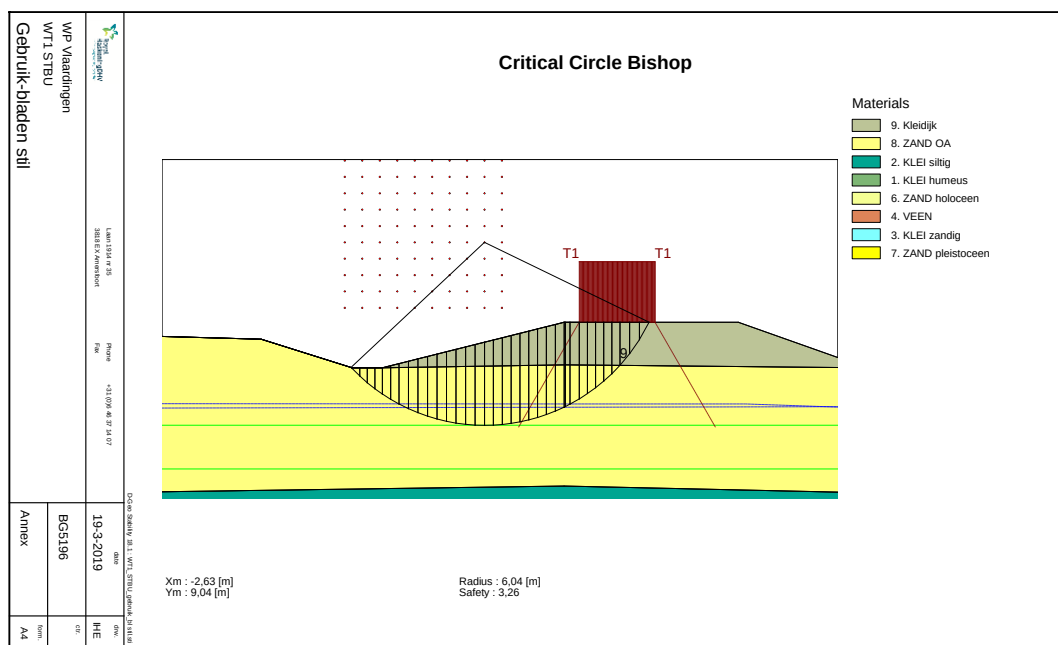
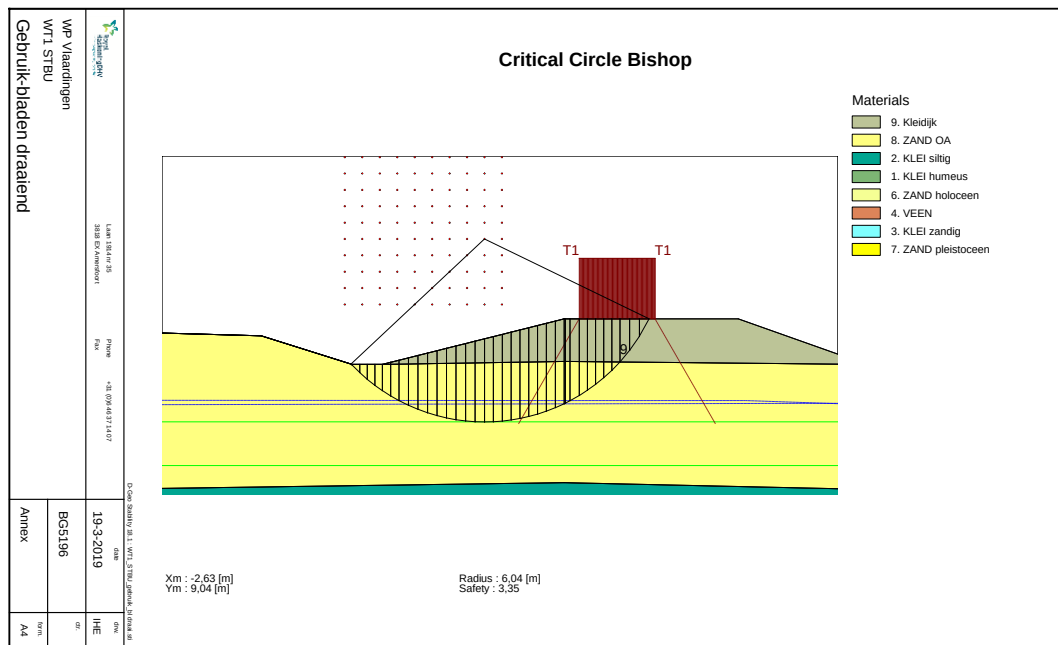


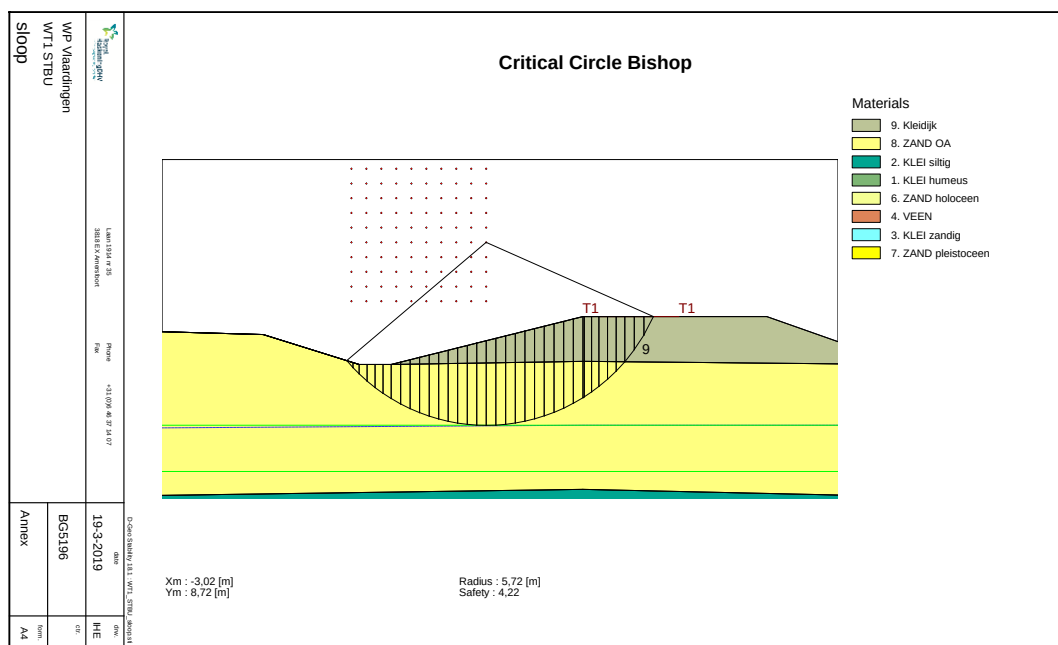
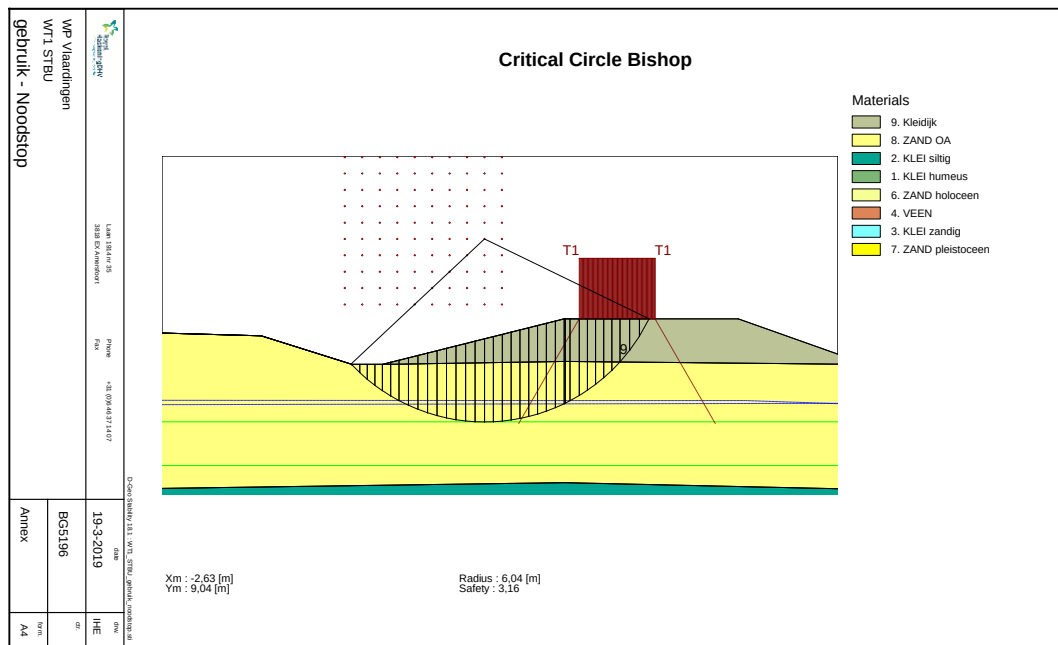
Dijkovergang – STBI



