

## RAPPORT

# Windpark IJsselwind

### Beoordeling invloed op waterveiligheid

Klant: Waterschap Rijn en IJssel

Referentie: BE4157R001F3.0

Status: 3.0/Finale versie

Datum: 22 november 2018



HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35  
3818 EX AMERSFOORT  
Netherlands  
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 IJsselwind

Ondertitel: Beoordeling waterveiligheid WP IJsselwind  
Referentie: BE4157R001F3.0  
Status: 3.0/Finale versie  
Datum: 22 november 2018  
Projectnaam: WP IJsselwind  
Projectnummer: BE4157  
Auteur(s): ██████████ / ██████████

Opgesteld door: ██████████

Gecontroleerd door: ██████████

Datum/Initialen: 22/11/2018 JCo

Goedgekeurd door: ██████████

Datum/Initialen: 22/11/2018 MG

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

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doel en afbakening	5
1.3	Kader en aanpak	6
<b>2</b>	<b>Projectomschrijving</b>	<b>9</b>
2.1	Projectlocatie	9
2.2	Windparkonderdelen	11
2.3	Projectfasering	13
2.4	Waterkering	13
<b>3</b>	<b>Eisen voor de waterkering</b>	<b>14</b>
3.1	Zonering waterkering	14
3.2	Normspecificatie	14
3.3	Eisen ten aanzien van veiligheid	15
3.4	Eisen ten aanzien van robuustheid	15
3.5	Eisen ten aanzien van beheer en onderhoud	15
<b>4</b>	<b>Uitgangspunten en randvoorwaarden</b>	<b>16</b>
4.1	Beschikbare informatie	16
4.2	Geometrie kering	16
4.3	Bodemopbouw	17
4.4	Grondparameters	18
4.5	Hydraulische belastingen	18
4.6	Faalkanseisen	19
4.7	Partiële veiligheidsfactoren	21
<b>5</b>	<b>Belastingen</b>	<b>23</b>
5.1	Belastingen tijdens de bouwfase	23
5.2	Belastingen tijdens de gebruiksfase	26
5.3	Belastingen tijdens de verwijderingsfase	28
<b>6</b>	<b>Beoordeling ondergrondse effecten</b>	<b>29</b>
6.1	Relevante faalmechanismen	29
6.2	Beoordeling effecten op overloop en golfoverslag (HT)	31
6.3	Beoordeling effecten op binnenwaartse stabiliteit (STBI)	32
6.4	Beoordeling effecten op buitenwaartse stabiliteit (STBU)	35

6.5	Beoordeling effecten op opbarsten, piping en heave (STPH)	37
6.6	Beoordeling effecten voor bekleding	38
6.7	NWO's	38
<b>7</b>	<b>Beoordeling bovengrondse effecten op waterkering door falen van een windturbine</b>	<b>39</b>
7.1	Algemeen	39
7.2	Faalscenario's	39
7.3	Faalfrequentienorm	40
7.4	Toetsingscriterium	40
7.5	Trefafstanden	40
7.6	Kritische strook waterkering	41
7.7	Raakfrequenties	42
7.8	Restprofiel waterkering en responstijd	43
7.9	Additionele faalfrequentie	44
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>46</b>
8.1	Conclusies	46
8.2	Aanbevelingen	47
<b>9</b>	<b>Referenties</b>	<b>48</b>

## Tabellen

Tabel 2-1	Kenmerken windturbine	12
Tabel 2-2	Kenmerken te beschouwen waterkering	13
Tabel 4-1	Grondparameters (rekenwaarden)	18
Tabel 4-2	Hydraulische belasting ten behoeve van beoordeling	19
Tabel 4-3	Faalkansruimtefactoren per faalmechanisme	19
Tabel 4-4	Faalkanseisen per faalmechanisme op doorsnedeniveau	21
Tabel 4-5	Partiële factoren	22
Tabel 4-6	Veiligheidsfactoren stabiliteitsberekeningen op basis van MTK	22
Tabel 5-1:	overzicht grondversnellingen in de gebruiksfase	27
Tabel 6-1	Omschrijving faalmechanismen (figuren uit VTV2006)	29
Tabel 6-2:	Relevante faalmechanismen per projectfase met mogelijk effect	31
Tabel 6-3	Resultaten berekening stabiliteit binnenwaarts	33
Tabel 6-4	Resultaten berekening stabiliteit buitenwaarts	36
Tabel 7-1:	scenario's en faalfrequenties voor de windturbines	40

Tabel 7-2: Totale raakfrequenties waterkering DR50 (zuidzijde Twentekanaal)	42
Tabel 7-3: Totale raakfrequenties waterkering DR51 (noordzijde Twentekanaal)	43
Tabel 7-4: Faalfrequentie waterkering dijkkring 50 bij falen windturbines	44
Tabel 7-5: Faalfrequentie waterkering dijkkring 51 bij falen windturbines	44

## Figuren

Figuur 1-1 Geplande locaties windturbines WP IJsselwind (detail uit tekening BE4157-100-100-1145_SO-202)	5
Figuur 2-1 Geplande locaties WT1 en WT2 ten noorden van het Twentekanaal (tekening BE4157-100-100-1145_SO-201)	9
Figuur 2-2: Geplande locatie WT3 ten zuiden van het Twentekanaal (tekening BE4157-100-100-1145_SO-201)	10
Figuur 2-3 Geplande locaties WT1 (links) en WT2 (rechts) aan de noordzijde van het Twentekanaal (Bron: Google Earth)	10
Figuur 2-4 Geplande locatie WT3 (links) aan de zuidzijde van het Twentekanaal (bron: Google Earth) en hoogtegegevens stort (AHN-viewer)	11
Figuur 3-1 Legger waterschap Rijn en IJssel met locaties te beschouwen dwarsprofielen	14
Figuur 4-1 Beschouwde profielen waterkering langs Twentekanaal (groene pijl: locatie windturbines)	16
Figuur 4-2 Geschematiseerde bodemopbouw DP21 (WT2)	17
Figuur 4-3 Geschematiseerde bodemopbouw DP136 (WT3)	18
Figuur 5-1 Inschatting trillingsnelheden conform Muller (verwachtingswaarden) en CUR166 (95% bovengrens)	24
Figuur 5-2 Verwachte grondversnellingen	25
Figuur 6-1 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen binnentalud	33
Figuur 6-2 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen buitentalud	36
Figuur 7-1: effectafstanden voor faalscenario's windturbine	41
Figuur 7-2: trefkans als functie van de afstand	42

## Bijlagen

A1	Geotechnisch lengteprofiel waterkering noordzijde Twentekanaal
A2	Geotechnisch lengteprofiel waterkering zuidzijde Twentekanaal
A3	Sonderingen
A4	Afleiding hydraulische belastingen
A5	Controle opbarsten
A6	Controle piping en heave

- A7 Verwekingsanalyse
- A8 Resultaten stabiliteitsberekeningen
- A9 Tekening transportroutes en kraanopstelplaatsen
- A10 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



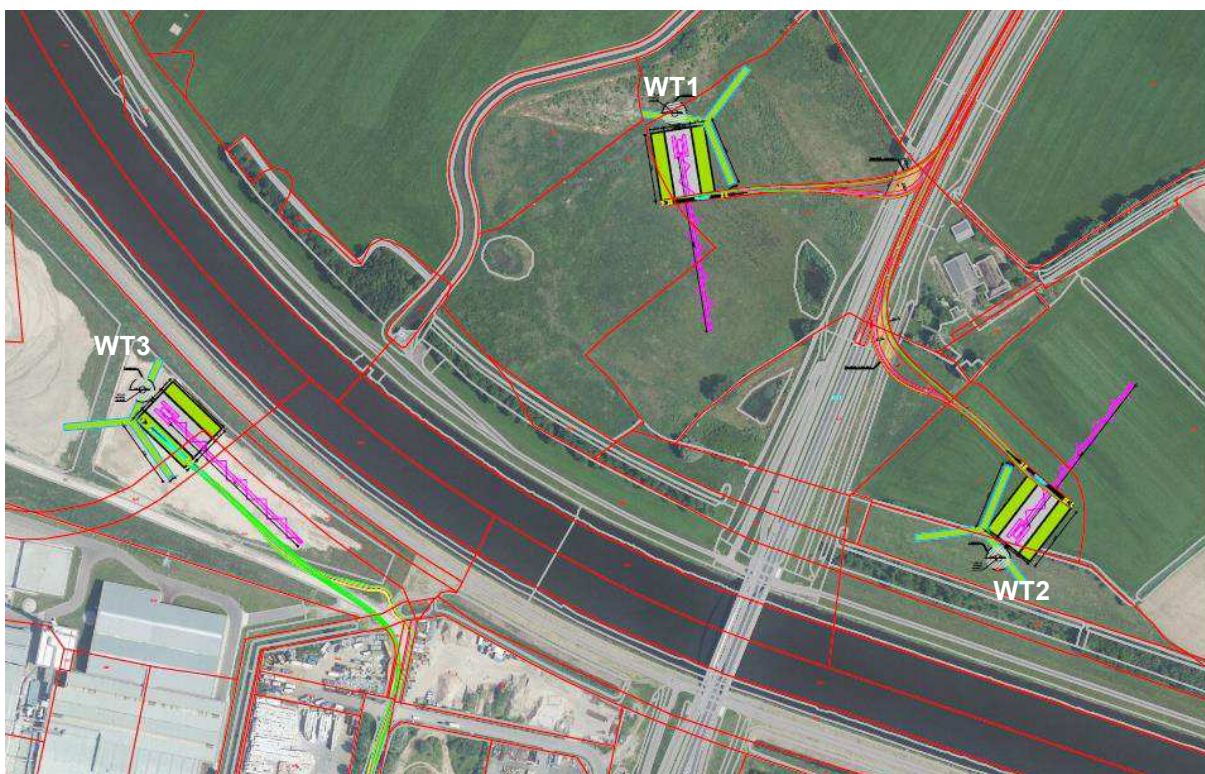
## 1 Inleiding

### 1.1 Aanleiding

IJsselwind BV, een gezamenlijke ontwikkelorganisatie van de vier energiecoöperaties uit de gemeenten Zutphen, Lochem, Brummen en Voorst, heeft samen met Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ) het initiatief genomen tot oprichting van een windpark langs het Twentekanaal ten noorden van Zutphen. Het windpark bestaat uit 3 windturbines (WT), waarvan WT2 en WT3 zijn voorzien in de beschermingszone van de (primaire) waterkering.

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). De keringen zijn in beheer bij WRIJ.



Figuur 1-1 Geplande locaties windturbines WP IJsselwind (detail uit tekening BE4157-100-100-1145\_SO-202)

### 1.2 Doel en afbakening

Vanwege de voorgenomen ligging van WT2 en WT3 in de beschermingszone van de keringen dient te worden aangetoond dat de waterkerende functie is gewaarborgd tijdens de bouw, het gebruik en het verwijderen van het windpark. Daarnaast mag het doelmatig beheer en onderhoud aan de waterkering niet worden bemoeilijkt en moet de kering in de toekomst versterkt kunnen worden.

WT1 is gepland buiten de waterkeringszone. De bouw en ontmanteling van de windturbine heeft geen invloed op de waterkering. Wel kan deze windturbine negatieve gevolgen hebben voor de waterveiligheid bij het afwerpen van een rotorblad door een calamiteit tijdens de gebruiksfase.

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;
  - Trillingen opgewekt door de windturbine;
  - Belastingtoename door transporten, kranen en materiaalopslag
  - Afname strekte 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. 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 er binnen het WBI2017 geen faalkansruimte gereserveerd. De faalkansruimte voor de bijdrage van NWO's dient gevonden te worden binnen de directe dijkfaalmechanismen, waarbij de kansbijdrage verwaarloosbaar klein dient te zijn. Op grond van een memo (Ref 1) van het Kennisplatform Risicobenadering (KPR) is uitgegaan van een maximale kansbijdrage van 1% van de norm op doorsnedeniveau.

De faalkanseisen op doorsnedeniveau worden bepaald middels de lengte-effect factoren N. Voor piping en macrostabiliteit wordt deze berekend op basis van de lengte van het dijktraject (zie paragraaf 4.6). Voor de overige mechanismen wordt in overleg met WSRIJ en HKV een conservatieve waarde van N=10 aangehouden.

In de KPR memo is tevens een overzicht gegeven van mogelijke beoordelingsmethodes voor windturbines nabij waterkeringen. Aan de hand van deze memo is in overleg met WRIJ en HKV ervoor gekozen het falen van de waterkering, geïnitieerd door eerdergenoemde effecten, te beschouwen als directe faalmechanismen. De waterkering op de bewuste locatie wordt hierbij beoordeeld zoals een willekeurige andere dijkdoorsnede door de schematisatie van de waterkering af te stemmen op de nieuwe situatie (scenario's). De faalkansen per faalmechanisme worden hierbij vergeleken met de faalkanseisen per faalmechanisme.



### 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)<sup>1</sup>
- Piping (STPH)
- Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI)
- Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU)
- Micro-instabiliteit (STMI)
- Instabiliteit van de bekleding
- Instabiliteit van het voorland door afschuiving of zettingsvloeiing (VLAF en VLZV)

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 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, waarbij analytisch verschillende scenario's worden beschouwd. Voor de beoordeling van de binnen- en buitenwaartse macrostabiliteit is gebruik worden gemaakt van het rekenprogramma D-GeoStability (versie 18.1) van Deltares.

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. 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. Bladbreek 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;
- Vaststellen raakfrequentie (faalfrequentie x trefkans);
- Bepalen restprofiel van de waterkering bij neerkomen van een windturbineonderdeel;
- Bepalen kans op falen restprofiel tijdens de herstelperiode

<sup>1</sup> 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.

- 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 boordeling zijn 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.

De additionele faalfrequentie is per windturbine berekend en getoetst aan de toegestane faalkanstoename op doorsnedeniveau (met factor N=10).

.

## 2 Projectomschrijving

### 2.1 Projectlocatie

Het plan voor Windpark IJsselwind betreft de aanleg van 3 windturbines langs het Twentekanaal, nabij de aansluiting van het kanaal op de IJssel. Windturbines WT1 en WT2 zijn voorzien aan de noordzijde van het kanaal (zie Figuur 2-1) en WT3 aan de zuidzijde (zie Figuur 2-2).



Figuur 2-1 Geplande locaties WT1 en WT2 ten noorden van het Twentekanaal (tekening BE4157-100-100-1145\_SO-201)







Figuur 2-4 Geplande locatie WT3 (links) aan de zuidzijde van het Twentekanaal (bron: Google Earth) en hoogtegegevens stort (AHN-viewer)

## 2.2 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. In de effectbeoordeling is uitgegaan van de referentieturbine General Electric 2.75-120 met onderstaande kenmerken (zie tabel 2-1). Indien gekozen wordt voor een ander type, dan dient te worden nagegaan of deze een gelijk (of geringer) gewicht heeft.