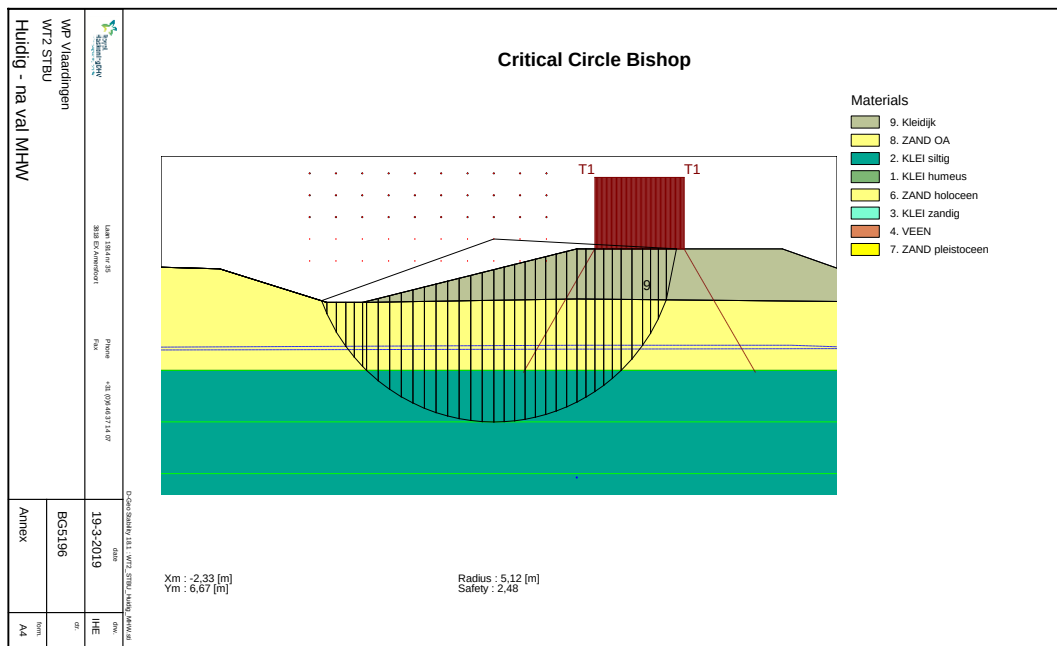
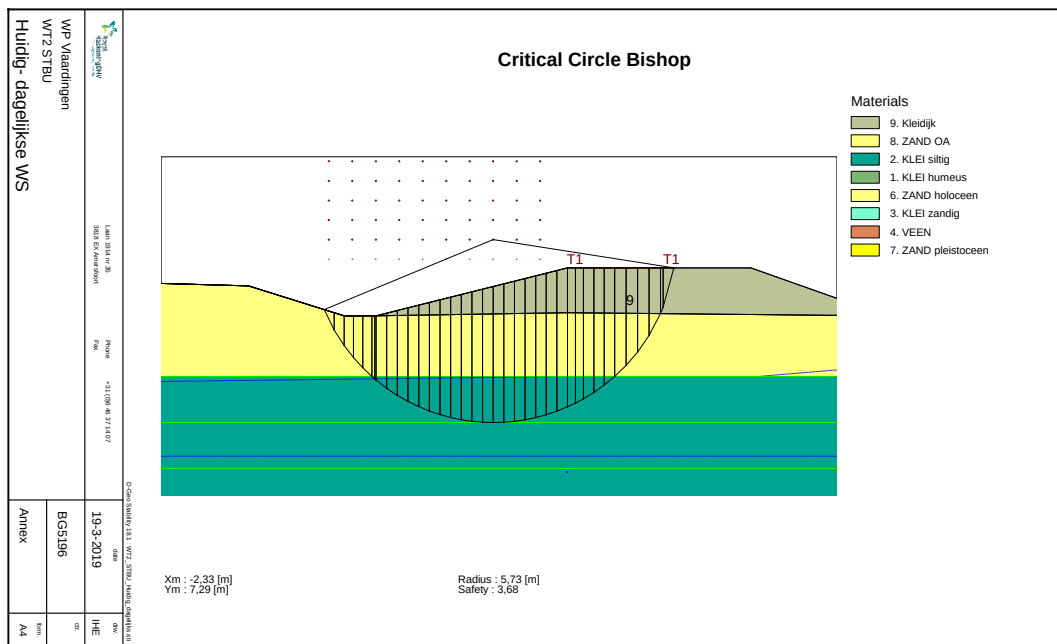
[illegible]

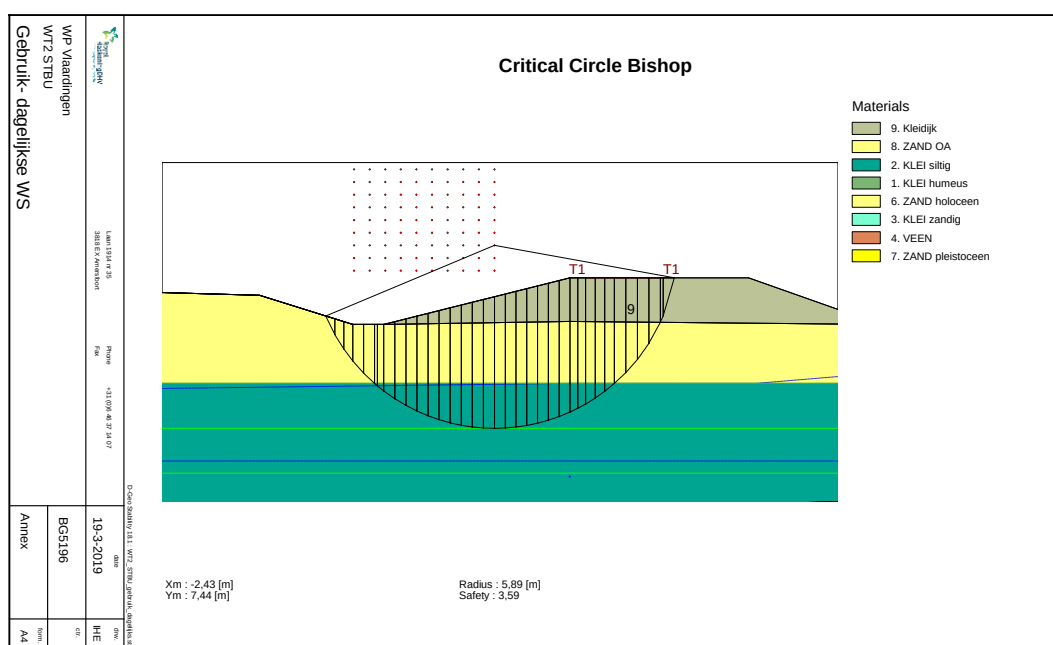
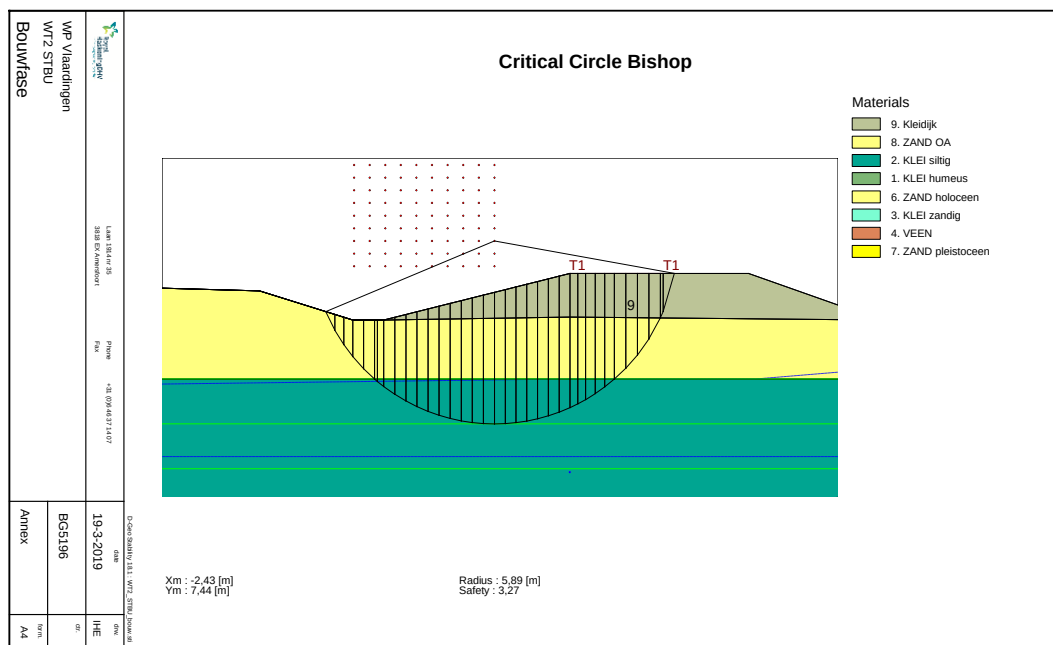