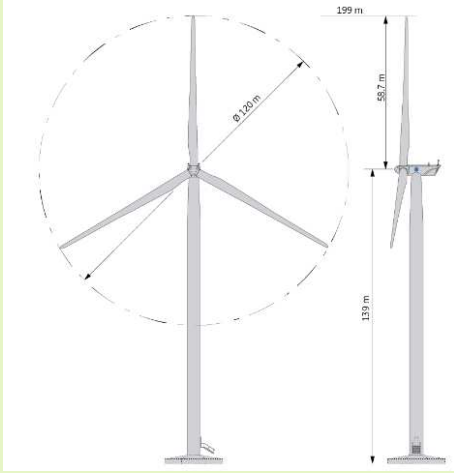
De fundering zal bestaan uit een ronde funderingsplaat, welke wordt gefundeerd op grondverdringende palen. De afmetingen van de fundering dienen nog ontworpen te worden na keuze van het type windturbine. De diameter van een fundering varieert veelal tussen de 15 en 20 m. De globale plaatdikte is circa 1,5 m aan de rand en circa 3 m in het midden (dit deel steekt boven maaiveld uit).

Voor de effectbeoordeling wordt uitgegaan van een ontgraving tot 1,5 m diepte en een diameter 20 m op ontgravingniveau. Belasting door het heien van palen is nader beschouwd in paragraaf 5.1.

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



Tabel 2-1 Kenmerken windturbine

Onderdeel	Input	
Type:	General Electric 2.75-120	
Gerealiseerde IEC klasse	IEC 2	
Ashoogte	125 m	
Rotordiameter	120 m	
Nominaal toerental	13 toeren/min	
Nominaal vermogen bij windsnelheid (10 min)	12,5 m/s	
Maximale windsnelheid roterende bladen	25 m/s	
Maximale snelheid uiteinde rotorblad	73,2 m/s	
Wiek lengte	58,42 m	
Lengte van de gondel	15 m	
Hoogte van de gondel	5 m	
Massa gondel	Ca. 93 ton <sup>1)</sup>	
Zwaartepunt rotorblad	21,6 m	
Oppervlak afgebroken blad	168 m <sup>2</sup>	
Massa 3 bladen en naaf	68 ton <sup>2)</sup>	
Massa weggeworpen blad(deel)	Ca 15 ton <sup>3)</sup>	
Rotor draait tegen de klok (-1) met de klok mee (1)	1	
Diameter van de toren	5 m	
Solidity (opp.bladen/opp. Rotor)	0,05	

- 1) Op basis van lineaire extrapolatie van de gewichten van de GE1.5s (49 ton) en de GE2.5xl (85 ton)
- 2) Op basis van lineaire extrapolatie van de gewichten voor de bladen en naaf van de GE1.5s (70 m diameter en 28 ton) en de GE2.5xl (100 m diameter en 52 ton).
- 3) Inschatting op basis van gewicht van de naaf van circa 25 ton.

### Kraanopstelplaats

Naast elke windturbine zal een kraanopstelplaats worden gerealiseerd, zie grijze vlakken in figuren 2-1 en 2-2. De afmetingen hiervan zijn circa 40x50 m<sup>2</sup>.

De kraanopstelplaatsen dienen geschikt te zijn voor belastingen door rupsbanden of kraanstampels. 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, bijvoorbeeld via de provinciale weg N348. Daarnaast zullen nieuwe op- en afritten naar de weg worden aangelegd. De wegverharding bestaat doorgaans uit een laag menggranulaat van circa 400 mm op een laag geogrid. In Bijlage A9 zijn de voorgenomen routes aangegeven. Er vinden in principe geen transporten over de waterkering plaats. Alleen voor regulier onderhoud wordt voor WT2 een toegang via de waterkering gemaakt ten noorden van het kanaal. De belasting vanuit de aanberming heeft een gunstig (tegenwerkend) effect op de stabiliteit (binnenwaarts) van de kering. In de beschouwing is om deze reden geen rekening gehouden met deze toegangsweg.

### Windparkbekabeling

Voor de aansluiting van de windturbines zullen kabels worden aangelegd. De ligging van de bekabeling is op dit moment nog niet duidelijk. 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 ontwerpfasen te worden uitgevoerd.

## 2.3 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 20 jaar;
- *Verwijderingsfase*: deze fase betreft het na de gebruiksfase, deels of volledig, verwijderen van de windparkonderdelen. Voor de verwijdering van de windturbinefundering is er vanuit gegaan dat de paalfundering gehandhaafd blijft.

## 2.4 Waterkering

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

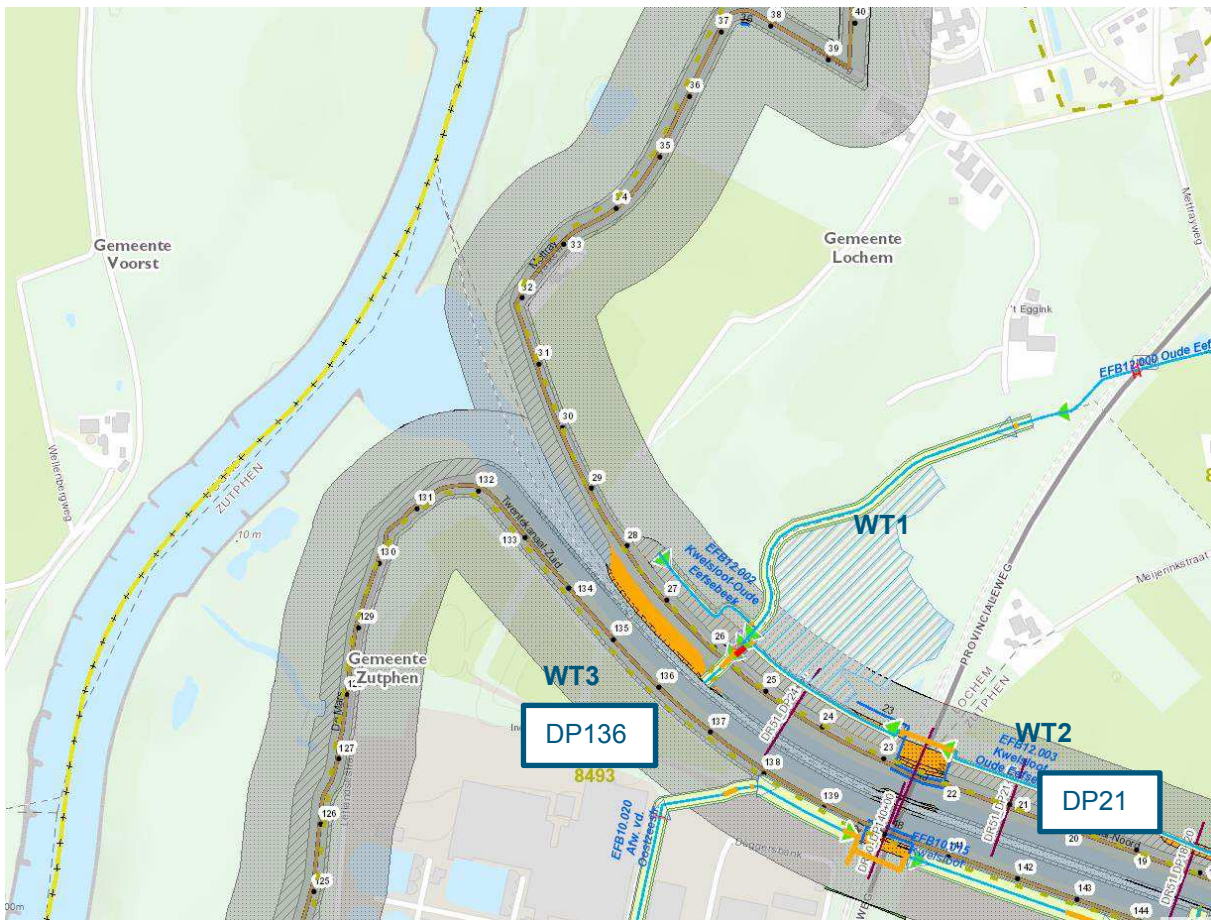
Tabel 2-2 Kenmerken te beschouwen waterkering

Onderdeel	WT1 & WT2 (Noord)	WT3 (Zuid)
Dijkbeheerder	WS Rijn en IJssel	WS Rijn en IJssel
Dijkkring	51 Gorssel	50 Zutphen
Dijktraject	51-1	50-2
Lengte dijktraject	23,7 km	7,7 km
Dijkpaal (Hm)	20-26	135-136
Dijkvak	Twentekanaal-Noord	Twentekanaal-Zuid
Doorsnede (legger/toetsing)	DP21	DP136
Signaleringswaarde (normfrequentie)	1/1000 per jaar	1/3000 per jaar
Maximaal Toelaatbare Kans (MTK)	1/300 per jaar	1/1000 per jaar

### 3 Eisen voor de waterkering

#### 3.1 Zonering waterkering

Onderstaande figuur is overgenomen uit de Legger van waterschap Rijn en IJssel. Hierop zijn de kern- en beschermingszone van de waterkering aangegeven en de locaties van de dwarsprofielen. WT2 en WT3 vallen binnen de beschermingszone van de keringen. Dwarsprofielen DP21 (noordzijde) en DP136 (zuidzijde) zijn gebruikt om de effecten van de windturbines op de waterveiligheid na te gaan.



Figuur 3-1 Legger waterschap Rijn en IJssel met locaties te beschouwen dwarsprofielen

#### 3.2 Normspecificatie

De normspecificatie voor de primaire waterkeringen, uitgedrukt in een overstromingskans per dijktraject, is conform [Ref 3] voor de noordzijde vastgesteld op 1:1000 per jaar (signaleringswaarde) en voor de zuidzijde op 1/3000 per jaar (signaleringswaarde), zie ook Tabel 2-2. De Maximaal Toelaatbare Kans (MTK) is een factor 3 groter dan de normspecificatie (afgerond op de dichtstbijzijnde normklasse), voor de noordzijde 1/300 per jaar en voor de zuidzijde 1/1000 per jaar. Uitgangspunt is dat wordt getoetst aan de MTK.

### 3.3 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 3.2 genoemde norm;
- De ontwerplevensduur voor de windturbines is vastgesteld op 20 jaar. Dit betekent dat de invloed van de windturbine gedurende deze twintig jaar niet significant dient te zijn.

### 3.4 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 20 jaar. Dit is verder uitgewerkt in paragraaf 4.5;
- Constructies inclusief funderingen mogen het profiel van vrije ruimte 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.

### 3.5 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.

## 4 Uitgangspunten en randvoorwaarden

### 4.1 Beschikbare informatie

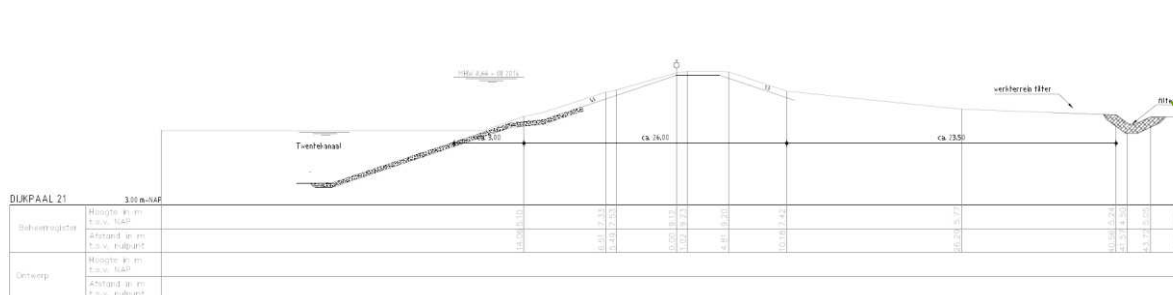
Ten behoeve van de beoordeling van de effecten van de windturbine op de waterveiligheid is de waterkering geschematiseerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende onderzoeken en gegevens:

- Beschikbaar grondonderzoek:
  - Langsprofiel noordzijde Twentekanaal, zie bijlage A1;
  - Langsprofiel zuidzijde Twentekanaal, zie bijlage A2 en [Ref 4];
- Informatie over bodemopbouw en grondparameters:
  - Rapport HWBP verkenning Arcadis [Ref 5];
  - Parameterset WRIJ [Ref 6];
  - DSoilModel [Ref 7];
- Informatie over de waterkering uit:
  - Legger [Ref 8]
  - Projectplan [Ref 9]
  - Rapport HWBP verkenning Arcadis [Ref 5.]

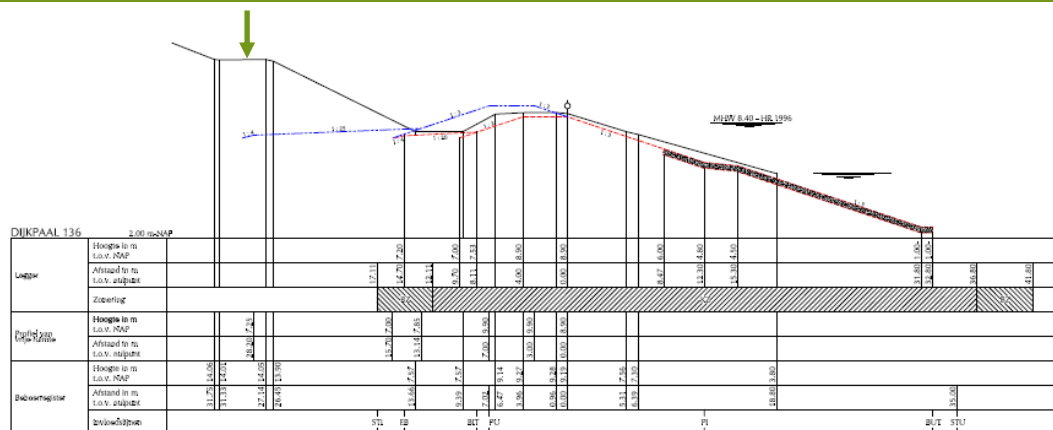
### 4.2 Geometrie kering

De volgende profielen zijn beschouwd ten behoeve van de beoordeling van de effecten van de windturbines op de waterkering, zie Figuur 4-1:

#### WT2: DP21 (noordzijde kanaal)



#### WT3: DP136 (zuidzijde kanaal)



Figuur 4-1 Beschouwde profielen waterkering langs Twentekanaal (groene pijl: locatie windturbines)



### Toekomstige dijkversterking: Verticaal Zanddicht Geotextiel

Naar aanleiding van resultaten van de derde toetsronde is voor dijktraject 51-16+10 tot 51-27+60 een dijkversterking ontworpen om problemen met piping tegen te gaan (zie Ref 5). Op dit traject zal een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) worden aangebracht. Het VZG is een geotextiel dat wordt geplaatst in een pipinggevoelige laag in de ondergrond, vanaf de binnenberm van de dijk. Eventuele invloed van de windturbines op dit VZG wordt in paragraaf 6.5 behandeld.

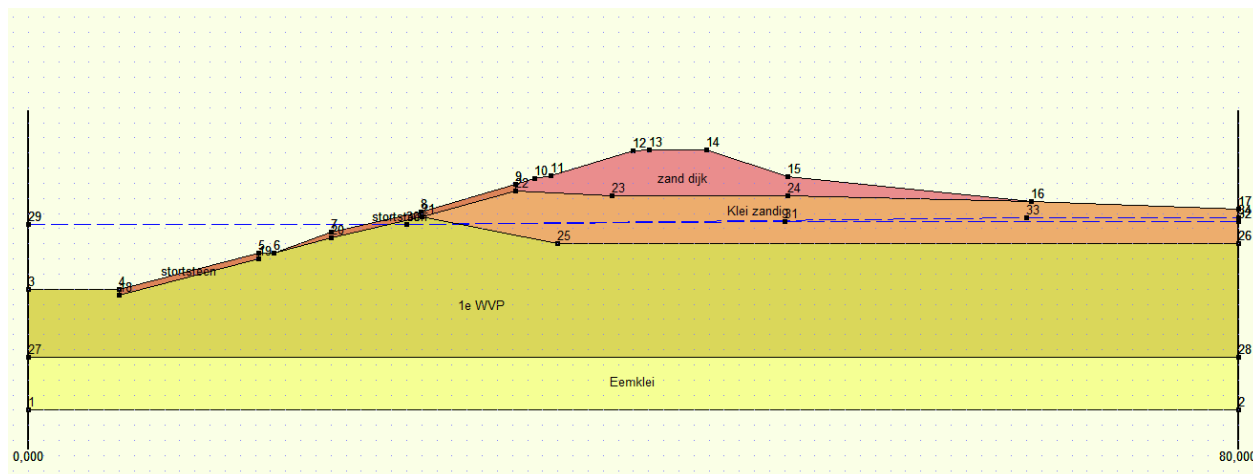
## 4.3 Bodemopbouw

Uit de resultaten van de sonderingen en boringen blijkt dat de ondergrond ter plaatse van de geplande windturbines veelal bestaat uit zand, zie ook bijlagen A1, A2 en A3. In eerdere (beschikbaar gestelde) rapportages en berekeningen is uitgegaan van een zanddijk op een zandondergrond.

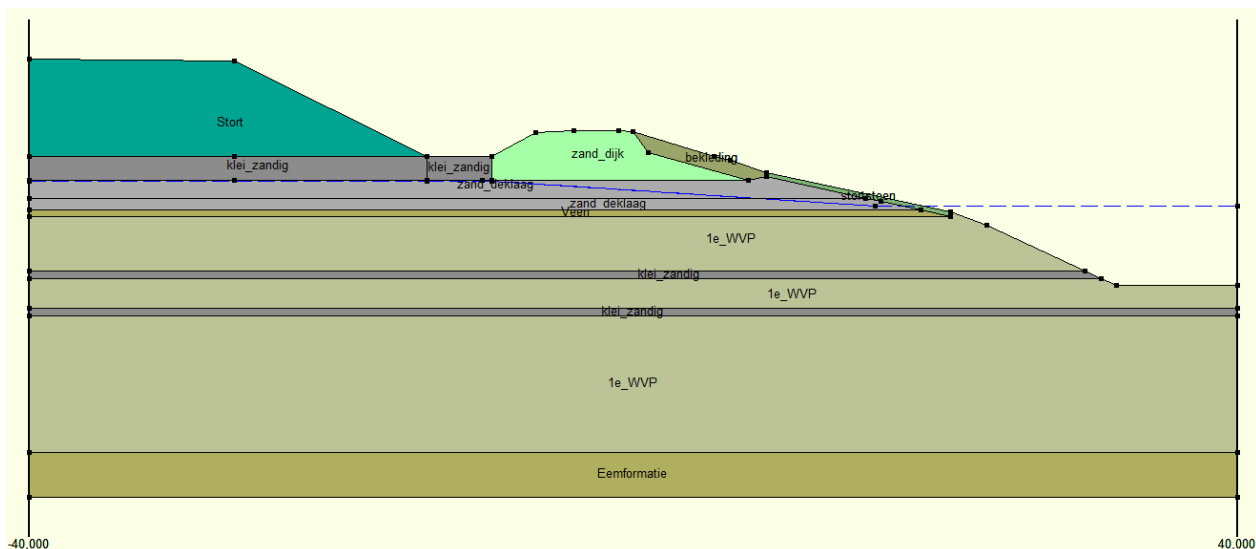
Voor deze beoordeling wordt gedetailleerder gekeken naar 2 profielen, DP136 (Zuidzijde) en DP21 (Noordzijde). Lokaal aangetroffen dunne samendrukbare/cohesieve lagen zijn als volgt geschematiseerd in de berekeningen:

- DP21: zanddijk, daaronder afwisseling van klei- en zandlagen tot een niveau van NAP +3 m, vervolgens zand tot een niveau van NAP -4,5 m, bovenzijde van de Eemklei;
- DP136: lokale veenlaag op NAP +4 m, dunne (0,4m) kleiige lagen op een niveau van NAP 0 m en NAP -2,5 m, overige lagen bestaan uit zand, met vanaf NAP -12 m de Eemklei (onderzijde model). In het achterland is op maaiveldniveau klei aangetroffen.

Onderstaand is de geschematiseerde bodemopbouw per profiel weergegeven.



Figuur 4-2 Geschematiseerde bodemopbouw DP21 (WT2)



Figuur 4-3 Geschematiseerde bodemopbouw DP136 (WT3)

## 4.4 Grondparameters

In Tabel 4-1 zijn de grondparameters voor de verschillende lagen gepresenteerd. Deze zijn overgenomen uit [Ref 5] en uit de door WRIJ aangeleverde stabiliteitsberekeningen. De meeste grondlagen reageren gedraineerd, daarom is ervoor gekozen niet te rekenen met Su-ratio, POP en m.

Tabel 4-1 Grondparameters (rekenwaarden)

grondsoort	Volumieke massa [kN/m <sup>3</sup> ] Veldvochtig/verzadigd	Mohr Coulomb model	
		Wrijvingshoek [°]	Cohesie [kPa]
Klei zandig	17,7/19	22,7	0,9
Zand deklaag	18/19	26,0	0
Zanddijk	19,5/20	28,0	0
Veen	11/11	12,0	4
1 <sup>e</sup> WVP (zand)	19/20	30,0	0
Eemformatie	18/18	25,0	10
Stortsteen	15/20	35,0	0
Bekleding	18/18,5	20,0	5
Stort	12/12	15,0	0

## 4.5 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 2045 met behulp van het programma Hydra-NL. De resultaten zijn opgenomen in onderstaande tabel en bijlage A4.

Tabel 4-2 Hydraulische belasting ten behoeve van beoordeling

	WT2 – DP21	WT3 - DP136
Geotechnische beoordeling behorende bij Maximaal Toelaatbare Kans	NAP +8,64 m	NAP +9,07 m
Dagelijkse waterstand	NAP +4,30 m	NAP +4,30 m
Hoge waterstand 1x per jaar	NAP +7,0 m	NAP +7,0 m
Waterstand na val HW	NAP +4,34 m	NAP +4,77

### 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 10], geval 2B (Zandkern op zandondergrond). De resultaten van de berekeningen van de stijghoogte zijn opgenomen in Tabel 6-3.

Op basis van de formules in OI2014V4 is de kritieke stijghoogte per profiel bepaald. In beide profielen is de veiligheid tegen opbarsten voldoende. Zie bijlage A5.

## 4.6 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 4-3.

Tabel 4-3 Faalkansruimtefactoren per faalmechanisme

Type waterkering	Faalmechanisme	Faalkansruimtefactor $\omega$
Dijk	Overloop en golfoverslag	0,24
	Opbarsten en piping	0,24
	Macrostabieliteit binnenwaarts	0,04
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	0,10
Kunstwerken	Niet sluiten	0,04
	Piping	0,02
	Constructief falen	0,02
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

Tabel 4-4:

Tabel 4-4 Faalkanseisen per faalmechanisme op doorsnedeniveau

Faalmechanisme	Faalkanseis $P_{eis;dsn}$ [per jaar]		Berekening (volgens par. 1.2 van OI2014v4)
	WT2 Noord	WT3 Zuid	
Macrostabieliteit binnenwaarts	1/124.815	1/152.050	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,04}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,033 \cdot L_{traject}}{50}$
Macrostabieliteit Buitenwaarts	1/12.482	1/15.205	Voor buitenwaartse macrostabieliteit is de faalkanseis op doorsnedeniveau voor macrostabieliteit gedeeld door de kans 0,1 op een overstrooming gegeven macrostabieliteitsverlies buitenwaarts
Piping	1/90.125	1/100.417	$P_{eis;dsn} = \frac{P_{max} \cdot 0,24}{N}$ met $N = 1 + \frac{0,9 \cdot L}{300}$

## 4.7 Partiële veiligheidsfactoren

Op basis van de voor de te beschouwen waterkering vereiste faalkanseis (zie



Tabel 4-4) en [Ref 1] zijn de partiële veiligheidsfactoren afgeleid, zie Tabel 4-5.

Tabel 4-5 Partiële factoren

factor	WT1 & WT2 (Noord)		WT3 (Zuid)	
	Obv MTK	Obv Signw	Obv MTK	Obv Signw
Schadefactor $\gamma_n$				
STBI – Mohr-Coulomb	1,04	1,07	1,05	1,08
STBI – CSSM	1,06	1,10	1,06	1,10
STBU - Mohr-Coulomb	0,97	1,01	0,98	1,01
STBU - CSSM	0,98	1,02	0,98	1,02
Modelfactor $\gamma_d$				
MC/Bishop - geen opdrukken	1,00		1,00	
MC/Bishop – wel opdrukken	1,10		1,10	
CSSM/Bishop	1,11		1,11	
Materiaalfactor $\gamma_m$	var		var	
Schematiseringsfactor $\gamma_b$	1,3		1,3	
Veiligheidsfactor Piping $\gamma_{pip}$	1,56	1,46	1,33	1,27
Schematiseringsfactor piping $\gamma_{b,p}$	1,2		1,2	
Veiligheidsfactor opbarsten $\gamma_{up}$	1,62	1,65	1,48	1,52
Schematiseringsfactor opbarsten $\gamma_{b,u}$	1,2		1,2	

### 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 4-6.

Tabel 4-6 Veiligheidsfactoren stabiliteitsberekeningen op basis van MTK

Faalmechanisme	Model	WT2-DP21	WT3-DP136
STBI	Mohr-Coulomb, Bishop	$\gamma = 1,04 * 1,0 * 1,3 = 1,35$	$\gamma = 1,05 * 1,0 * 1,3 = 1,37$
STBU	Mohr-Coulomb	$\gamma = 0,97 * 1,0 * 1,3 = 1,26$	$\gamma = 0,98 * 1,0 * 1,3 = 1,27$

## 5 Belastingen

### 5.1 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 4-2 met 'dagelijkse waterstanden'.

#### Kruinbelasting

Uitgangspunt is dat tijdens de bouwfase geen bovenbelasting op de kruin van de waterkering aanwezig is. Er vinden geen transporten over de waterkering plaats.

#### Belasting kraanopstelplaats

De kraanbelastingen bevinden zich direct naast de windturbines, bij turbine WT2 op minimaal 50 m uit de binnenteen en bij turbine WT3 direct aangrenzend aan de binnenteen.

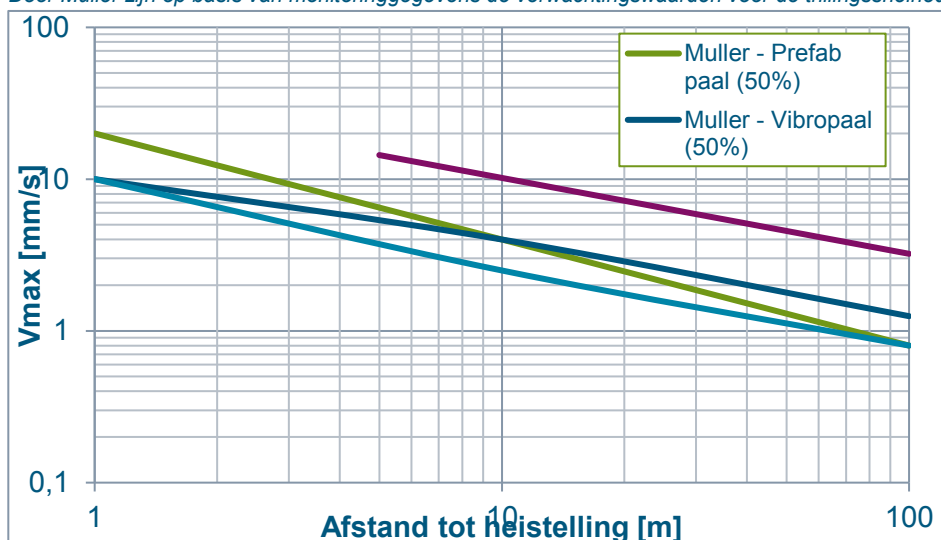
Deze belastingen hebben een gunstig (tegenwerkend) effect op de stabiliteit (binnenwaarts) van de kering. In de beschouwing is om deze reden geen rekening gehouden met de kraanbelastingen.

#### 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 trillingsnelheden zijn afhankelijk van de ondergrond, heien-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.

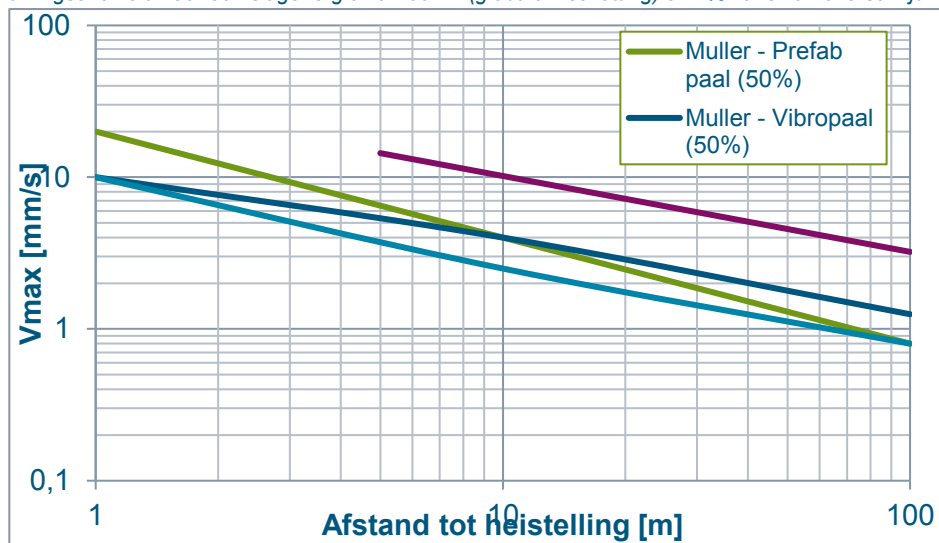
Door Muller zijn op basis van monitoringgegevens de verwachtingswaarden voor de trillingsnelheden bepaald, zie



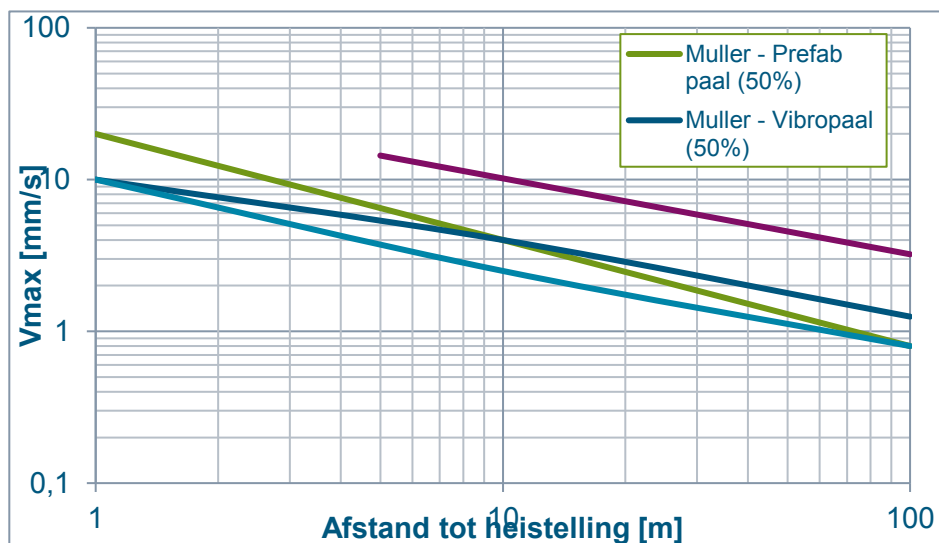
Figuur 5-1.