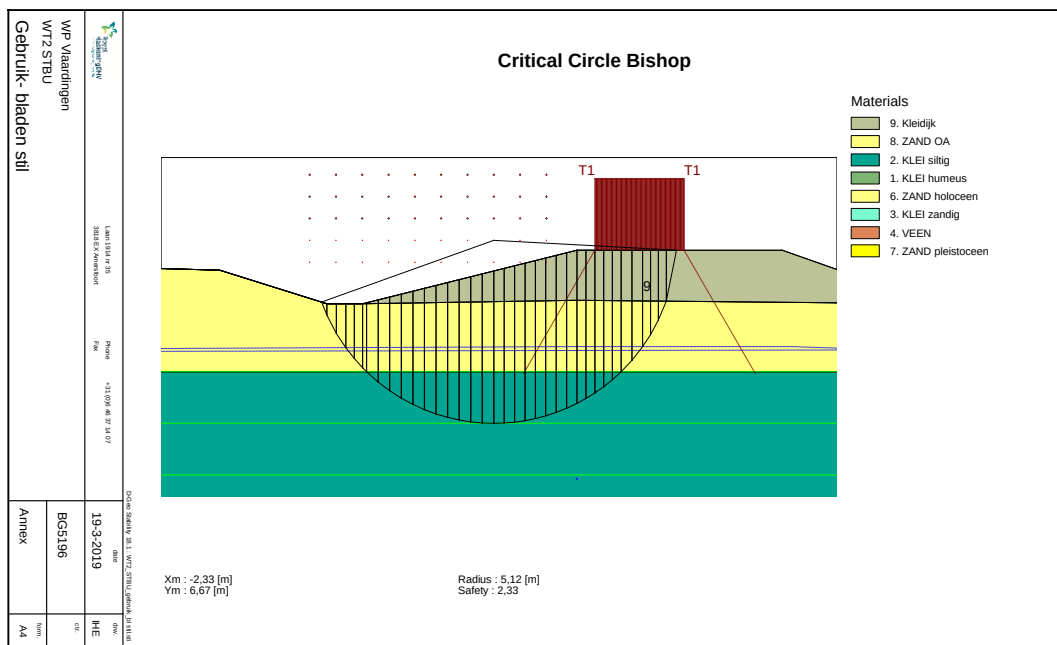


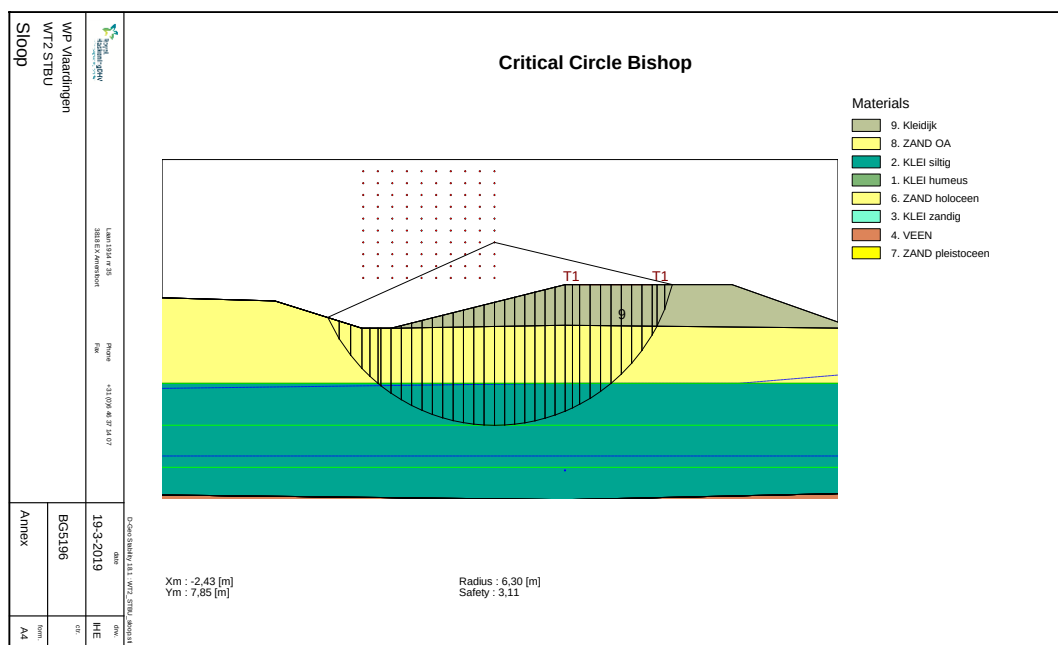
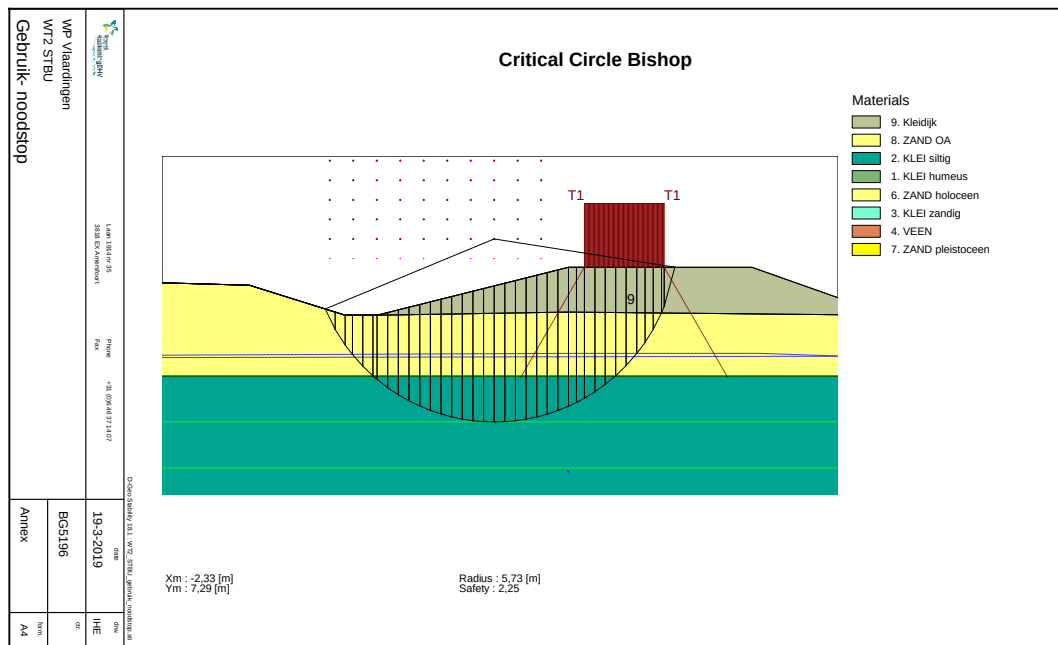


WT2-STBU

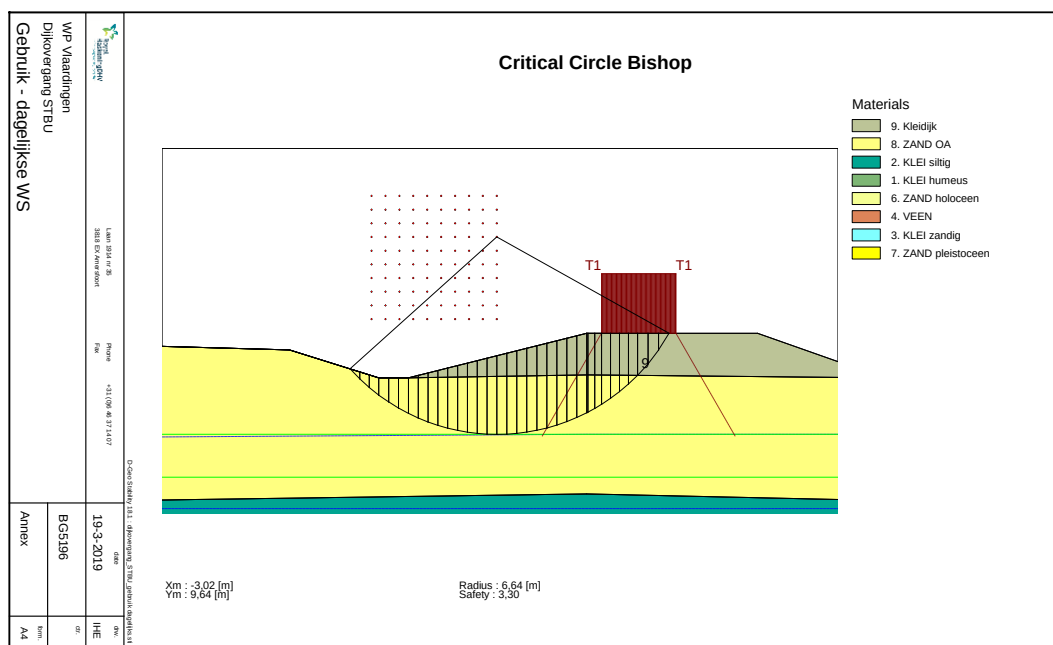








Dijkovergang STBU



A9 Bepaling kraterdiepte

A10.1 Inleiding

Het risico op falen van de waterkering is onder meer afhankelijk van de locatie en de wijze van neerkomen van de windturbine of windturbineonderdeel. Daarnaast spelen de situering, de opbouw en de robuustheid van de waterkering een rol. Om inzicht te krijgen in de schade aan de waterkering en het resterende dijkprofiel wordt in deze bijlage een inschatting gemaakt van de kraterdiepte. De kraterdiepte is per faalscenario berekend op basis van een energiebeschouwing.

A10.2 Inschatting kraterdiepte bij neerkomen van de gondel en rotor

Bij het falen van de windturbine of onderdeel hiervan zal het neerkomen van de gondel met rotor en bladen (vanwege het hoogste gewicht) de grootste schade aan de waterkering tot gevolg hebben. In onderstaande tabel zijn de gewichten van de gondel en rotor weergegeven.

Tabel A10-1: gewichten van de gondel en rotor

Onderdeel	Gewicht (ton)
Gondel	70
Rotornaaf met bladen	56
Complete gondel met rotonaaf en bladen	126

Benaderingswijze

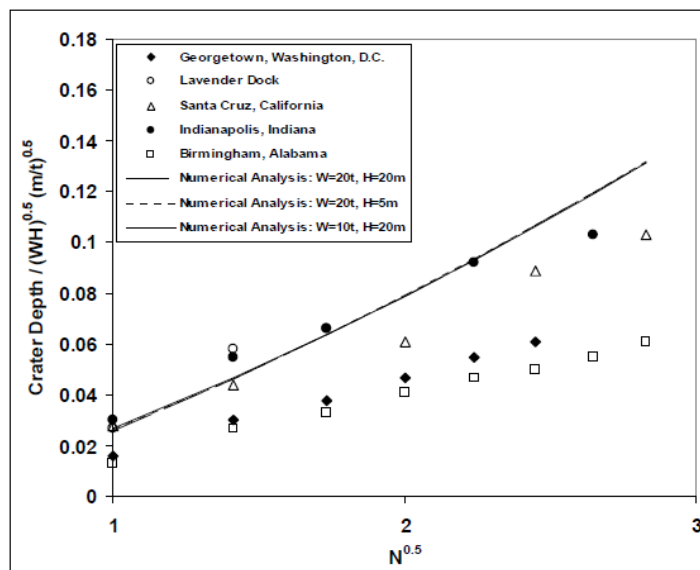
Er is in de praktijk weinig tot geen ervaring met grondvervorming door vallende voorwerpen, die qua afmetingen, gewicht en valsnelheid vergelijkbaar zijn met de situatie van een vallende windturbinegondel. Bestaande theorieën zijn veelal gebaseerd op kleinere voorwerpen (<40 ton) met geringere valhoogten (<50 m), ofwel op inslag van zeer grote voorwerpen (meteorieten) met een zeer hoge valsnelheid (>1 km/s).

Voor de geotechnische inschatting van grondindringing door een vallend onderdeel van de windturbine is in deze risicoanalyse de theorie beschouwd voor kraters door de Menard-methode voor dynamisch grondverdichting. De methode bestaat uit het herhaaldelijk laten vallen (nagenoeg vrije val) van een gewicht van 5 tot 40 ton vanaf 10 à 50 m hoogte. De methode wordt veelal toegepast als grondverbeteringstechniek bij landaanwinning, waarbij de draagkracht wordt verbeterd en restzettingen worden gereduceerd.

Er zijn veel studies en testen verricht naar effectiviteit van de dynamische verdichting. De mate van kratervorming en verdichting is onder andere afhankelijk van de grondsoort, de energie per val, het oppervlak van het valgewicht en het aantal herhalingen.

Inschatting kraterdiepte

Bij het vallen van de gondel (valgewicht) zal een krater ontstaan. Bij dynamische verdichting neemt de kraterdiepte toe bij meerdere herhalingen. Op basis van veldmetingen op 120 locaties is door Mayne² een relatie opgesteld tussen de genormaliseerde kraterdiepte en het aantal herhalingen. De relatie is weergegeven in Figuur A10-1. Opvallend is dat de genormaliseerde kraterdiepte alleen afhankelijk is van N, het aantal herhalingen, en niet van de grondsoort of van de afmeting van het valgewicht.