In CUR166 kan voor verschillende Nederlandse grondprofielen op basis van de potentiële heien-energie een inschatting worden gemaakt van de grondversnellingen. Voor de grondkarakteristieken is het grondprofiel van Maasvlakte aangenomen. De

trillingssnelheid voor een slagenergie van 50 kN (globale inschatting) en 1% kans van overschrijding is weergegeven in



Figuur 5-1.

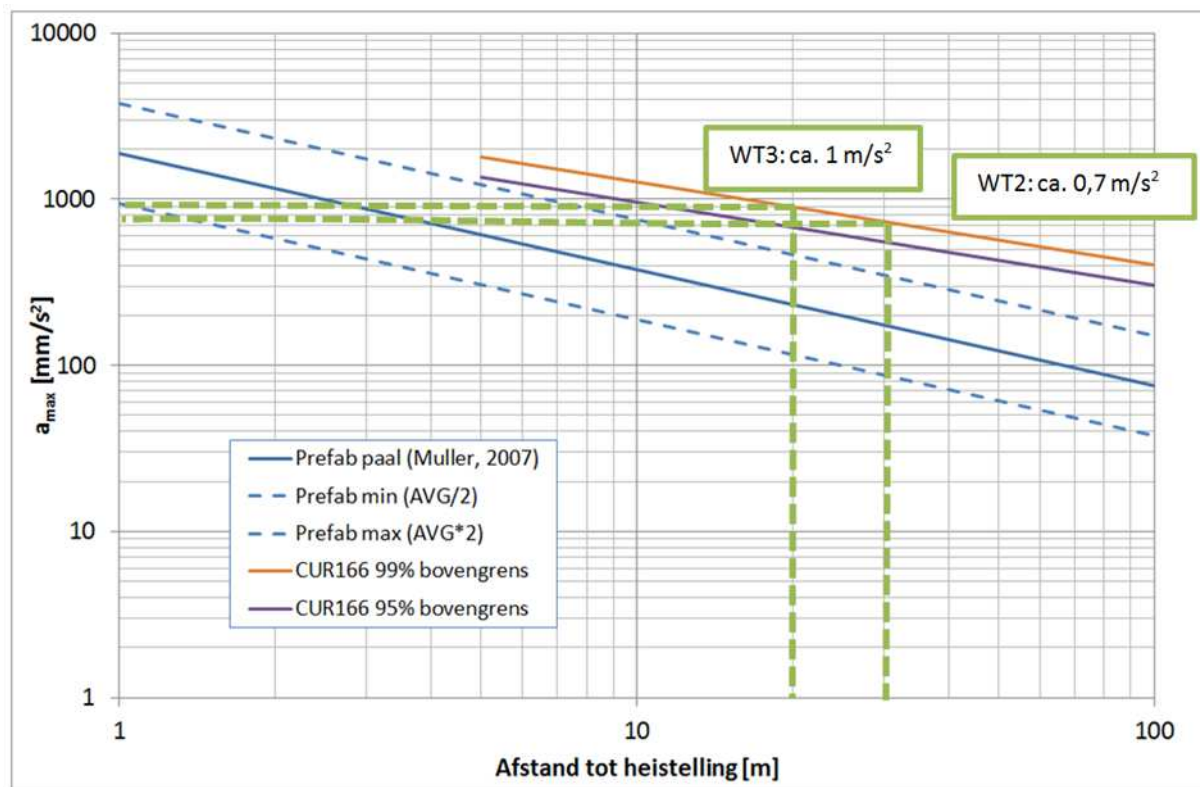


Figuur 5-1 Inschatting trillingssnelheden conform Muller (verwachtingswaarden) en CUR166 (95% bovengrens)

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

$$a_{\max} = (2 \times \pi \times f) \times V_{\max}$$

De grondversnellingen op basis van beide methoden zijn grafisch weergegeven in Figuur 5-2.



Figuur 5-2 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 WT3 is voorzien op minimaal 20 m afstand tot de binnenteen en WT2 op 30 m afstand tot de binnenteen.

Bij een afstand tussen de fundering en het talud van 20 m, is de grondversnelling, op basis van bovenstaande figuur, ca.  $1000 \text{ mm/s}^2$ , ofwel  $1 \text{ m/s}^2$ . Bij een afstand van 30 m is de grondversnelling ca.  $700 \text{ mm/s}^2$ , ofwel  $0,7 \text{ m/s}^2$ . Gekozen is te rekenen met een versnelling van  $1 \text{ m/s}^2$ , ofwel  $0,1g$ . Voor het buitentalud 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 demping.

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 korte 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. De wateroverspanning in zandlagen bedraagt zelden meer dan 20% van de verticale korrelspanning. Na enkele uren is de wateroverspanning weer verdwenen (Deltares, 2016).

Vanwege de zandige opbouw van de waterkering en de ondergrond zullen wateroverspanningen snel afnemen bij toenemende afstand tot de paal. 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 20 m, er is om deze reden geen rekening gehouden met wateroverspanningen.

## 5.2 Belastingen tijdens de gebruiksfase

Voor het Twentekanaal geldt dat er geen correlatie is tussen stormseizoenen en een hoogwaterafvoer. Er is geen richtlijn bekend waarin de aan te houden waterstand in deze situatie is beschreven. In de beoordeling is voor de situaties met hoge en extreme windsnelheden daarom de keuze gemaakt uit te gaan van een waterstand welke 1x per jaar kan voorkomen, zie Tabel 4-2.

### 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/s<sup>2</sup>**, 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/s<sup>2</sup>.
- 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/s<sup>2</sup> (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 trillingsnelheid 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/s<sup>2</sup> 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 5-1.

Tabel 5-1: overzicht grondversnellingen in de gebruiksfase

Fase	Situatie	Grondversnellingen	
		Horizontaal [m/s <sup>2</sup> ]	Verticaal [m/s <sup>2</sup> ]
Gebruik (dagelijkse omstandigheden)	Gemiddelde wind (8,5 m/s)	0,04	0,04
	Noodstop/windstoot	0,25	0,125
Gebruik (extreme omstandigheden)	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 <sup>2</sup>	0,01 tot 0,035 m/s <sup>2</sup>
$a_{vert}$	0,02 tot 0,075 m/s <sup>2</sup>	0,015 tot 0,05 m/s <sup>2</sup>

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 trillingsnelheid 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/s<sup>2</sup>.

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/s<sup>2</sup> zijn gemeten.

In de stabiliteitsberekeningen is voor het gehele grondmodel een gelijke versnelling opgelegd, zonder rekening te houden met demping. 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 8.2). In onderhavige analyse is een eventueel effect niet meegenomen.

**Wateroverspanningen**

Tijdens het gebruik worden de cyclische belastingen via het stijve funderingsblok over de palen herverdeeld. 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.

**5.3 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 4-2 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 binnenzijde van de waterkering. Deze belastingen hebben een gunstig (tegenwerkend) effect op de binnenwaartse stabiliteit. In de stabiliteitsberekeningen is om deze reden geen rekening gehouden met de kraanbelastingen.

**Grondversnellingen door slopen fundament**

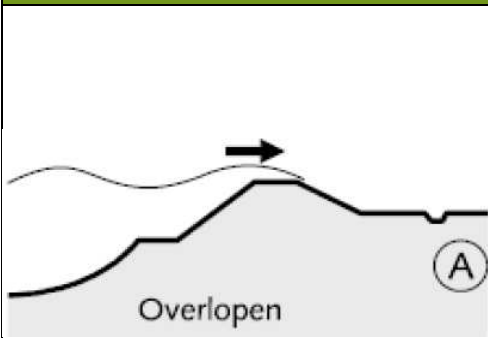
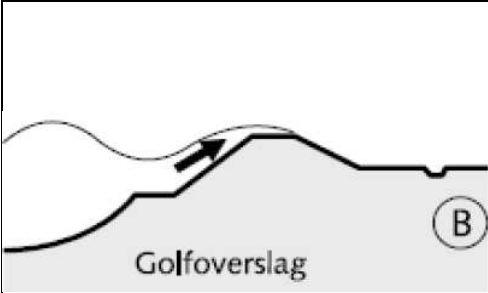
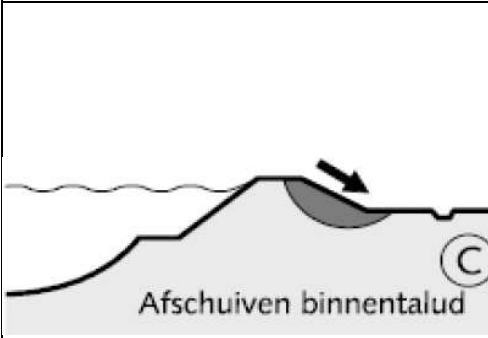
Voor de verwijdering van het blok van de windturbine funderingen zal als hoofdmaterieel gebruik worden gemaakt van een hydraulische graafmachine met een sloophamer. Deze draait doorgaans met 310-390 toeren/min, ofwel een frequentie van 5 à 6 Hz. Bij deze frequentie wordt een versnelling verwacht van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




## 6 Beoordeling ondergrondse effecten

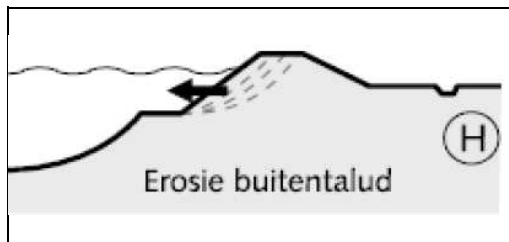
### 6.1 Relevante faalmechanismen

Het beschouwen van mogelijke 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 6-1.

Tabel 6-1 Omschrijving faalmechanismen (figuren uit VTV2006)

Faalmechanisme	Omschrijving effecten op belasting/sterkte
 <p>Overlopen</p> <p>(A)</p>	<p>Overlopen in combinatie met doorgaande erosie leidt tot een overstroming. De weerstand hiertegen wordt o.a. bepaald door de hoogte van de kruin.</p> <p><u>Effecten</u></p> <p><i>Bouwfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Afname van de kruinhoogte door verdichting/verweking van de zandige waterkering als gevolg van heitruillingen;</li> <li>Eventueel: een tijdelijke open ontgraving voor de kruising van kabels leidt tot een tijdelijke kruinhoogteverlaging.</li> </ul> <p><i>Gebruiksfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Afname van de kruinhoogte door verdichting/verweking van de zandige waterkering als gevolg van trillingen van het fundament;</li> </ul> <p><i>Verwijderingsfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Afname van de kruinhoogte door verdichting/verweking van de zandige waterkering als gevolg van trillingen tijdens sloop van het fundament.</li> </ul>
 <p>Golfoverslag</p> <p>(B)</p>	<p>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.</p> <p><u>Effecten</u></p> <p><i>Bouwfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Eventueel: door de aanleg van kabels aan de buitenzijde kan schade optreden aan de grasbekleding met tijdelijk verminderde erosiebestendigheid;</li> </ul> <p><i>Alle fasen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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.</li> </ul>
 <p>Afschuiven binnentalud</p> <p>(C)</p>	<p>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.</p> <p><u>Effecten</u></p> <p><i>Bouwfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Toename van belasting door trillingen tijdens het heien van palen;</li> <li>Ontgraving voor een eventuele kabelsleuf evenwijdig aan de waterkering.</li> <li>Ontgraving voor de fundering van het fundament (WT2).</li> </ul> <p><i>Gebruiksfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Trillingen van het fundament als gevolg van cyclische windbelastingen kunnen leiden tot toename van de grondbelasting;</li> </ul> <p><i>Verwijderingsfase:</i></p>

Faalmechanisme	Omschrijving effecten op belasting/sterkte
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toename van belasting door trillingen tijdens het slopen van het fundament.</li> </ul>
 <p>Afschuiven buitentalud</p>	<p>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.</p> <p><u>Effecten</u></p> <p><i>Bouwfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Toename van belasting door trillingen tijdens het heien van palen;</li> <li>Eventueel: afname sterkte door ontgraving voor kabels.</li> </ul> <p><i>Gebruiksfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Trillingen van het fundament als gevolg van cyclische windbelastingen kunnen leiden tot toename van de grondbelasting;</li> </ul> <p><i>Verwijderingsfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Toename van belasting door trillingen tijdens het slopen (fundament).</li> </ul>
 <p>Micro-instabiliteit</p>	<p>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.</p> <p><u>Effecten</u></p> <p>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.</p>
 <p>"Piping"</p>	<p>Piping betreft kwelstroming door de ondergrond waarbij achter de dijk erosie ontstaat en grond meegevoerd wordt (zandmeevoerende wellen). Voor dit mechanisme zijn het verval (hoge buitenwaterstand) en de stroomsnelheid van belang. De weerstand wordt bepaald door de kwelweglengte en grondeigenschappen.</p> <p>Op locaties waar een deklaag van klei aanwezig is, is piping in ieder geval een relevant faalmechanisme. De situatie zanddijk op zandondergrond is normaal niet gevoelig voor piping, maar door WRIJ is aangegeven dat aan de noordzijde van het kanaal bij WT2 wel degelijk piping is waargenomen. Uit de sonderingen blijkt ook dat hier kleiige lagen voorkomen.</p> <p><u>Effecten</u></p> <p><i>Bouwfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Eventueel: aanleg van kruisende kabel kan leiden tot erosie door kwelstroming langs de kabel;</li> <li>Ontgraving ten behoeve van aanleg fundament kan een nieuw uittredepunt introduceren met kortere kwelweglengte;</li> <li>Bij doorsteken van de slechtdoorlatende grondlagen met funderingspalen kan een nieuwe kwelweg ontstaan. Echter, bij gebruik van grondverdringende palen en een goede aansluiting van de kleiige lagen in de deklaag op het fundament, is de kans hierop minimaal.</li> </ul> <p><i>Gebruiksfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Eventueel: kruisende kabel kan leiden tot erosie door piping/kwelstroming langs de kabel.</li> <li>Kiervorming langs palen, waardoor kwelweg wijzigt;</li> </ul> <p><i>Verwijderingsfase:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Door het verwijderen van de palen of door betonrot kan kwelwegverkorting optreden.</li> </ul>

 <p>Erosie buitentalud (H)</p>	<p>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.</p> <p><u>Effecten</u> <u>Bouwfase:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eventueel: bij aanleg van kruisende leiding in een sleuf wordt de bekleding van de dijk tijdelijk verzwakt.</li> </ul>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Aan de hand van het voorgaande overzicht is gesteld dat de ontwikkeling van het windpark effect kan hebben op de volgende faalmechanismen:

Tabel 6-2: Relevante faalmechanismen per projectfase met mogelijk effect

Faalmechanisme	Bouwfase	Gebruiksfase	Verwijderingsfase
Overlopen (HT)	Trilling Aanleg kabels <sup>1)</sup>	Trilling	Trilling
Golfoverslag (HT)			
Afschuiven binnentalud (STBI)	Trilling	Trilling	Trilling
Afschuiven buitentalud (STBU)	Trilling	Trilling	Trilling
Microstabiliteit (STMI)	-	-	-
Piping (STPH)	Aanleg kabels <sup>1)</sup> Aanleg fundament Palen	Palen	Palen
Bekleding (STBK)	Aanleg kabels <sup>1)</sup>	-	-
Niet-waterkerende objecten (NWO)	Aanleg kabels <sup>1)</sup>	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.