Figuur A10-1: relatie tussen aantal vallen N, energie $(WH)^{0.5}$ en de kraterdiepte (Mayne, 1984)

De genormaliseerde kraterdiepte wordt uitgedrukt als $a \cdot (WH)^{0.5}$, waarbij WH gelijk is aan het gewicht (ton) maal de valhoogte (m).

Voor de val van de gondel/rotor wordt aangenomen dat 25% van de potentiële energie wordt opgenomen door vervorming van de gondelbehuizing. Het valgewicht (W) is hiervoor gecorrigeerd tot 75% van het totale gewicht: $75\% \times 126 \text{ t} = 95 \text{ t}$.

Uit Figuur A10-1 volgt dat de waarde voor 'a' bij één val ($N=1$) varieert tussen 0,015 en 0,03. De variatie is het resultaat van verschillen in de dichtheid en sterkte van de ondergrond.

Op basis van de potentiële energie en de a-factor volgt dat bij val van de gondel en rotor de volgende kraterdiepte kan worden verwacht:

- Ondergrens: $0,015 \times (95 \times 81)^{0.5} = 1,3 \text{ m}$
- Bovengrens: $0,03 \times (95 \times 81)^{0.5} = 2,6 \text{ m}$

Voor de val van de gondel en rotor na mastbreuk wordt uitgegaan van een kraterdiepte van 2,6 m.

² Mayne, P.W., Jones, J.S. and Dumas, J.C. (1984), *Ground response to dynamic compaction*, ASCE 110, GT6, pp. 757-773

A10.3 Inschatting kraterdiepte bij neerkomen van een rotorblad

De massa van een afgeworpen rotorblad van de bedraagt 11,2 t, ofwel circa 112 kN. Het zwaartepunt ligt op ca. 18,0 m vanaf de as van de rotor (R_z). Het blad kan onder verschillende hoeken (α) en met verschillende snelheden (v_0) worden gelanceerd.

Lanceersnelheid

De lanceersnelheid is gelijk aan: $v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R_z$, met n het aantal omwentelingen per minuut. Voor de betreffende windturbine bedraagt n :

- Bij nominaal toerental: $n = 13,6 \text{ rpm}$
- Bij overtoeren (2xnominaal): $n = 27,2 \text{ rpm}$

De lanceersnelheid bedraagt dan:

- Bij nominaal toerental: $v_0 = 2 \cdot \pi \cdot (13,6/60) \cdot 18,0 = 25,6 \text{ m/s}$
- Bij overtoeren (2xnominaal): $v_0 = 2 \cdot \pi \cdot (27,2/60) \cdot 18,0 = 52,0 \text{ m/s}$

De inslagkrater van het blad is afhankelijk van de potentiële energie. De potentiële energie wordt bepaald door de lanceerhoogte (masthoogte) en de extra werphoogte.

Maximale werphoogte

Wanneer men de luchtweerstand verwaarloost, dan is de valbeweging bij het wegwerpen van een rotorblad een eenparig versnelde beweging. Wanneer het rotorblad aan zichzelf is overgelaten, beïnvloedt alleen de zwaartekracht nog de beweging. Deze zorgt voor een versnelling naar beneden, die onafhankelijk is van de massa van het voorwerp. Deze valversnelling wordt aangeduid met de letter g (van gravitatie) en is $9,81 \text{ m/s}^2$.

De positie van het rotorblad in de x- en y-richting kan worden beschreven door (met de oorsprong in de as van de rotor):

$$x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$$

$$y(t) = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - g \cdot t^2 / 2$$

Voor de snelheid in verticale richting geldt:

$$v_y(t) = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - g \cdot t$$

Op het hoogste punt is de verticale snelheid nul ($v_y=0 \text{ m/s}$) en dus kan de hoogte van de valparabool worden beschreven door:

$$y_{top} = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}$$

Het hoogste mogelijke punt wordt bereikt bij $\alpha=90^\circ$ en is:

$$y_{top} = \frac{v_0^2}{2g}$$

De werphoogte ten opzichte van de ashoogte bedraagt dan:

- Bij nominaal toerental: $y_{top} = 28,5^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 34 \text{ m}$
- Bij overtoeren (2xnominaal): $y_{top} = 52,0^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 138 \text{ m}$

Opgemerkt wordt dat de luchtweerstand is verwaarloosd. Dit is een conservatieve aanname. Daarnaast neemt de werphoogte af naarmate de lanceerhoek kleiner wordt. Indien wordt aangenomen dat de grootste werpafstand optreedt bij een hoek van 45°, dan bedraagt de werphoogte 17m, respectievelijk 69m.

Kraterdiepte bij val rotorblad

In analogie met de afleiding van de kraterdiepte bij val van de gondel en rotor, is een inschatting gemaakt van de kraterdiepte bij val van een rotorblad. In tegenstelling tot de gondelval is er geen rekening gehouden met energieverlies door verbrijzeling van het blad. De resultaten zijn in onderstaande tabel samengevat.

Tabel A10-2: kraterdiepte bij val rotorblad

Situatie	Ashoogte [m]	Werphoogte t.o.v. as [m]	Totale hoogte [m]	Kraterdiepte [m]	
				Ondergrens (a=0,015)	Bovengrens (a=0,03)
Nominaal					
- Maximale werphoogte	81	42	123	0,6	1,1
- Maximale werpafstand	81	21	102	0,5	1,0
Overtoeren					
- Maximale werphoogte	81	166	247	0,8	1,6
- Maximale werpafstand	81	84	165	0,6	1,3

Voor de val van rotorblad wordt uitgegaan van een kraterdiepte van 1,1 m voor nominaal toerental en 1,6 m bij overtoeren.

**A10 KPR memo 473 Windturbines op of nabij primaire
waterkeringen**

Kennisplatform Risicobenadering

MEMO

Aan -
Van Ruben Jongejan (KPR), Gerard Harmsen (KWW/RWS), Jan Willem Nieuwenhuis (KWW/NZV)
Betrokken -
Review Jan-Kees Bossenbroek (KPR/WSHD), Bob van Bree (KPR)
Kopie aan -
Datum 19-07-2018
Versie 2
Onderwerp Windturbines op of nabij primaire waterkeringen (473)

**Kennisplatform
Risicobenadering**
Zuidersluis 1
3439 LA Nieuwegein
Postbus 2232
3500 GE Utrecht
kpr@rws.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	2
2	Windturbines op of nabij waterkeringen	2
3	Beoordelingsmethodes	3
3.1	Van grof naar fijn	3
3.2	Overzicht van mogelijke beoordelingsmethodes.....	4
3.3	Optie A1: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in overstromingskans.....	5
3.4	Optie A2: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in faalkans per direct mechanisme en beoordeling per direct faalmechanisme.....	7
3.5	Optie A3: Kans op optreden faalmechanisme en bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen	8
3.6	Optie A4: Kans op schade door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen	9
3.7	Optie B1: Kans op overstroming geïnitieerd door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de norm	10
4	Aandachtspunten bij beoordelingen van windturbines	11
	Referenties.....	12

1 Inleiding

Verskillende keringbeheerders zijn betrokken bij windenergie-initiatieven op of nabij hun waterkeringen. Naast de individuele cases wordt door het Kennisnetwerk Windturbines en Waterkeringen (KWW), een samenwerkingsverband van de Waterschappen, UvW, STOWA, Ministerie I&W en RWS, gewerkt aan een handreiking voor dit onderwerp. Deze handreiking wordt in drie onderdelen uitgewerkt: (1) bestuur/beleid, (2) juridische zaken en (3) technische zaken. Voor het technisch gedeelte is ook de beoordeling in het kader van de nieuwe normering en het WBI2017 van belang.

Het KPR heeft reeds verschillende vragen over waterkeringen en windturbines gekregen en ook recentelijk een advies uitgebracht met betrekking tot de plaatsing van windturbines op/bij de Oosterscheldekering. Dit was voor het KPR de aanleiding om verschillende waterschappen en leden van het Kennisnetwerk uit te nodigen om dit onderwerp (vanuit KPR) nader toe te lichten en te bespreken.

Op basis van deze bespreking (21 juni 2018) heeft het Kennisnetwerk aan het KPR gevraagd om de geschetste randvoorwaarden, beoordelingsmogelijkheden, de daarbij behorende voor- en nadelen en de aandachtspunten nader uit te werken. Met deze uitwerking verwacht het Kennisnetwerk dat het een aanvullende slag kan maken met betrekking tot de technische aspecten die spelen bij windturbines en waterkeringen. Daarbij is ook van belang dat de technische handreiking van het Kennisnetwerk gebruikt zal worden voor aanpassing van het onderdeel waterkeringen in het Handboek Risicozonering windturbines.

De voorliggende factsheet is een gezamenlijk product van het KPR en het Kennisnetwerk Windturbines en Waterkeringen (KWW).

De factsheet is als volgt opgebouwd:

- In hoofdstuk 2 wordt eerst in algemene zin ingegaan op de omgang met de plaatsing van windturbines op of nabij waterkeringen.
- In hoofdstuk 3 wordt vervolgens ingegaan op beoordelingsmethodes voor windturbines op of nabij windturbines, inclusief hun voor- en nadelen.
- In hoofdstuk 4 wordt ten slotte ingegaan op enkele aandachtspunten bij het bepalen van de faalkans of overstromingskansbijdrage van een windturbine.

2 Windturbines op of nabij waterkeringen

Als (een onderdeel van) een windturbine op een waterkering valt, dan kan dat schade berokkenen aan de waterkering. Als dit gebeurt tijdens hoogwater of als zich voorafgaand aan (al dan niet provisorisch) herstel een hoogwater voordoet, dan kan dit leiden tot overstroming.

Andere aspecten die mogelijk van belang zijn voor de waterveiligheid, zijn de door een windturbine opgewekte trillingen in de ondergrond en de overgang tussen de fundering van een windturbine op de grasmat. Zwakke plekken bij overgangen zijn te voorkomen door de overgangen zorgvuldig te detailleren. Trillingen zijn vermoedelijk van ondergeschikt belang, tenzij een windturbine op of zeer dicht bij een waterkering wordt geplaatst. In dat geval kunnen trillingen van invloed zijn op de faalmechanismen macrostabiliteit en zettingsvloeiing. Deze aspecten zijn wel van belang, maar komen in deze notitie verder niet aan bod.

Als de sterkte waterkering door de plaatsing van een windturbine verandert, bijvoorbeeld ter plaatse van een overgang, dan kan de waterkering op de bewuste locatie worden beoordeeld zoals een willekeurige andere dijkdoorsnede door de schematisatie van de waterkering af te stemmen op de nieuwe situatie. De modellering van de fysica is wellicht lastig, maar qua inpassing in de overstromingskansbenadering is de situatie niet anders dan anders: de faalkansen per faalmechanisme kunnen vergeleken worden met de faalkanseisen per faalmechanisme. Het wordt lastiger als het zeer onzeker is of de waterkering (zwarte) schade zal

oplopen. In het navolgende wordt dan ook uitsluitend ingegaan op methodes voor beoordeling van de kans op schade aan de waterkering door het bezwijken van (een onderdeel van) een windturbine: mastbreuk, gondelval, bladworp of het bezwijken van de fundering.

In de Waterwet zijn voor elk dijktraject maximaal toelaatbare overstromingskansen of faalkansen vastgelegd. Voor zover windturbines van invloed zijn op de overstromings- of faalkansen van een dijktraject dienen zij te worden meegenomen in betrouwbaarheidsanalyses voor waterkeringen. Zoals wordt toegelicht in hoofdstuk 3 kan dit op verschillende manieren worden gedaan, van grof naar fijn. Een betrouwbaarheidsanalyse hoeft lang niet altijd een diepgaande, complexe probabilistische berekening te omvatten.

Iets wat is toegestaan, is nog niet zondermeer verstandig. Soms zijn risico's zonder of tegen een relatief beperkte inspanning sterk te verkleinen. Het zou dan zonde zijn om dat na te laten. Voorbeelden van praktische maatregelen om de risico's van windturbines zoveel mogelijk te beperken zijn:

1. de locatiekeuze:
 - a. plaatsing buiten de invloedszone van de waterkering,
 - b. plaatsing aan de lijzijde van de waterkering,
 - c. plaatsing bij minder kwetsbare locaties,
2. de keuze van het type windturbine (hoogte, gewicht), en
3. de keuze van de bouwkundige eisen die aan de constructieve elementen van de windturbine worden gesteld.

Dergelijke maatregelen zijn het meest kansrijk als zij vroeg in de planvorming ter sprake komen. Dat vereist dat de beoordeling op grond van de Waterwet geen sluitstuk is in het planproces, maar dat de potentiële effecten van een windturbine op een waterkering al vroeg in het planproces worden beschouwd.

3 Beoordelingsmethodes

3.1 Van grof naar fijn

Volgens de terminologie in het WBI2017 is een windturbine een niet-waterkerend object (NWO). Het WBI2017 beschrijft een gelaagde beoordelingsmethode voor NWO's, van grof naar fijn (WBI2017, Bijlage I: paragraaf 6.5, pag. 27):

"De beoordelingsmethode voor NWO's in Bijlage III Sterkte en veiligheid bevat drie stappen:

- 1. Eenvoudige toets: Bij voldoen aan de eenvoudige toets is de bijdrage van de NWO aan de overstromingskansen verwaarloosbaar klein.*
- 2. Gedetailleerde toets: op basis van modellen wordt bepaald of de bijdrage van de potentieel risicovolle NWO's aan de overstromingskansen klein is ten opzichte van de overige faalmechanismen van de waterkering.*
- 3. Toets op maat: op basis van scenario's wordt de bijdrage in rekening gebracht van het NWO aan de overstromingskansen."*

Een bovengenoemde werkwijze met scenario's (wel/geen bezwijken van een onderdeel van een windturbine) wordt elders in het WBI2017 niet beschouwd als een toets op maat maar als onderdeel van de gedetailleerde beoordeling. De precieze indeling/classificatie van beoordelingsmethoden is echter van ondergeschikt belang. Wat vooral van belang is, is de algemene gedachte dat in een beoordeling van grof naar fijn gewerkt dient te worden. Anders gezegd: de complexiteit van een betrouwbaarheidsanalyse dient afgestemd te worden op het detailniveau dat voor besluitvorming benodigd is. Als op grond van een grove beoordeling direct duidelijk is dat de bijdrage van een windturbine aan de overstromingskansen verwaarloosbaar klein is dan is een complexe probabilistische berekening onnodig bewerkelijk.

3.2 Overzicht van mogelijke beoordelingsmethodes

De kans op het bezwijken van een windturbine kan op verschillende manieren worden gerelateerd aan een maximaal toelaatbare overstromingskans. Deze opties worden in paragrafen 3.3 t/m 3.7 nader toegelicht.

- A. Als het bezwijken van een windturbine wordt beschouwd als een **indirect** faalmechanisme (zoals in Bijlage I van het WBI2017):
1. De kans op overstroming moet kleiner zijn dan de norm, rekening houdend met de kans op het bezwijken van de windturbine (volgens de tekst uit Bijlage I van het WBI2017 zou dit een toets op maat zijn).
 2. De kans op overstroming door een faalmechanisme moet kleiner zijn dan de faalkanseis voor het betreffende mechanisme, rekening houdend met de kans op het bezwijken van de windturbine (volgens de tekst uit Bijlage I van het WBI2017 zou dit een toets op maat zijn).
 3. De kans op overstroming door een faalmechanisme *en* het bezwijken van de windturbine moet kleiner zijn dan x% van faalkanseis voor het betreffende mechanisme (volgens de tekst uit Bijlage I van het WBI2017 zou dit als een gedetailleerde toets gezien kunnen worden).
 4. De kans op schade aan de dijk door het bezwijken van de windturbine moet kleiner zijn dan x% van strengste faalkanseis voor de faalmechanismen waarop het bezwijken van de windturbine van invloed is (volgens de tekst uit Bijlage I van het WBI2017 zou dit als een gedetailleerde toets gezien kunnen worden).
- B. Als het bezwijken van een windturbine wordt beschouwd als een **direct** faalmechanisme:
1. De kans op een overstroming door het bezwijken van de windturbine moet kleiner zijn dan x% van de norm (volgens de tekst uit Bijlage I van het WBI2017 zou dit als een gedetailleerde toets gezien kunnen worden).

Aanbevolen wordt om uit te gaan van $x=1\%$ om discussie over de verwaarloosbaarheid van de faalkansbijdrage van windturbines te voorkomen. Bij de relatief conservatieve beoordelingsmethode A4 zou eventueel ook van een groter percentage uitgegaan kunnen worden.

Op het onderscheid tussen **directe** en **indirecte** mechanismen wordt nader ingegaan in de KPR-factsheet over dit onderwerp [1]. Kort samengevat is een indirect faalmechanisme een verzwarende omstandigheid die het optreden van een direct mechanisme zoals macroinstabiliteit waarschijnlijker maakt. Voor de indirecte mechanismen is in de default-faalkansbegroting uit het WBI2017 en het OI2014 geen faalkansruimte gereserveerd. Voor de directe faalmechanismen is dat wel het geval. Het onderscheid tussen de directe en de indirecte faalmechanismen is uiteindelijk een tamelijk willekeurige keuze: het falen van de dijk geïnitieerd door een indirect mechanisme zou immers ook als een direct mechanisme bestempeld kunnen worden, zoals bij optie B1 het geval is. In theorie leidt deze optie tot een verruiming van de gestelde eisen als de faalkansbegroting niet wordt aangepast. Als dat niet wordt gedaan, leidt optie B1 tot het oprekken van de faalkansbegroting tot een percentage van $100+x\%$. Bij bijvoorbeeld $x=1\%$ kan van een wezenlijke overschatting echter nooit sprake zijn. Aanpassing van de faalkansbegroting is dan onnodig.

Een groot voordeel van de behandeling van het bezwijken van een windturbine als een direct mechanisme (optie B1) is dat alle gebeurtenissen die kunnen volgen op het bezwijken van een windturbine in één keer en in onderling verband worden bekeken. Dit houdt de beoordeling overzichtelijk en verkleint de kans op fouten. Zeker als het bezwijken van windturbines op verschillende (directe) faalmechanismen van invloed is, is dit een belangrijk voordeel.

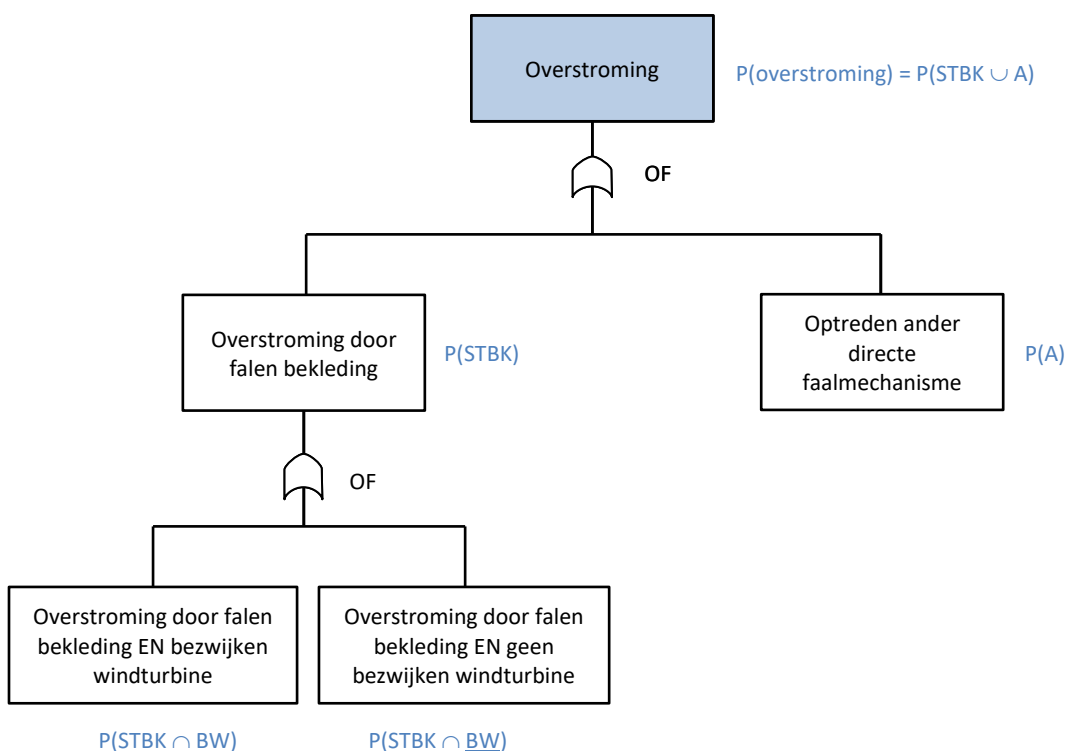
Een windturbine kan op verschillende manieren bezwijken: mastbreuk *of* gondelval *of* bladworp *of* funderingsfalen. Wanneer in het navolgende wordt gesproken over (de kans op) het bezwijken van een windturbine gaat het over (de gecombineerde kans op) mastbreuk *of* gondelval *of* bladworp *of* funderingsfalen.