## 6.2 Beoordeling effecten op overloop en golfoverslag (HT)

Tijdens de aanleg van kruisende kabels (op deze locaties zeer onwaarschijnlijk) in een open ontgraving zal de kruinhoogte tijdelijk worden verlaagd. Bij bouw van de windturbines onder dagelijkse omstandigheden is voldoende veiligheidsmarge aanwezig.

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 aanvulmateriaal wordt gebruikt en de profielopbouw en grasbekleding zoveel mogelijk wordt hersteld.

De ondergrond is niet gevoelig voor verweking/verdichting. De zandlagen zijn voldoende past gepakt en/of de zandlagen worden afgewisseld door kleilagen, zie bijlage A5. Er wordt daarom geen afname van de kruinhoogte verwacht door trilling en verdichting van het zand.

Een (eventuele) verhoging/verbreding van de waterkering in binnenwaartse richting wordt 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.*

### 6.3 Beoordeling effecten op binnenwaartse stabiliteit (STBI)

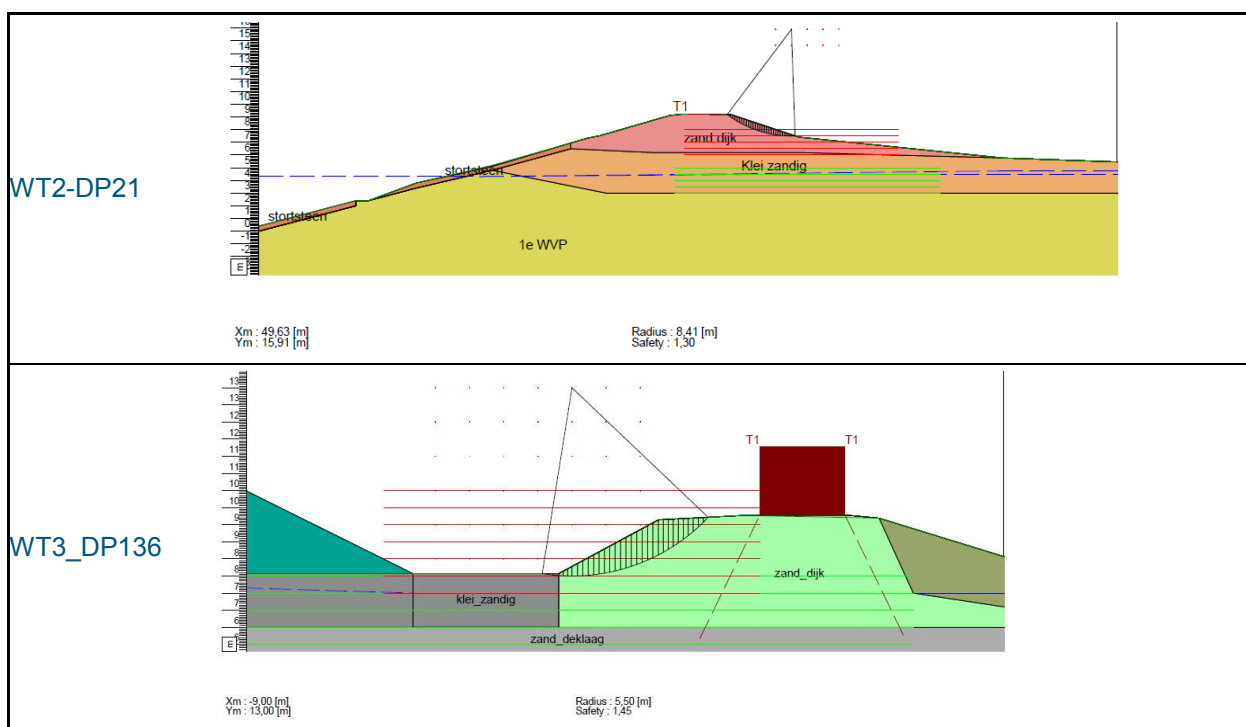
De ontwikkeling van het windpark leidt niet tot verandering van de bodemopbouw van de waterkering of de ondergrond.

Tijdens de aanleg van de windturbine wijzigt de geometrie van de kering tijdelijk, indien graverij ten behoeve van de aanleg van kabels parallel aan de kering en het fundament (ontgraving van 1,5 m diep) benodigd is. Deze werkzaamheden vinden plaats onder dagelijkse omstandigheden en vormen geen waterveiligheidsrisico. Voor DP21 geldt dat de veiligheid tegen afschuiven bij een ontgraving van 1,5 m diep en >15 m breed op een afstand van 20 m uit de binnentoeen >1,37 is.

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 5.1 en 5.3). Door middel van glijvlakberekeningen is nagegaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit, zie bijlage A8.

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 5.2 zijn de te verwachten grondversnellingen afgeleid. Door middel van glijvlakberekeningen is nagegaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit van de waterkering.

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



Figuur 6-1 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen binnentalud

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

Opgemerkt wordt dat bij dagelijkse omstandigheden de buitenwaterstand een lager niveau heeft dan het maaiveld aan de binnenzijde, zodat geen sprake is van een waterveiligheidsrisico. Voor het beoordelen van de uitvoeringswijze is deze situatie wel beschouwd (vanuit beheer en onderhoud van de waterkering is dit wel van belang).

Tabel 6-3 Resultaten berekening stabiliteit binnenwaarts

Locatie profiel	Situatie	WS BU [m NAP]	WS BI [m NAP]	SH [m NAP]	Kruin [kPa]	versnelling		Berekende Stab.factor	
						hor	vert		
WT2 (DP21)	huidig	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0	0	1,71
		HW 1x per jaar	+7,00	+5,0	+5,71	13,3	0	0	1,71 <sup>1)</sup>
		extreem	+8,64	+5,0	+6,30	13,3	0	0	1,67
	bouw	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0,10g	0,10g	1,30
		Ontgraving (1,5m)	+4,30	+4,5	+4,75	0	0,10g	0,10g	<1,30 <sup>2)</sup>
	gebruik	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0,004g	0,004g	1,69
		Extreem-draaiend	+7,00	+5,0	+5,71	13,3	0,008g	0,004g	2,05
		Extreem-stilstaand	+7,00	+5,0	+5,71	13,3	0,016g	0,008g	1,99
		Extreem-noodstop	+7,00	+5,0	+5,71	13,3	0,025g	0,0125g	1,92
		Extreem HW	+8,64	+5,0	+6,30	13,3	0,004g	0,004g	1,64
sloop	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0,03g	0,015g	1,56	



Locatie profiel	Situatie		WS BU [m NAP]	WS BI [m NAP]	SH [m NAP]	Kruin [kPa]	versnelling		Berekende Stab.factor
							hor	vert	
WT3 DP136	huidig	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0	0	1,51
		HW 1x per jaar	+7,00	+7,0	+7,00	13,3	0	0	1,51
		extreem	+9,07	+7,0	+7,86	13,3	0	0	1,10 <sup>3)</sup>
	bouw	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0,10g	0,10g	1,20 <sup>4)</sup>
		gebruik	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0,004g	0,004g
	gebruik	Extreem-draaiend	+7,00	+7,0	+7,00	13,3	0,008g	0,004g	1,48
		Extreem-stilstaand	+7,00	+7,0	+7,00	13,3	0,016g	0,008g	1,45
		Extreem-noodstop	+7,00	+7,0	+7,00	13,3	0,025g	0,0125g	1,41
		Extreem HW	+9,07	+7,0	+7,86	13,3	0,004g	0,004g	1,09 <sup>5)</sup>
	sloop	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0,03g	0,015g	1,39

WS BU Waterstand in Twentekanaal

WS BI Grondwaterstand binnenzijde

SH Stijghoogte van grondwater in diepere zand

Hor/vert Horizontale en verticale versnelling

- 1) Bij een diep glijvlak is een stabiliteitsfactor berekend van 2,11. De veiligheid is echter gelijk gesteld aan de dagelijkse omstandigheden: het maatgevende glijvlak is ondiep gelegen in het binnentalud, onafhankelijk van de waterstand en kruinbelasting.
- 2) Bij een ontgraving van 1,5 m is er onvoldoende veiligheid tegen opbarsten. Het talud van de ontgraving is bij helling 1:2 onvoldoende stabiel. Dit is echter een lokale glijcirkel, deze is niet relevant voor de waterkering zelf.
- 3) Dit betreft een glijcirkel vanuit de binnenkruin welke op circa 1 m uit de binnenteen uittreedt. De kering is voldoende breed, de waterveiligheid wordt niet aangetast.
- 4) Dit betreft een glijcirkel vanuit de binnenkruin welke direct bij de binnenteen uittreedt. Tijdens de bouw, onder dagelijkse omstandigheden, veroorzaakt dit geen waterveiligheidsrisico. De veiligheid tegen afschuiven van het talud is, vanuit beheer en onderhoud, voldoende.
- 5) Dit betreft een glijcirkel vanuit de binnenkruin, welke op circa 1 m uit de binnenteen uittreedt. De glijcirkel is relatief ondiep en zal de waterveiligheid niet beïnvloeden. De verkeersbelasting heeft geen effect op de berekende veiligheidsfactor.

Uit de stabiliteitsberekeningen van het binnentalud blijkt het volgende:

- In de 'huidige' situatie onder extreme omstandigheden zonder trillingen, is bij profiel DP136 een stabiliteitsfactor uitgerekend van 1,1. Dit betreft echter een ondiepe glijcirkel, die geen invloed heeft op de waterveiligheid. De waterveiligheid blijft voldoende;
- Tijdens de aanleg van de windturbines (heien van funderingspalen) wordt een stabiliteitsfactor van 1,20 en 1,30 uitgerekend. De berekende factoren zijn voldoende voor de bouwphase onder dagelijkse omstandigheden;
- Bij aanleg van WT2 zal een ontgraving op circa 20 m uit de binnenteen nodig zijn. Bij deze ontgraving kan de resterende kleiige laag opbarsten. Hiervoor dienen maatregelen te worden genomen (bemaling, strooksgewijs ontgraven). Bij een verlaagd achterland is de veiligheid van de kering nog wel gewaarborgd, maar voldoet niet aan 1,37;
- Tijdens gebruik van de windturbines bij dagelijkse windcondities en waterstanden voldoen beide locaties. De berekende stabiliteitsfactoren laten een afname zien van 1%, ten opzichte van de referentiesituatie onder dagelijkse omstandigheden. Dit is een afname van de veiligheid van 0,04%.
- Voor de gebruikssituatie onder extreme omstandigheden, met hoogwater dat 1x per jaar voorkomt, zwaar verkeer op de kruin van de waterkering en extreme wind is de berekende

veiligheidsfactor 3% tot 9% lager dan de referentiesituatie. Dit is een afname van de veiligheid van 0,12 tot 0,36%.

- Voor de gebruikssituatie bij extreem hoogwater, normale windcondities en zwaar verkeer op de kruin neemt de stabiliteitsfactor met 1% à 2% af. De berekende veiligheidsfactor is bij DP136 lager dan de eis (net als de referentiesituatie).

*Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat gebruik van heipalen bij de aanleg van de fundering van WT2 en WT3 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 verwaarloosbare effecten zal hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit. Onder dagelijkse omstandigheden neemt de veiligheid met circa 0,04% (ten opzichte van de norm) af en wordt aan de minimale faalkanseis voldaan. Onder extreme omstandigheden neemt de veiligheid af met 0,12% tot 0,36%.*

*De additionele faalkans van de windturbines is minder dan 1% van de norm en voldoet daarmee aan de eis.*

#### **6.4 Beoordeling effecten op buitenwaartse stabiliteit (STBU)**

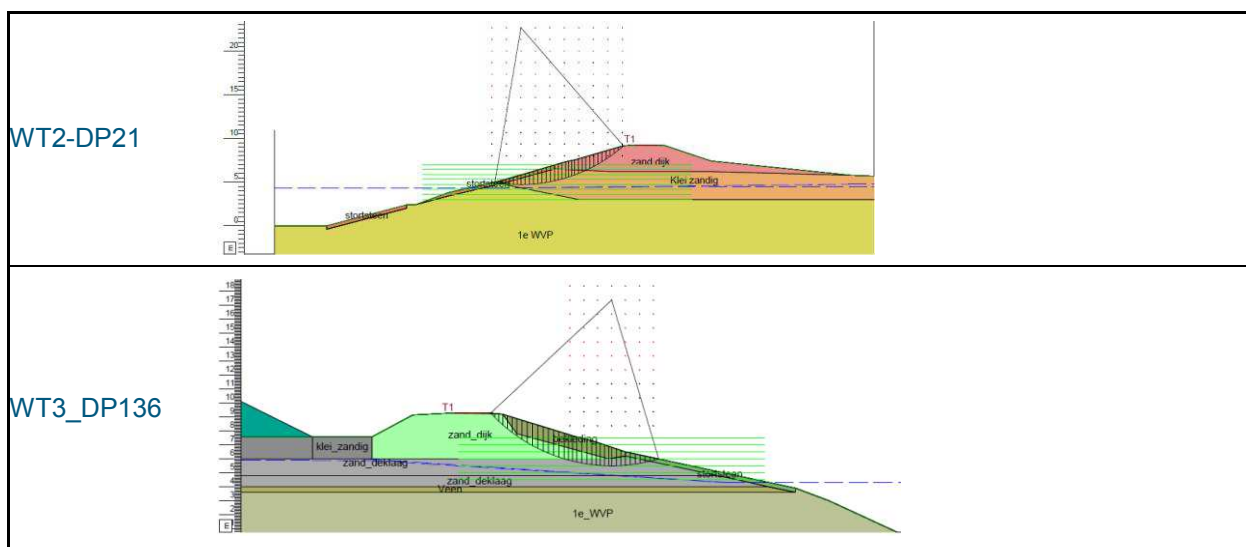
De ontwikkeling van het windpark leidt niet tot verandering van de bodemopbouw van de waterkering of de ondergrond.