3.3 Optie A1: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in overstromingskans

De kans op schade aan een dijktraject door het bezwijken van een windturbine kan in theorie via scenario's en scenario-kansen worden verwerkt in de kans op een overstroming. De kans op een overstroming kan vervolgens worden vergeleken met de norm. Deze werkwijze is theoretisch zuiver (exact, geen benadering) maar relatief bewerkelijk en met de nu beschikbare instrumenten niet uitvoerbaar. De beschrijving in deze paragraaf dient dan ook vooral voor de begripsvorming.

De wijze waarop de betrouwbaarheid van windturbines kan worden verdisconteerd in de overstromingskans van een dijktraject is schematisch weergegeven in de foutenboom in Figuur 1 (met de foutenboom in Figuur 5 uit paragraaf 3.7 zou dit in principe ook kunnen). In de foutenboom zijn alle directe faalmechanismen behalve het falen van de bekleding gemakshalve samengenomen als 'andere directe faalmechanismen'. Aangenomen is dat het bezwijken van een windturbine alleen kan leiden tot schade aan de bekleding.

De kans op een overstroming door het falen van de bekleding valt uiteen in (1) de kans op een overstroming door het falen van de bekleding *en* het bezwijken van de windturbine plus (2) de kans op een overstroming door het falen van de bekleding *en* het niet bezwijken van de windturbine.



Figuur 1. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld als de kans op het bezwijken van een windturbine wordt verdisconteerd in de overstromingskans (optie A1).

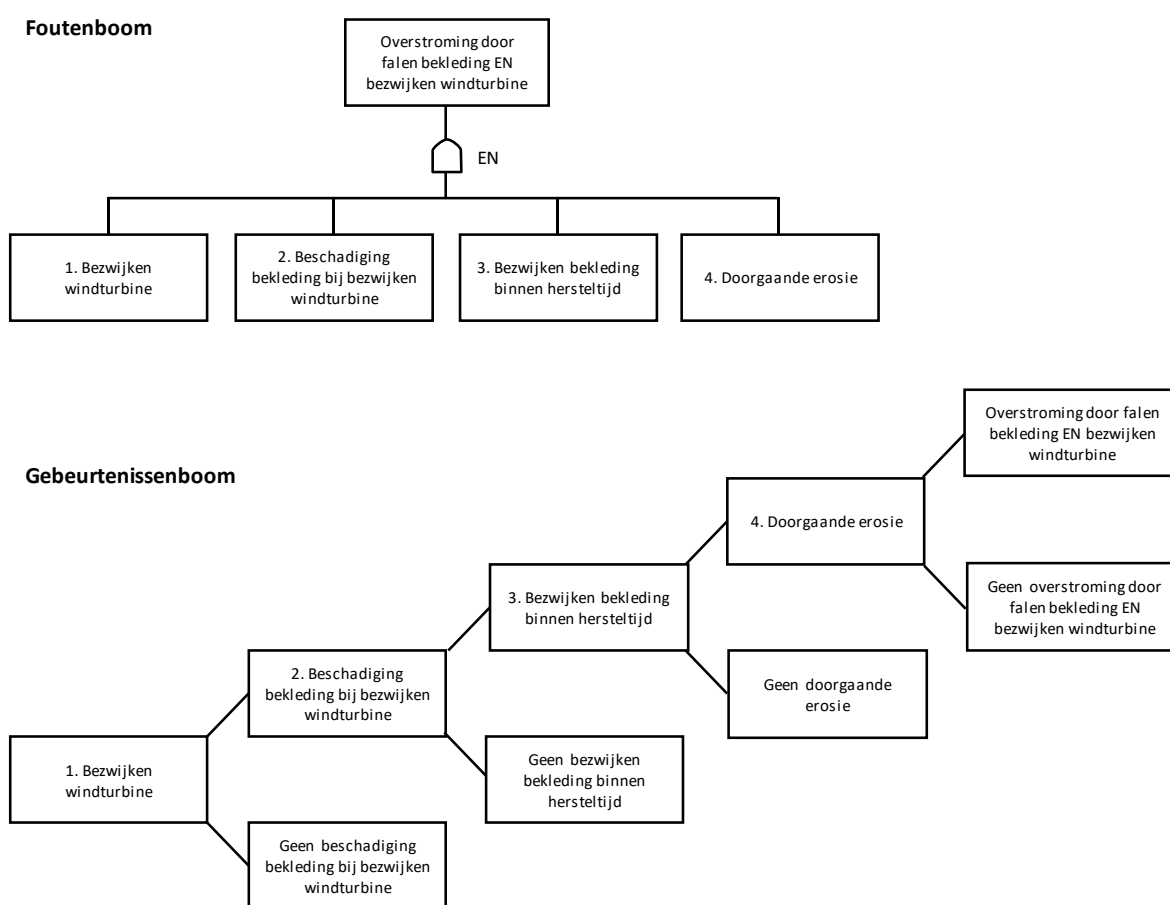
De symbolen (in het blauw) in Figuur 1 hebben de volgende betekenis:

- $P(\cdot)$ kans op een bepaalde gebeurtenis
- STBK het optreden van een overstroming door het falen van de bekleding
- BW het bezwijken van een windturbine
- $\overline{\text{BW}}$ het niet-bezwijken van een windturbine
- A overstroming door een ander direct faalmechanisme dan het falen van de bekleding
- $\cap$ 'en'-poort. Zo is $P(\text{STBK} \cap \text{BW})$ de kans op een overstroming door het bezwijken van de bekleding en een bezweken windturbine.
- $\cup$ 'of'-poort. Zo is $P(\text{STBK} \cup A)$ de kans op een overstroming door het bezwijken van de bekleding of een ander direct faalmechanisme. Dit is kans op een overstroming.

Uiteraard kan de foutenboom in **Figuur 1** nog verder worden uitgebreid/uitgeklapt. Zo kan pas sprake zijn van een overstroming door het falen van de bekleding en het bezwijken van een windturbine als:

1. de windturbine bezwijkt, en
2. de bekleding beschadigd raakt door het bezwijken van de windturbine,
3. binnen de hersteltijd of de tijd voor provisorische maatregelen een dusdanige belasting op de bekleding optreedt dat de bekleding faalt, en
4. de dijk doorgaand erodeert zodat een overstroming optreedt.

De bovengenoemde gebeurtenissen (die eventueel ook weer verder uitgesplitst kunnen worden) zijn links onderin de foutenboom in **Figuur 1** toe te voegen onder een 'en'-poort. Ze kunnen desgewenst ook volgtijdelijk worden weergegeven in een gebeurtenissenboom. Dit is schematisch weergegeven in **Figuur 2**. In het WBI2017 worden de relaties tussen gebeurtenissen standaard weergegeven aan de hand van foutenbomen.

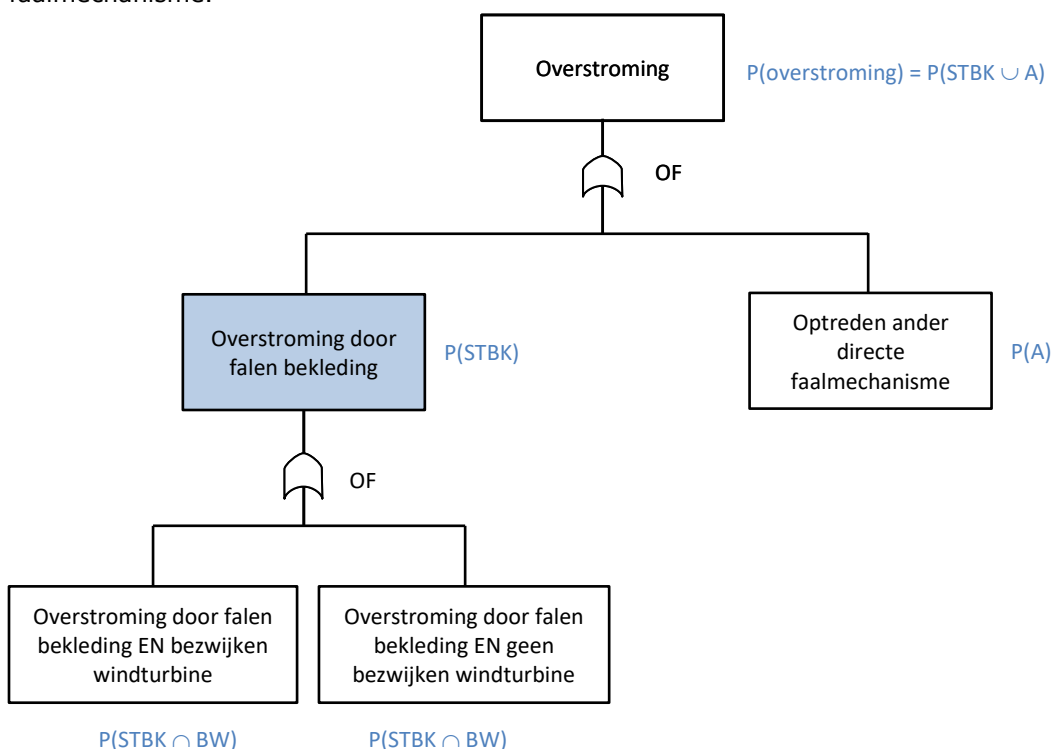


Figuur 2. Foutenboom en corresponderende gebeurtenissenboom van één van de vele mogelijke uitsplitsingen van de stappen tussen het bezwijken van een windturbine en het optreden van een overstroming door het falen van een bekleding en het bezwijken van een windturbine.

Het lengte-effect is in het bovenstaande nog niet expliciet aan bod gekomen. Alle gebeurtenissen in **Figuur 1** en **Figuur 2** hebben betrekking op een geheel dijktraject. Zo houdt de gebeurtenis 'bezwijken windturbine' in dat er *ergens in het dijktraject* minimaal één windturbine bezwijkt. De kans op deze gebeurtenis wordt beïnvloed door het lengte-effect. De kans dat er ergens langs een dijktraject een windturbine bezwijkt, is immers groter wanneer er 100 windturbines langs het dijktraject staan opgesteld, dan wanneer er slechts 1 windturbine staat.

3.4 Optie A2: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in faalkans per direct mechanisme en beoordeling per direct faalmechanisme

De faalkans kan per faalmechanisme worden beoordeeld door per faalmechanisme faalkanseisen af te leiden van de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dit kan worden gedaan met behulp van een faalkansbegroting. In Figuur 3 is weergegeven op welk niveau de betrouwbaarheid van windturbines wordt beschouwd als de beoordeling plaatsvindt per faalmechanisme.



Figuur 3. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld als de kans op het bezwijken van een windturbine wordt verdisconteerd in de faalkans per mechanisme en de faalmechanismen afzonderlijk worden beoordeeld (optie A2).

Getallenvoorbeeld

Beschouw een dijktraject met een maximaal toelaatbare overstromingskans van $1/10.000$ per jaar. Uitgaande van de default-faalkansbegroting is de faalkanseis voor de steenbekleding $0,05 \times 10^{-4}$ per jaar = $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar op trajectniveau.

Stel dat er 10 identieke windturbines op vergelijkbare wijze langs het dijktraject zijn opgesteld en dat alleen mastbreuk schade aan de bekleding kan opleveren. Stel verder (1) dat de kans op een overstroming door het falen van de steenbekleding zonder windturbines 10^{-6} per jaar zou zijn geweest, (2) dat de kans op mastbreuk per windturbine $1,3 \cdot 10^{-4}$ per jaar is, (3) dat mastbreuk niet is gecorreleerd met de hydraulische belasting, (4) dat de trefkans $1/5$ is en (5) dat de kans op een kritieke hydraulische belastingsituatie binnen de vereiste tijd voor noodreparatie of herstel $1/100$ is. Er van uitgaande dat de kans klein is dat er meer dan 1 windturbine gelijktijdig bezwijkt, is de kans op overstroming door het falen van de bekleding EN het bezwijken van een windturbine gelijk aan:

$$P(\text{STBK} \cap \text{BW}) = P(\text{STBK} \mid \text{BW}) \times P(\text{BW}) = 1/100 \times (1 - (1 - 1,3 \cdot 10^{-4} \times 1/5)^{10}) \\ \approx 1/100 \times 10 \times 1,3 \cdot 10^{-4} \times 1/5 = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ per jaar}$$

De kans dat geen enkele windturbine bezwijkt, is $P(\overline{\text{BW}}) = (1 - 1,3 \cdot 10^{-4})^{10} \approx 1,00$ per jaar. De kans op een overstroming door het falen van de bekleding EN geen bezwijken van een windturbine is zodoende:

$$P(STBK \cap \underline{BW}) \approx 10^{-6} \times 1,00 = 10^{-6} \text{ per jaar}$$

De kans op het falen van de steenbekleding volgt dan uit:

$$P(STBK) = P(STBK \cap BW) + P(STBK \cap \underline{BW}) = 2,6 \cdot 10^{-6} + 10^{-6} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ per jaar}$$

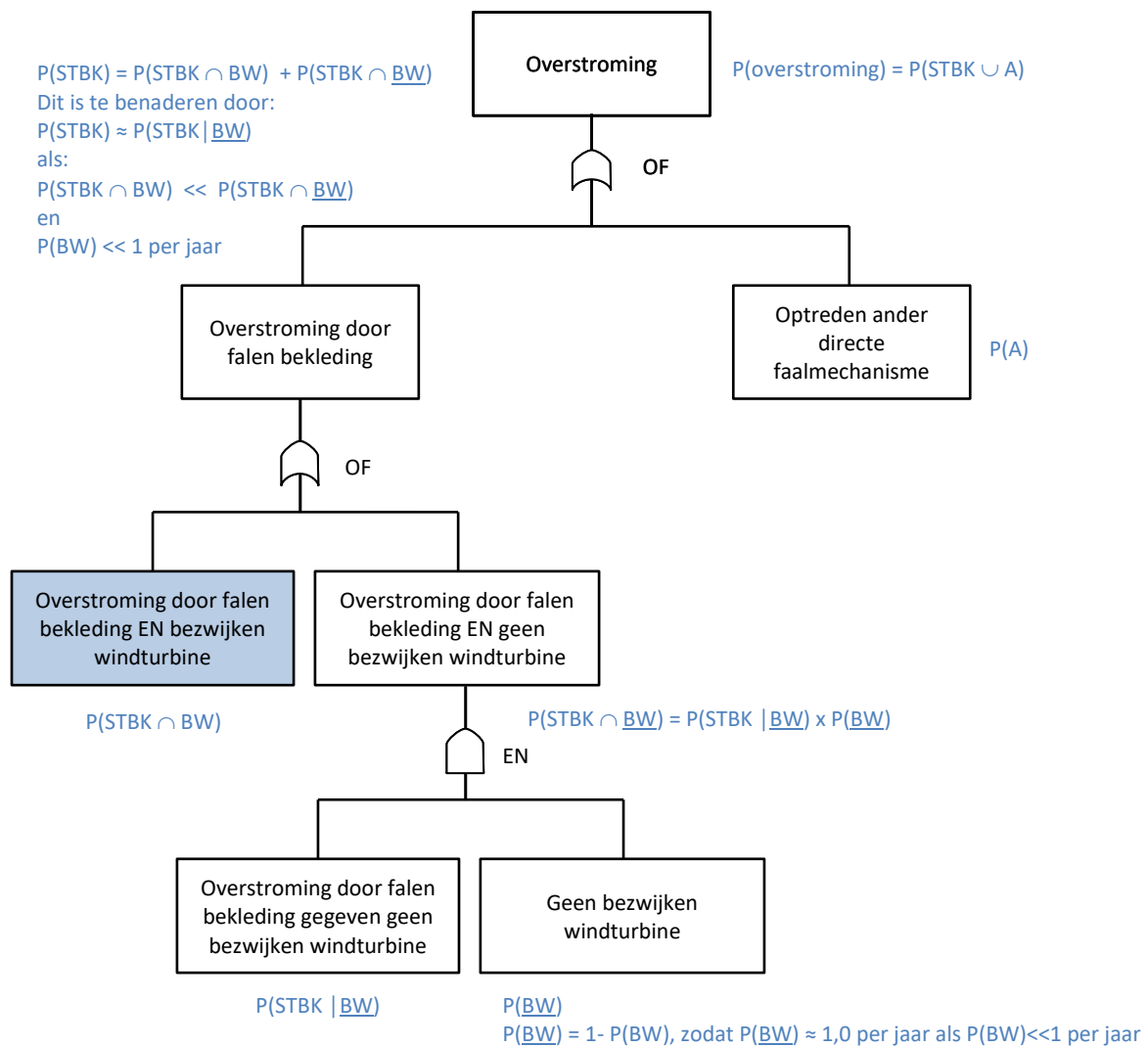
De steenbekleding voldoet dus aan de faalkanseis van $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar.

3.5 Optie A3: Kans op optreden faalmechanisme en bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen

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. Rekening houdend met de post 'overig' in de faalkansbegroting (30%) kan dit maximaal 0,7% extra faalkansruimte op trajectniveau opleveren. Een dusdanig kleine overschrijding heeft geen enkele praktische betekenis.

De kans op het niet-bezwijken van een windturbine in een jaar is vrijwel gelijk aan één. Dit betekent dat de kans op een faalmechanisme EN het niet-bezwijken van een windturbine getalsmatig vrijwel gelijk is aan de kans op het faalmechanisme GEGEVEN het niet-bezwijken van een windturbine. Praktisch betekent dit dat de betrouwbaarheid van de windturbine niet meegenomen hoeft te worden bij de reguliere beoordelingen per faalmechanisme.

In Figuur 4 is weergegeven op welk niveau de betrouwbaarheid van windturbines bij deze optie wordt beschouwd en naar welke gebeurtenissen bij deze optie wordt gekeken. De formules in blauw geven aan waarom het aanvaardbaar is om bij de reguliere beoordeling het bezwijken van windturbines te negeren.



Figuur 4. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld bij optie A3.

Getallenvoorbeeld

Beschouw wederom het hypothetische dijktraject uit paragraaf 3.4. De kans op een overstroming door het falen van de bekleding en het niet-bezwijken van de windturbine is gelijk aan 10^{-6} per jaar. Dit is kleiner dan de faalkanseis aan de steenbekleding van $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar.

Bij de beoordeling van de betrouwbaarheid van de windturbines wordt nu echter als losse eis gehanteerd dat $P(STBK \cap BW)$ kleiner moet zijn dan 1% van de faalkanseis voor de steenbekleding, ofwel kleiner dan $0,01 \times 5 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-8}$ per jaar op trajectniveau. Hieraan wordt niet voldaan want $P(STBK \cap BW) = 2,6 \cdot 10^{-6}$ per jaar. Dit is illustratief voor het feit dat beoordelingsmethode A3 in de praktijk conservatiever zal uitpakken dan optie A2 ook al wordt het faalkansbudget per faalmechanisme bij optie A2 met (slechts) een factor 1,01 (1%) vergroot.

3.6 Optie A4: Kans op schade door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen

Optie A4 is een conservatieve benadering van optie A3 waarbij niet langer naar de kans op een overstroming wordt gekeken, maar naar de kans op schade aan de kering door het bezwijken van een windturbine. Als voor elk faalmechanisme wordt geëist dat de kans op schade kleiner

moet zijn dan 1% voor het betreffende mechanisme, dan komt dit erop neer dat de kans op schade kleiner moet zijn dan 1% van de strengste eis voor de mechanismen waarvoor de schade relevant is.