Tijdens de aanleg van de windturbine wijzigt de geometrie van de kering tijdelijk, indien graverij ten behoeve van de aanleg van de kabels nodig is. Deze werkzaamheden vinden plaats buiten het stormseizoen en leiden niet tot verlaging van de waterveiligheid.

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 5.1 en 5.3. 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 5.2 zijn de te verwachten grondversnellingen afgeleid. Door middel van glijvlakberekeningen is nagegaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit van de waterkering, zie bijlage A8.

Ter illustratie is in onderstaande figuur het resultaat van een berekening opgenomen.



Figuur 6-2 Voorbeelden stabiliteitsberekeningen buitentalud

De resultaten van de stabiliteitsberekeningen staan in de volgende tabel.

Tabel 6-4 Resultaten berekening stabiliteit buitenwaarts

Locatie profiel	Situatie		WS BU [m NAP]	WS BI [m NAP]	SH [m NAP]	Kruin [kPa]	versnelling		Berekende Stab.factor
							hor	vert	
WT2 (DP21)	huidig	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0	0	1,74
		extreem	+4,34	+5,0	+4,76	13,3	0	0	1,74
	Bouw	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0,10g	0,10g	1,29
		gebruik	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0,004g	0,004g
	gebruik	Extreem-stilstaand	+4,34	+5,0	+4,76	13,3	0,016g	0,008g	1,64
		sloop	dagelijks	+4,30	+4,5	+4,75	0	0,03g	0,015g
WT3 DP136	huidig	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0	0	1,95
		extreem	+4,77	+6,5	+6,08	13,3	0	0	1,61
	bouw	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0,10g	0,10g	1,46
		gebruik	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0,004g	0,004g
	Extreem-stilstaand		+4,77	+6,5	+6,08	13,3	0,016g	0,008g	1,52
	sloop	dagelijks	+4,30	+6,0	+5,88	0	0,03g	0,015g	1,76

WS BU Waterstand in Twentekanaal  
 WS BI Grondwaterstand binnenzijde  
 SH Stijghoogte van grondwater in diepere zand  
 Hor/vert Horizontale en verticale versnelling

Uit de stabiliteitsberekeningen van het buitentalud van de kering (zijde Twentekanaal) blijkt het volgende:

- De berekende stabiliteitsfactor voldoet voor alle situaties aan de gestelde eis (veiligheidsfactor dient  $\geq 1,26$  of  $\geq 1,27$  te zijn);

- Tijdens de aanleg van de windturbines (heien van funderingspalen) neemt de veiligheid van de kering wel flink af (1%), maar blijft de stabiliteitsfactor voldoende hoog;
- Tijdens gebruik van de windturbines onder dagelijkse omstandigheden neemt de stabiliteitsfactor met 2% af, dit is een afname in veiligheid van 0,08%;
- Voor de gebruikssituatie onder extreme omstandigheden, met hoogwater, zwaar verkeer op de kruin van de kering en stilstaande bladen, is de berekende stabiliteitsfactor 1,52 à 1,64. Ten opzichte van de referentiesituatie is dit een afname van de berekende factor van 6%. Dit is een afname van de veiligheid van 0,24%.

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

*Onder dagelijkse omstandigheden zal bij het gebruik van het windpark de veiligheid van de waterkering met 0,08% zijn afgenomen. Bij extreme omstandigheden is de afname groter (0,24%).*

## 6.5 Beoordeling effecten op opbarsten, piping en heave (STPH)

Zoals beschreven in paragraaf 4.3 is de bodem op de te beschouwen locaties vrij zandig. De dijk bestaat ook uit zand. De situatie 'zand-op-zand' is niet piping gevoelig. Echter, bij profiel DP21 (WT2) zijn wat kleiige lagen aangetroffen (of een zandlaag met een geringere doorlatendheid) en in het achterland van DP136. Daarom is toch een controle op piping uitgevoerd.

### Effect WT2 op DP21

Voor DP21 (WT2) geldt dat bij ontgravingen ten behoeve van de aanleg van de kabels en het fundament de bodemopbouw lokaal kan worden verstoord en de deklaag voor een deel wordt verwijderd, waardoor opbarsten mogelijk is. Hierdoor kan een uittredepunt voor piping ontstaan.

De aandrijvende kracht bij piping is het waterstandverschil over de kering. Het optredend stijghoogteverschil is onder dagelijkse omstandigheden (veel) kleiner dan het kritische verhang.

Onder maatgevende opstandigheden zal, in de situatie waarbij ter plaatse van de binnenteen de kleilaag ontbreekt of kwel langs de paalfundering mogelijk is, de aanwezige kwelweglengte onvoldoende zijn. Er is kans op het optreden van piping. Om piping te voorkomen gelden de volgende voorwaarden:

- De ontgraving in de bouwfase dient onder dagelijkse omstandigheden te worden uitgevoerd. De maximaal toelaatbare waterstand tijdens de uitvoeringsfase bedraagt NAP +5,85m.
- Voor de paalfundering dient een grondverdringend paalsysteem te worden toegepast.
- Bij het aanvullen van de sleuf en rondom het fundament moet nauwkeurig worden gewerkt, cohesieve lagen moeten in dunne lagen worden teruggebracht (conform oorspronkelijke opbouw) en voldoende worden verdicht.

### Effect WT1 en WT2 op ZVG

Op het traject DP51-16+10 tot DP51-27+60 zijn maatregelen voorzien ter voorkoming van piping: het toepassen van een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG). Essentieel voor het functioneren van het VZG is de doorlatendheid (filterwerking). Het effect van de windturbine op het VZG wordt verwaarloosbaar geacht om de volgende redenen:

- De windturbines staan op een afstand van 50 à 80 m van het VZG. Op deze afstand zijn de te verwachten trillingen (veroorzaakt door de windturbine) nauwelijks nog waarneembaar ten opzichte van de achtergrondtrillingen.
- De lage trillingen leiden naar verwachting niet tot verandering in de pakkingsdichtheid of korrelgrootte van het zand (geen vergruizing) of in afname van de maaswijdte van het geotextiel. De doorlatendheid van het scherm blijft hierdoor ongewijzigd.

- De geringe trillingen leiden tot verwaarloosbare rekken in de ondergrond en in het scherm. De belastingen en rekken zijn verwaarloosbaar in vergelijking met de rekken en belastingen die zijn opgetreden tijdens het aanbrengen van het scherm. Het geotextiel is bovendien zeer geschikt om rekken op te nemen.

#### **Effect WT3 op DP136**

De windturbine WT3 bij DP136 wordt dusdanig hoog aangelegd dat hier geen relevant uitredepunt zal ontstaan. Hier geldt alleen dat bij graverij voor de aanleg van kabels, het aanvullen van de sleuf nauwkeurig moet worden gedaan, cohesieve lagen moeten in dunne lagen worden teruggebracht (conform oorspronkelijke opbouw) en voldoende worden verdicht.

*Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de plaatsing en aanwezigheid van WT2 mogelijk effecten zal hebben op het mechanisme piping. Als voorwaarde geldt dat een grondverdringend paalsysteem moet worden toegepast. Daarnaast dient de uitvoering onder normale omstandigheden plaats te vinden met een maximale buitenwaterstand van NAP +5,85m.*

*Het effect van de trillingen op het VZG wordt verwaarloosbaar geacht.*

*Voor locatie WT3 geldt dat de effecten niet noemenswaardig zijn, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw'.*

## **6.6 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 aangesloten op het fundament.

*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 aansluiting.*

*Uitvoering dient onder normale omstandigheden plaats te vinden.*

## **6.7 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 Beoordeling bovengrondse effecten op waterkering door falen van een windturbine

### 7.1 Algemeen

Naast de beoordeling van de ondergrondse effecten is ook beschouwd het mogelijk falen van de waterkering als gevolg van incidenten van onderdelen van de windturbine of de windturbine als geheel. 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.

In dit hoofdstuk wordt de additionele faalkansbijdrage bepaald per turbine en getoetst aan het criterium. De aanpak is al 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.

### 7.2 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.

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 'afwerp 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.

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.

### 7.3 Faalfrequentienorm

De faalfrequenties voor de voorgenoemde maatgevende windturbine zijn afkomstig uit (RVO, 2014) en zijn in onderstaande tabel weergegeven. De waarden zijn geldig voor windturbines vanaf 1 MW tot en met 5 MW.

Tabel 7-1: scenario's en faalfrequenties voor de windturbines

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

### 7.4 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.

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

- WT1 & WT2 - Dijktraject 51-1:  $1/300 \times 0,01 \times 1/10 = 3,33 \cdot 10^{-6}$ ;
- WT3 - Dijktraject 50-2:  $1/1000 \times 0,01 \times 1/10 = 1,0 \cdot 10^{-6}$ .

### 7.5 Trefafstanden

#### Omvallen windturbine

Conform het handboek is het maximale valbereik de som van de ashoogte en een halve rotordiameter, ofwel  $125 \text{ m} + 120/2 = 185 \text{ m}$ . Waarbij wordt opgemerkt dat de gondel een puntimpact geeft en daardoor de grootste schade zal veroorzaken. De rotorbladen zullen over het algemeen versplinteren en een beperkte impact hebben.

#### Rotor/gondelval

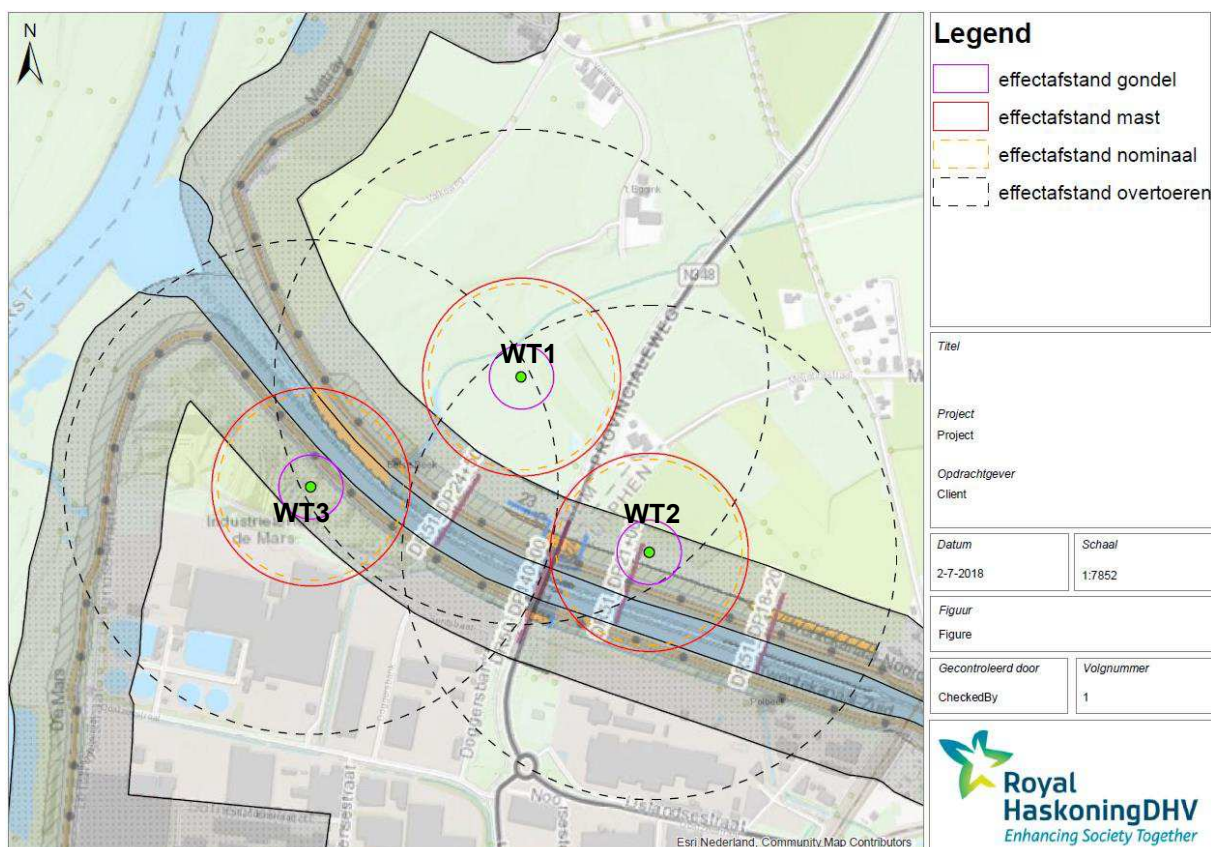
De praktijk heeft uitgewezen dat de zone van het neerkomen van het gondelhuis niet verder reikt dan een halve rotordiameter. De maximale trefafstand voor het naar beneden vallen van het gondelhuis en/of rotornaaf is gelijk aan:  $120/2 = 60 \text{ meter}$



### Bladbreek

Op basis van het Handboek zijn de effectafstanden van bladafworp bepaald. Hierbij zijn twee scenario's onderscheiden. Nominaal toerental en overtoeren (2x nominaal toerental). De werpafstand is bepaald op **174 m** voor het scenario bladbreuk bij nominaal toerental. De werpafstand bedraagt **462 m** voor het scenario bladbreuk bij overtoeren (2x nominaal toerental). Binnen deze afstanden liggen zowel de beschermingszone en het waterstaatswerk.

De trefafstanden zijn weergegeven in Figuur 7-1.