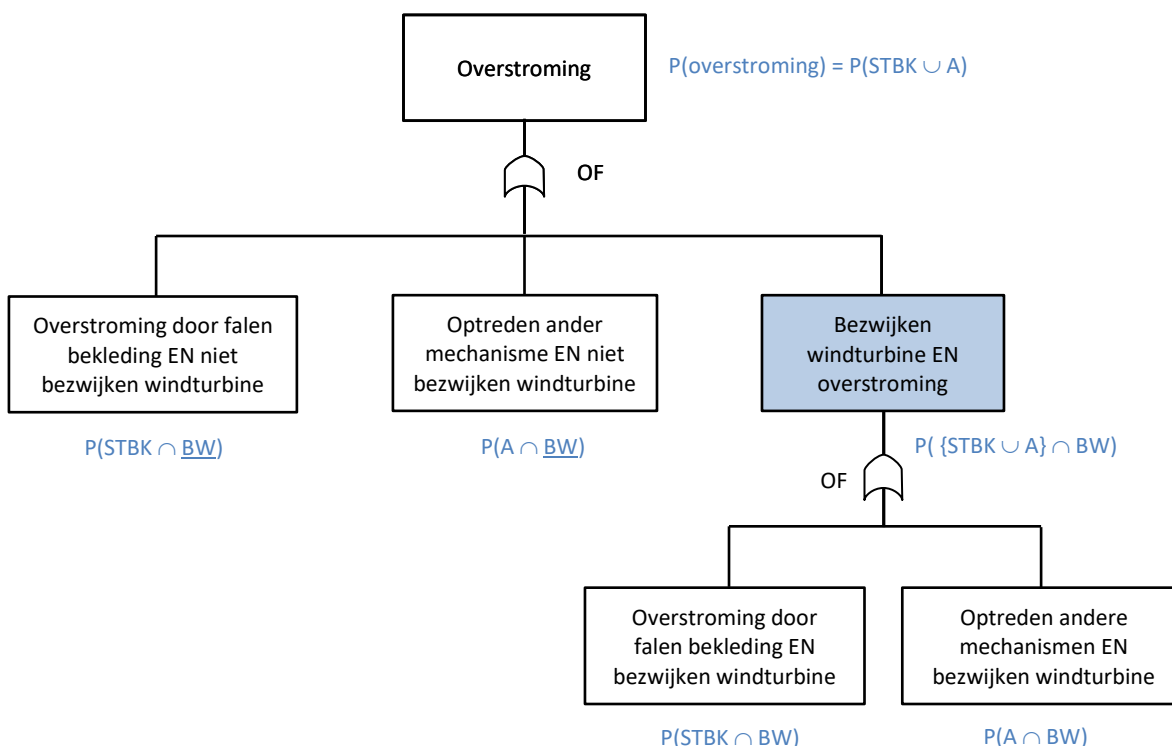
Getallenvoorbeeld

Beschouw wederom het hypothetische dijktraject uit paragraaf 3.4. De kans op mastbreuk is $1,3 \cdot 10^{-4}$ per jaar, er zijn 10 onafhankelijke windturbines en de trefkans is $1/5$. De kans op schade aan de bekleding door het bezwijken van een windturbine is zodoende gelijk aan $(1 - (1 - 1,3 \cdot 10^{-4} \times 1/5)^{10}) \approx 10 \times 1,3 \cdot 10^{-4} \times 1/5 = 2,6 \cdot 10^{-4}$ per jaar. Dit is groter dan $0,01 \times 5 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-8}$ per jaar. De beoordeling is (nog) conservatiever dan bij optie A3.

3.7 Optie B1: Kans op overstroming geïnitieerd door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de norm

Bij deze optie worden alle (directe) mechanismen die kunnen volgen op het bezwijken van een windturbine samengenomen en behandeld als een (direct) faalmechanisme. Dit betekent dat een overschrijding van het faalkansbudget met 1% wordt toegestaan. Een dusdanig kleine overschrijding is echter van geen enkele praktische betekenis.

In Figuur 5 is weergegeven op welk niveau de betrouwbaarheid van windturbines bij deze optie wordt beoordeeld.



Figuur 5. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld als het optreden van een overstroming en het bezwijken van een windturbine als een los faalmechanisme wordt behandeld (optie B1).

Getallenvoorbeeld

Beschouw wederom het hypothetische dijktraject uit paragraaf 3.4. Aangenomen is dat het bezwijken van een windturbine alleen van invloed is op de betrouwbaarheid van de steenbekleding. De kans op een overstroming en het bezwijken van een windturbine is

zodoende gelijk aan $2,6 \cdot 10^{-6}$ per jaar. De kans op een overstroming door het bezwijken van een windturbine moet bij deze optie kleiner zijn dan $0,01 \times 1/10.000 = 10^{-6}$ per jaar. Daarmee wordt net niet voldaan aan de eis. De aanpak B1 pakt duidelijk minder conservatief uit dan A3 en A4, maar is strenger dan A2.

4 Aandachtspunten bij beoordelingen van windturbines

Een verfijnde probabilistische beoordeling van windturbines op en nabij waterkeringen wordt al snel zeer complex. Het verdient dan ook aanbeveling om eventuele betrouwbaarheidsanalyses stapsgewijs op te bouwen (van grof naar fijn) en alleen complexe berekeningen uit te voeren (of te vragen in het kader van vergunningverlening) als dat werkelijk nodig is voor de besluitvorming. Enkele aandachtspunten zijn:

1. Als de kans dat (een onderdeel van) een windturbine bezwijkt vooral wordt bepaald door de kans op hoge windsnelheden, dan is de faalkans van de dijk in geval van een bezwiken windturbine niet langer te bepalen met de hydraulische randvoorwaarden zoals die met bijvoorbeeld Hydra-NL berekend kunnen worden. Met Hydra-NL kan de kansverdeling van de hoogste hydraulische belasting in een tijdperiode van een jaar worden bepaald. Een kans in een jaar is echter niet hetzelfde als een kans gegeven een hoge windsnelheid. Zo is de kans op overschrijding van een extreme zeewaterstand in een jaar niet hetzelfde als de kans op overschrijding van deze waterstand gegeven een zeer hoge windsnelheid. Om relatief complexe berekeningen te voorkomen, zou in het kader van 'van grof naar fijn', in eerste instantie uitgegaan kunnen worden van de voorzichtige aanname dat bij het bezwijken van de windturbine zeker sprake is van een hoge hydraulische belasting op de waterkering (volledige correlatie).
2. Als de kans dat (een onderdeel van) een windturbine bezwijkt vooral wordt bepaald door de kans op hoge windsnelheden, dan zal sprake zijn van een afhankelijkheid van de windrichting. Deze afhankelijkheid zal van invloed zijn op de trefkans van de waterkering.
3. In hoofdstuk 3 is steeds gekeken naar faalkanseisen op trajectniveau. Het kan echter praktischer zijn om de beoordeling per faalmechanisme op doorsnedeniveau (bij opties A2 t/m A4) of per windturbine (bij optie B1) uit te voeren. Het lengte-effect moet dan in de faalkanseis per faalmechanisme worden verwerkt (opties A2 t/m A4) of in de faalkanseis voor overstroming door het bezwijken van een windturbine (optie B1). In deze gevallen wordt het lengte-effect dan bepaald door zowel de eigenschappen van het faalmechanisme als door het aantal onafhankelijke, equivalente windturbines. Dit lengte-effect kan (1) worden verwerkt in de faalkanseis op doorsnedeniveau of per windturbine of (2) in de schatting van de faalkans die met de reguliere faalkanseis op doorsnedeniveau vergeleken wordt. Het tweede is praktischer, zeker bij optie B1. Ter illustratie:
 - a. De faalkanseis op doorsnedeniveau uit het WBI2017 geldt steeds voor een aaneengesloten, identieke bekleding met eenzelfde oriëntatie. Als er langs een dergelijke strekking meerdere windturbines staan, dan is het aantal windturbines van invloed op de faalkans van de strekking/'WBI2017-doorsnede'. Dit aanvullende lengte-effect kan tot uitdrukking worden gebracht in een strengere faalkanseis of in de kans dat er binnen de strekking ergens een windturbine bezwijkt.
 - b. De faalkanseis voor een faalmechanisme zoals macroinstabiliteit geldt al voor een relatief kleine lengte. Het aantal windturbines langs een dijktraject is dan ook niet van invloed op de faalkanseis voor macroinstabiliteit en het bezwijken van een windturbine bij opties A2 t/m A4.
4. Voor de bepaling van de faalkansen van onderdelen van windturbines wordt veelal gebruik gemaakt van de faalfrequenties uit het Handboek Risicozonering Windturbines

[2]. De hierin genoemde faalfrequenties zijn 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 omdat er anders sprake is van verborgen veiligheden.

5. De faalfrequenties voor o.a. mastbreuk uit het Handboek Risicozonering Windturbines [2] zijn enkele ordegrottes groter dan wat men zou mogen verwachten op grond van de betrouwbaarheidseisen die aan bouwwerken worden gesteld door de NEN-EN1990, zie Tabel 1.

Tabel 1. Faalkanseisen volgens de bouwvoorschriften en faalfrequentie voor mastbreuk volgens Handboek Risicozonering Windturbines.

Betrouwbaarheidseisen nieuwbouw volgens NEN-EN1990		Faalfrequentie mastbreuk (P95) uit Handboek Risicozonering, tabel 1 [2]
Gevolgklasse 2	$\beta_{50jr} = 3,8$ Dit correspondeert met gemiddeld $1,4 \cdot 10^{-6}$ per jaar	$1,3 \cdot 10^{-4}$ per turbine per jaar
Gevolgklasse 3	$\beta_{50jr} = 4,3$ Dit correspondeert met gemiddeld $1,7 \cdot 10^{-7}$ per jaar	

Het verdient aanbeveling om deze discrepantie nader te bekijken en de bouwvoorschriften indien nodig aan te scherpen. Wanneer windturbines zijn ontworpen volgens Gevolgklasse 3 zou mastbreuk nauwelijks nog relevant moeten zijn voor de kans op overstroming. Dit zou dan vermoedelijk ook moeten gelden voor het bezwijken van andere constructieve onderdelen/verbindingen (wiek, gondel). Als de kans op het bezwijken van (een onderdeel van) een windturbine zeer klein is, zou dit betrouwbaarheidsanalyses voor waterkeringen sterk vereenvoudigen.

Referenties

- [1] KPR. Factsheet post "overig" in de faalkansbegroting en indirecte mechanismen. Kennisplatform Risicobenadering, 09-11-2016.
- [2] Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. Handboek Risicozonering Windturbines. Versie 3.1, uitgave mei 2014, RVO.

Het kennisplatform risicobenadering is opgericht ter ondersteuning van de keringbeheerder bij toepassen van de nieuwe normering en de risicobenadering. Adviezen en ondersteuning van het kennisplatform risicobenadering hebben een informele status en staan gelijk aan collegiaal advies.