Figuur 7-1: effectafstanden voor faalscenario's windturbine

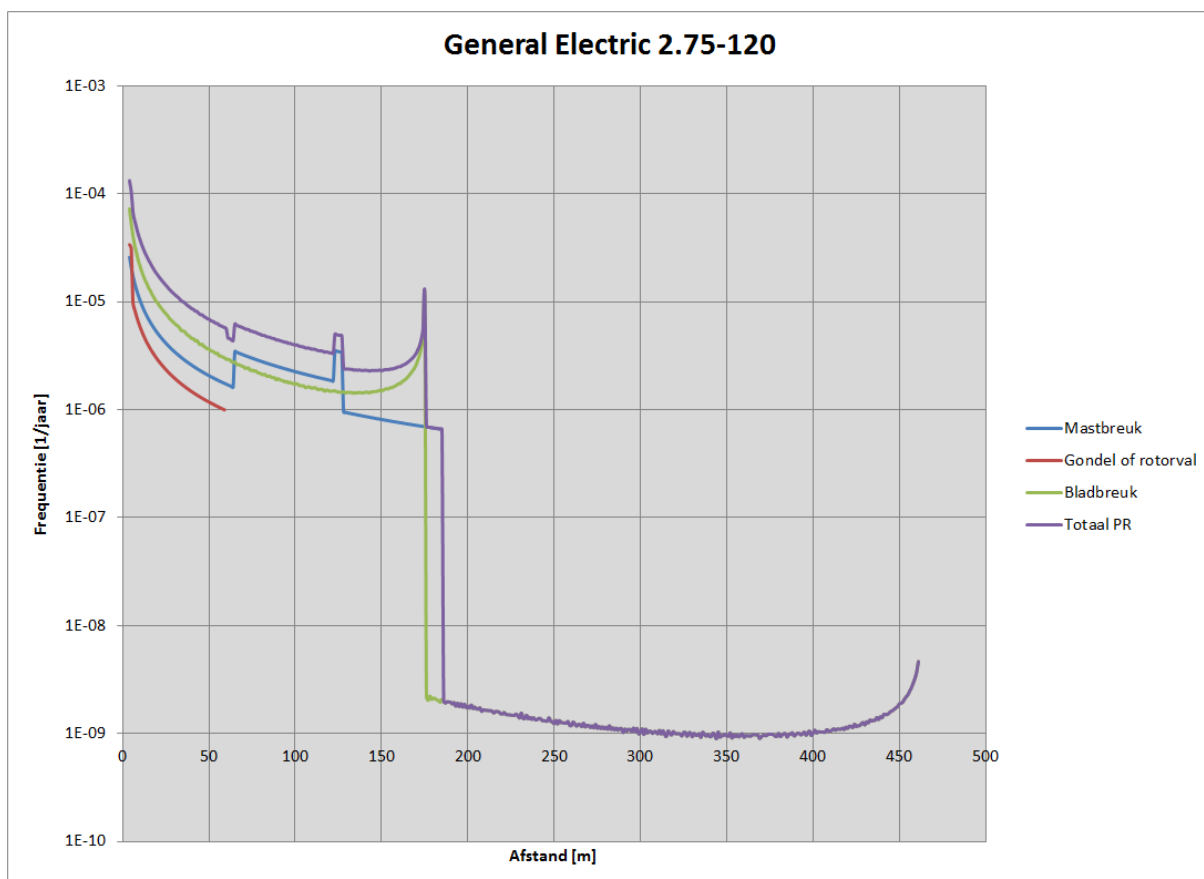
## 7.6 Kritische strook waterkering

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.

Als kritische strook is de waterkeringszoning aangehouden tot aan het waterniveau. De kritieke zone is in Figuur 7-1 grijs gearceerd.

## 7.7 Raakfrequenties

Berekend is de kans dat een falende windturbine of windturbineonderdeel neerkomt in de kritische strook. Vermenigvuldiging van de faalfrequentie met de trefkans en het aantal windturbines resulteert in de raakfrequentie. De trefkans als functie van de afstand is grafisch weergegeven in Figuur 7-2.



Figuur 7-2: trefkans als functie van de afstand

In onderstaande tabellen zijn de raakfrequenties samengevat voor de waterkering aan de noord- en zuidzijde van het kanaal. Voor mastbreuk is onderscheid gemaakt tussen:

- Mastbreuk, effect door gondel en mast;
- Mastbreuk, alleen effect door mast (gondel valt buiten de kritieke zone).

Tabel 7-2: Totale raakfrequenties waterkering DR50 (zuidzijde Twentekanaal)

WT	Bladworp - Nominaal	Bladworp - Overtoeren	Mastbreuk, gondel en mast	Mastbreuk, alleen mast	Gondel	Totaal	Eenheid
1	0	$3,22 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	$3,22 \cdot 10^{-7}$	[1\j]
2	$3,30 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-7}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	0	0	$5,80 \cdot 10^{-5}$	[1\j]
3	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-6}$	$2,75 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	[1\j]
Totaal	$5,10 \cdot 10^{-4}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$	$5,20 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$7,08 \cdot 10^{-4}$	[1\j]

Tabel 7-3: Totale raakfrequenties waterkering DR51 (noordzijde Twentekanaal)

WT	Bladworp - Nominaal	Bladworp - Overtoeren	Mastbreuk, gondel en mast	Mastbreuk, alleen mast	Gondel	Totaal	Eenheid
1	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$5,87 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	0	0	$4,89 \cdot 10^{-5}$	[1j]
2	$5,09 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-6}$	$3,09 \cdot 10^{-5}$	$9,91 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$6,81 \cdot 10^{-4}$	[1j]
3	$7,06 \cdot 10^{-5}$	$5,67 \cdot 10^{-7}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	0	0	$1,04 \cdot 10^{-4}$	[1j]
Totaal	$6,03 \cdot 10^{-4}$	$3,17 \cdot 10^{-6}$	$8,89 \cdot 10^{-5}$	$9,91 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$8,34 \cdot 10^{-4}$	[1j]

## 7.8 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 A10 zijn berekeningen gemaakt om de kraterdiepte te bepalen. Uit deze berekeningen volgt dat bij neerkomen van een complete gondel met rotor een kraterdiepte van circa **3,7 m** wordt verwacht. Bij neerkomen van een rotorblad wordt een indringing van **1,5 m** verwacht bij nominaal toerental en **2,0 m** bij overtoeren.

Schade aan de waterkering 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 het aanbrengen van een noodoplossing maximaal 7 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 3,7 m neemt de kerende hoogte af. Daarnaast zou door de schokgolf en gewicht van het onderdeel een afschuiving kunnen optreden.

Voor beide dijkvakken, aan zowel de noord- als zuidzijde kan door de kratervorming de kruin worden verlaagd van circa NAP +9,2 m naar NAP +5,5 m. In dat geval kan een waterstand van circa NAP +5,0 m nog worden gekeerd. Op basis van historische peilmetingen (RWS meetpunt Zutphen Noord) wordt aangenomen dat deze waterstand gedurende maximaal 4 maanden per jaar wordt overschreden. De faalkans van de kering tijdens de herstelperiode is dan:

$$P(\text{falen tijdens herstel; mastbreuk/gondelval}) = 4/12 \times 7/365 = 6,46 \cdot 10^{-3} (0,6\%)$$

### Val van rotorblad

Bij het neerkomen van een rotorblad op de waterkering zal deze met 1,5 m (nominaal) à 2 m (overtoeren) kunnen worden verlaagd.

Bij bladafworp met nominaal toerental zal de kruinhoogte worden verlaagd van NAP +9,2 m naar NAP +7,9 m. Bij deze hoogte kan een waterstand van NAP +7,3 m worden gekeerd die één keer per twee jaar voorkomt. De kans op overstroming tijdens de herstelperiode is dan gelijk aan:

$$P(\text{falen tijdens herstel; val rotorblad}) = 1/730 \times 7/365 = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ (0,003\%)}$$

Bij bladafworp tijdens overtoeren zal de kruinhoogte worden verlaagd van NAP +9,2 m naar NAP +7,2 m. De waterstand die nog kan worden gekeerd zal enkele keren per jaar kunnen voorkomen. Uitgaande van een frequentie van 5 keer per jaar is de kans op overstroming tijdens de herstelperiode gelijk aan:

$$P(\text{falen tijdens herstel; val rotorblad}) = 5/365 \times 7/365 = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ (0,026\%)}$$

## 7.9 Additionele faalfrequentie

De additionele faalfrequentie bij elke van de verschillende faalscenario's is bepaald als product van de totale raakfrequentie (paragraaf 7.7) en de kans dat de beschadigde waterkering faalt tijdens de herstelperiode (zie par. 7.8).

Er geldt dan:

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

De resultaten zijn samengevat in Tabel 7-4 en Tabel 7-5 voor respectievelijk dijkkring 50 en 51.

Tabel 7-4: Faalfrequentie waterkering dijkkring 50 bij falen windturbines

WT	Bladworp - Nominaal	Bladworp - Overtoeren	Mastbreuk, gondel en mast	Mastbreuk, alleen mast	Gondel	Eenheid
1	0	$8.37 \cdot 10^{-11}$	0	0	0	[1\j]
2	$8.58 \cdot 10^{-10}$	$1.30 \cdot 10^{-10}$	$1.58 \cdot 10^{-7}$	0	0	[1\j]
3	$1.24 \cdot 10^{-8}$	$6.06 \cdot 10^{-10}$	$1.78 \cdot 10^{-7}$	$6.65 \cdot 10^{-7}$	$2.58 \cdot 10^{-7}$	[1\j]

Uit tabel 7-4 blijkt dat in alle gevallen de additionele faalkans kleiner is dan de toegestane faalkanstoename van  $1,0 \cdot 10^{-6}$  per jaar. Het maatgevende faalscenario is mastbreuk, waarbij de mast op de waterkering terecht komt.

Tabel 7-5: Faalfrequentie waterkering dijkkring 51 bij falen windturbines

WT	Bladworp - Nominaal	Bladworp - Overtoeren	Mastbreuk, gondel en mast	Mastbreuk, alleen mast	Gondel	Eenheid
1	$5.95 \cdot 10^{-10}$	$1.53 \cdot 10^{-10}$	$1.64 \cdot 10^{-7}$	0	0	[1\j]
2	$1.32 \cdot 10^{-8}$	$5.25 \cdot 10^{-10}$	$2.00 \cdot 10^{-7}$	$6.40 \cdot 10^{-7}$	$2.58 \cdot 10^{-7}$	[1\j]
3	$1.84 \cdot 10^{-9}$	$1.47 \cdot 10^{-10}$	$2.10 \cdot 10^{-7}$	0	0	[1\j]

Uit tabel 7-5 blijkt dat in alle gevallen de additionele faalkans kleiner is dan de toegestane faalkanstoename van  $3,33 \cdot 10^{-6}$  per jaar. Net als voor dijkkring 50 is het maatgevende faalscenario mastbreuk, waarbij de mast op de waterkering terecht komt.

## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

Van het geplande Windpark IJsselwind zijn twee windturbines voorzien in de beschermingszone van de primaire waterkering van dijktrajecten 50-2 (Twentekanaal Zuid) en 51-1 (Twentekanaal Noord). Een windturbine staat buiten de beschermingszone maar kan in geval van een faalincident van de windturbine effect hebben op de waterveiligheid.

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.

De effecten op de mechanismen 'overlopen' en 'golfoverslag' (hoogte) zijn beoordeeld en zijn niet noemenswaardig, 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 niet noemenswaardig ( $\leq 1\%$ ). Bij gebruik van het windpark onder dagelijkse omstandigheden neemt de veiligheid met circa 0,04% af, en wordt nog steeds aan de faalkanseis voldaan. Onder extreme omstandigheden neemt de veiligheid af met 0,12% tot 0,36%. De afname is minder dan de toegestane 1% en daardoor acceptabel. Tijdens de bouw en de sloop van de windturbines wordt de waterveiligheid niet beïnvloed.

De effecten op de 'macrostabiliteit buitenwaarts' zijn beoordeeld en zijn niet noemenswaardig ( $\leq 1\%$ ). De plaatsing en aanwezigheid van het windpark heeft een gering negatief effect op de buitenwaartse macrostabiliteit, in alle situaties wordt aan de gestelde faalkanseis voldaan. Onder dagelijkse omstandigheden zal bij het gebruik van het windpark de veiligheid van de waterkering met 0,08% afnemen. Bij extreme omstandigheden is de afname 0,24%.

De effecten op het mechanisme piping zijn beoordeeld. De plaatsing en aanwezigheid van WT2 heeft mogelijk effecten, hier zijn al maatregelen voorzien. De windturbine heeft geen effect op het VZG. Voor locatie WT3 geldt dat de effecten niet noemenswaardig zijn, mits de uitvoering van de bekabeling zorgvuldig wordt verricht met herstel van de 'oorspronkelijke bodemopbouw'. Daarnaast moet een grondverdringend paalsysteem worden toegepast.

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



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. 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 mastbreuk.

In de beoordeling is uitgegaan van conservatieve uitgangspunten, zoals beschouwing van de volledige beschermingszone als kritieke strook. Daarnaast 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 veel veiliger geworden.

## **8.2 Aanbevelingen**

### **Aanbeveling voor bouw van het windpark**

- Voor de uitvoering van de bekabeling en het fundament wordt aanbevolen om de ‘oorspronkelijke bodemopbouw’ te herstellen in combinatie met een erosiebestendige aansluiting.
- Aanbevolen wordt ontgravingen en aanbrengen van funderingen uit te voeren onder ‘normale’ omstandigheden. Voor DP21 geldt i.v.m. het mogelijk optreden van piping een maximale waterstand tijdens de uitvoering van NAP +5,85 m.
- Palen dienen grondverdringend te zijn om kwel langs de palen te voorkomen.

### **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 (nul-meting), 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 fundering van WT2. 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.



## 9 Referenties

- Ref 1. Memo Windturbines op of nabij primaire waterkeringen, KPR nr 473, 19-07-2018;
- 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 overstromingskans-normen, OI2014v4, Rijkswaterstaat, februari 2017;
- Ref 4. Grondmechanisch onderzoek dijkkring 50: Zutphen, projectnummer 130966, document 130\_141\_R231-03, Grontmij, september 2003;
- Ref 5. HWBP Verkenning Twenthekanaal OI2014V3, Projectcode 21F-Noord en 21F-Zuid, Arcadis, 20 april 2016;
- Ref 6. Samenvatting Ongedraineerde sterkteparameters 48-1, Waterschap Rijn en IJssel, 10-4-2018;
- Ref 7. Bodemopbouw uit DSoilModel, WT12017, basisfile WTISOSdec2015;
- Ref 8. DWP beheer DR50 dijkpaal 136, Waterschap Rijn en IJssel
- Ref 9. Projectplan Waterwet voor dijkversterking Twenthekanaal te Zutphen, Waterschap Rijn en IJssel, 12-09-2017;
- Ref 10. Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, TAW, 1 september 2004;
- Ref 11. Actuele waterdata, [www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/waterdata](http://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/waterdata)

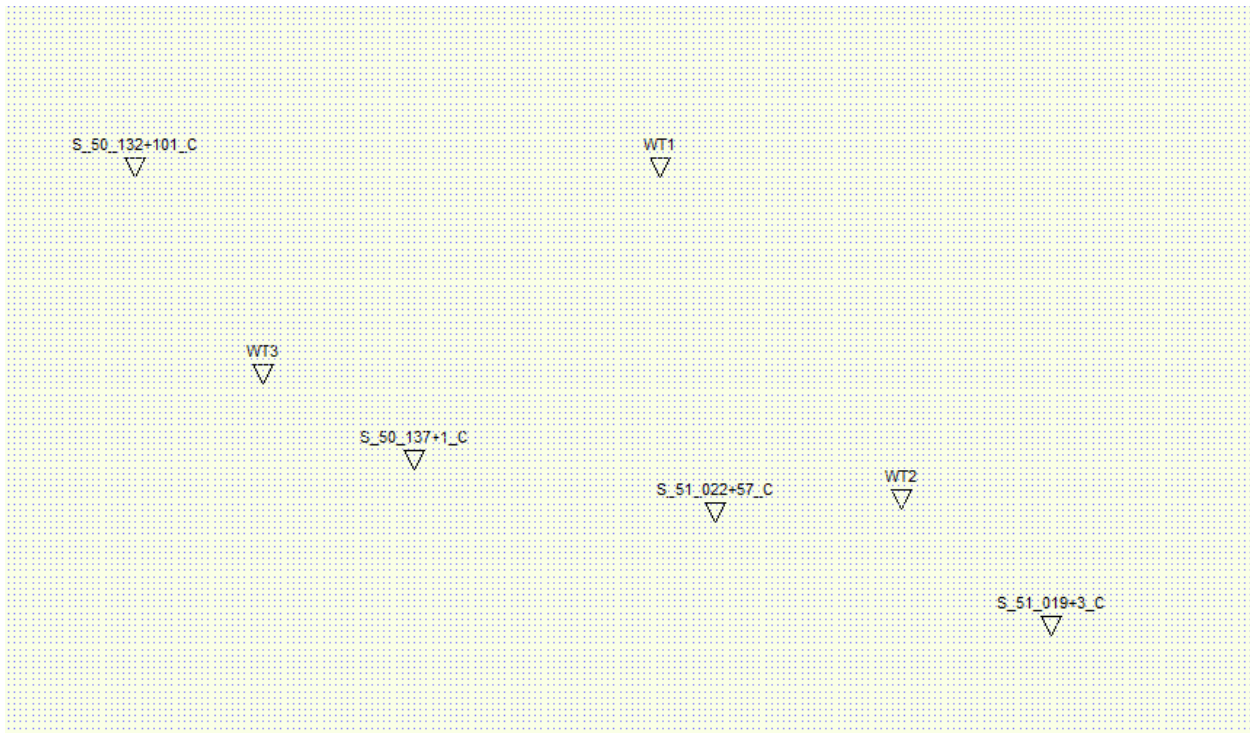
# A1 Geotechnisch lengteprofiel waterkering noordzijde Twentekanaal



## A2 Geotechnisch lengteprofiel waterkering zuidzijde Twentekanaal



## A3 Sonderingen



WT3 - DP136 (Zuidzijde)

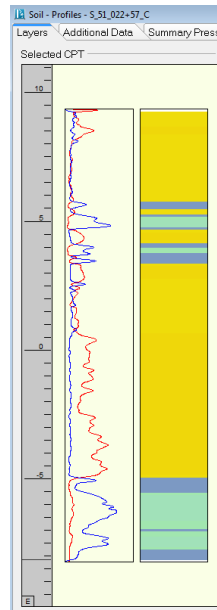
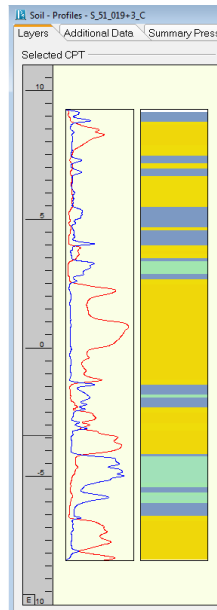
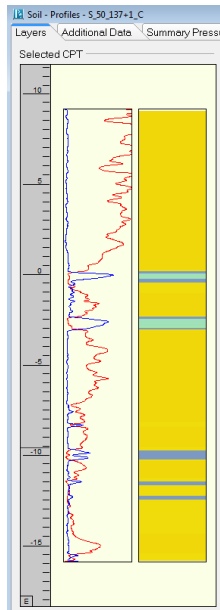
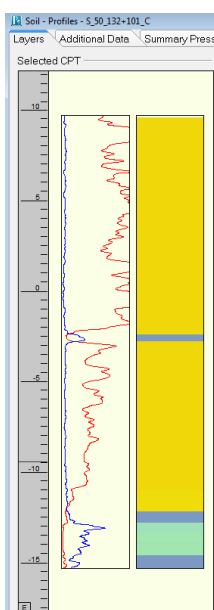
WT2 – DP21 (noordzijde)

S-50\_132+101\_C

S-50\_137+1\_C

S51\_022+57\_C

S-51\_019+3\_C



## A4 Afleiding hydraulische belastingen

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

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. Dit betroffen de databases voor de dijktrajecten 50-2 en 51-1, beiden versie 4.

De waterstanden zijn afgeleid voor diverse punten langs het Twentekanaal. Daaruit bleek dat er geen verschil was in de berekende waterstanden langs het Twentekanaal.

De berekeningen zijn uitgevoerd met Hydra-NL in klimaatmodus met het W+ scenario voor 2050. Het uitgangspunt is dat de correlatie tussen hoogwater en de wind correct in de Hydra-NL klimaatmodus zit. Nadat de berekeningen zijn uitgevoerd, is er conform het OI2014v4 een onzekerheidstoeslag van 30 cm bij opgeteld. Dit is aan de conservatieve kant, omdat indien in Hydra-NL met "onzekerheden conform WBI2017" zou worden gerekend, er slechts 5 cm hoeft te worden bij opgeteld. Echter, op dit moment geldt de onzekerheidstoeslag van 30cm.

2017 (=2020)

Terugkeertijd (jaren)	Waterstand (m+NAP)
10	7.465
30	7.808
100	8.102
300	8.237
1000	8.336
3000	8.435
10000	8.746
30000	8.923
100000	9.123

2050 met W+ scenario (zo goed als 2045)

Terugkeertijd (jaren)	Waterstand (m+NAP)
10	7.618
30	7.923
100	8.180
300	8.335
1000	8.765
3000	9.124
10000	9.554
30000	9.954
100000	10.291

Hydraulische belastingen met onzekerheidstoeslag per te beschouwen profiel:

Zichtjaar	DP136 (zuidzijde)	DP21 (noordzijde)
2020	NAP +8,64 m (+8,34+0,3)	NAP +8,54 m (+8,24+0,3)
2045	NAP +9,07 m (+8,77+0,3)	NAP +8,64 m (+8,34+0,3)

Voor de situatie met maximale windbelasting is uitgegaan van een waterstand welke circa 1 x per jaar voorkomt. Hiervoor zijn de (oude) gegevens uit [Ref 11] gebruikt, zie volgende pagina.



Waterstanden

Rivieren

**IJssel, Zutphen noord en Deventer**

8-uurwaarden in cm + NAP

## Algemene gegevens

gemiddelde overschrijdingsfrequentie van afvoertoppen per jaar van Lobith (periode 1901...1990) cq. kenmerkende afvoeren	afvoer Lobith in m <sup>3</sup> /s	gemiddelde overeenkomende waterstanden in cm vlg. betrekkinglijnen 1991.0	
		Zutphen noord	Deventer
1x per 1.250 jaar (maatgevende waarde)	15000	875	745
hoogste bekende afvoer 3 jan 1926 17h	12600	850	720
1x per 100 jaar	12320	840	710
1x per 10 jaar	9670	795	665
1x per 2 jaar grensafvoer(-peil)	6800	730	590
1x per jaar	5800	700	560
gemiddelde afvoer	2200	430	295
gemiddelde zomerafvoer	1985	400	270
overeengekomen lage afvoer / OLR 1991.0	984	290	165
laagst bekende ijsvrije afvoer 4 nov 1947	620		

## Jaar- en tienjaarlijkse waarden

jaar of tijdvak	Zutphen noord								Deventer									
	hoogste	datum	90%	70%	50%	30%	10%	laagste	datum	hoogste	datum	90%	70%	50%	30%	10%	laagste	datum
1981	731	15 mrt	682	589	489	439	404	393	12 sep	589	div	529	440	342	297	264	253	div
1982	754	11 jan	657	515	458	418	393	387	div	608	11 jan	511	371	316	278	254	248	div
1983	821	1 jun	652	571	448	393	357	268	25 nov	667	div	505	426	310	258	220	142	25 nov
1984	765	12 feb	616	508	439	412	394	369	7 sep	637	12 feb	477	370	302	278	260	239	7 sep
1985	640	7 feb	538	449	407	396	302	260	5 nov	489	7 feb	393	310	273	261	177	136	5 nov
1986	724	20 jan	635	522	427	392	362	295	20 okt	583	div	488	376	289	257	226	165	20 okt
1987	749	7 jan	657	559	504	459	415	390	div	620	7 jan	513	418	366	322	280	255	6 feb
1988	813	31 mrt	681	544	464	416	390	351	18 nov	676	31 mrt	534	410	328	282	259	225	18 nov
1989	661	27 apr	540	437	393	382	313	249	div	514	28 apr	405	297	260	250	183	141	div
1990	724	21 feb	534	417	402	385	317	270	div	583	21 feb	404	283	268	253	183	144	28 okt
1981/90	821	1 jun 83	636	512	438	402	370	249	11 dec 89	676	31 mrt 88	488	370	301	267	238	136	5 nov 85

## A5 Controle opbarsten

Uit [Ref 1]

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:

- $\phi_{exit}$  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)
- $\gamma_{sat}$  Verzadigd volumiek gewicht van de cohesieve deklaag (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_{water}$  Volumiek gewicht van water (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_{up}$  Veiligheidsfactor voor het deelfaalmechanisme 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 deelfaalmechanisme opbarsten.

	DP21	DP136
$\phi_{exit}$	+6,3	+7,86
$h_{exit}$	+5,3	+7,5
$\Delta\phi$	1,0	0,36
$D_{deklaag}$	2,5	1,57
$\Delta\phi_{c,u}$	2,25	1,41
$\frac{\Delta\phi_{c,u}}{\gamma_{up} \gamma_{b,u}}$	$\frac{2,25}{1,62 * 1,2}$	$\frac{1,41}{1,48 * 1,2}$
verificatie	$1,0 \leq 1,16?$ Ja, ok	$0,36 \leq 0,79?$ Ja, ok

## A6 Controle piping en heave

### DP21

#### Piping groene kering - Sellmeijer (STPH)

##### Veiligheidsfactoren

	Waarde	Eenheid	Verklarende tekst	Bron
y;b	1,2	-	Schematiseringsfactor, Sellmeijer	-
y;mp	1,56	-	Schadefactor of sterktefactor, Sellmeijer	Ref. 1

##### Uitgangspunten basisschematisatie

	Waarde	Eenheid	Verklarende tekst	Bron
x;intree	25,00	-	Effectieve locatie intredepunt	-
x;uittree	65,00	-	Maatgevende locatie uitredepunt	-
h;p	5	m NAP	Polderpeil, vrije waterstand of maaiveld	Ref. 7
Θ	37,00	°	Rolweerstandshoek van de zandkorrels	Ref. 2
η	0,25	-	Coëfficiënt van White	Ref. 2
D;wvp	12,5	m	Dikte watervoerend pakket	-
k	50	m/dag	Doorlatendheid watervoerendpakket	-
d	2,5	m	Dikte van de deklaag	-
d70	200	μm	70-percentielwaarde v/d korrelverdeling	-
d70;m	208	μm	Gemiddelde d70-waarde	Ref. 2
y;p	16,19	kN/m <sup>3</sup>	Volumegewicht zandkorrels onder water	Ref. 2
y;w	9,81	kN/m <sup>3</sup>	Volumegewicht van het water	Ref. 2

Scenario	MHW m NAP	h;p m NAP	DeltaH m	d m	D;wvp m	x;intree -	x;uittree -	l;h;aanw m	k m/dag	d70 μm	yb -	ymp -
1 Basisschematisatie	8,64	5	3,64	2,50	12,50	25,00	65,00	40,0	50	200	1,2	1,56
2 ontgraving	5,85	4	1,85	2,50	12,50	25,00	65,00	40	50	200	1,2	1,56
3 -												
4 -												
5 -												
D Basisschematisatie	8,64	5	3,64	2,50	12,50	25,00	65,00	40,0	50	200	1,2	1,56

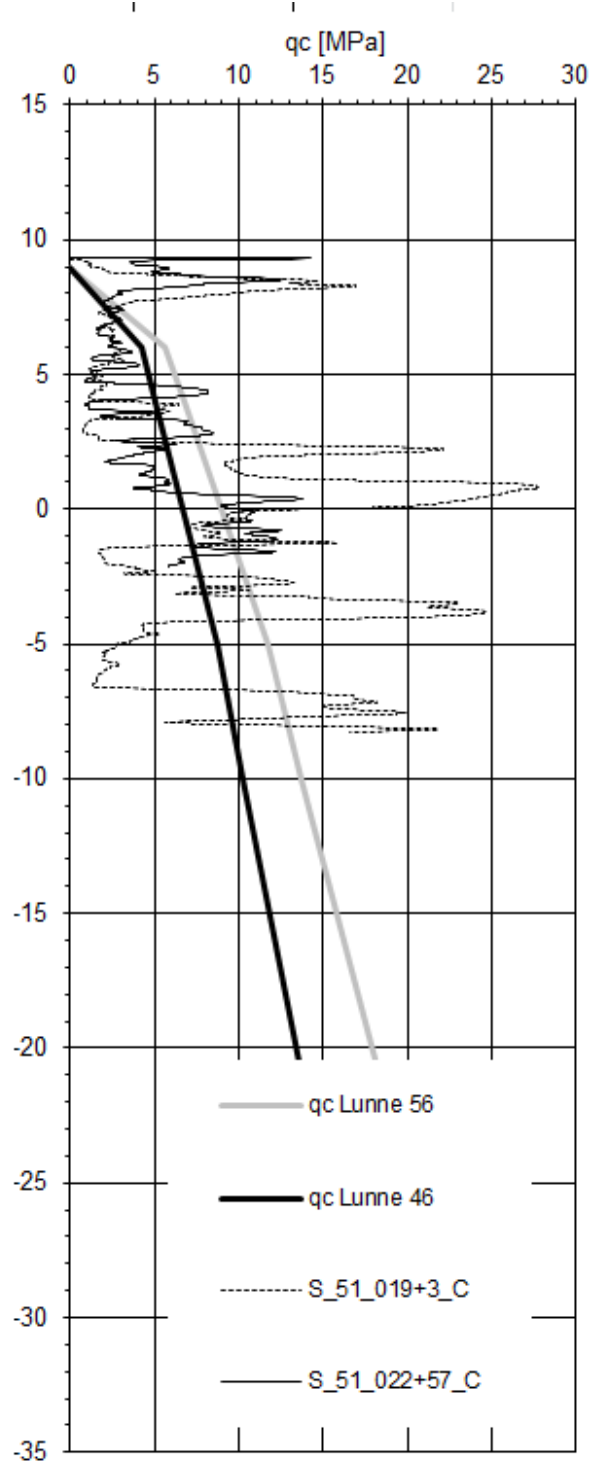
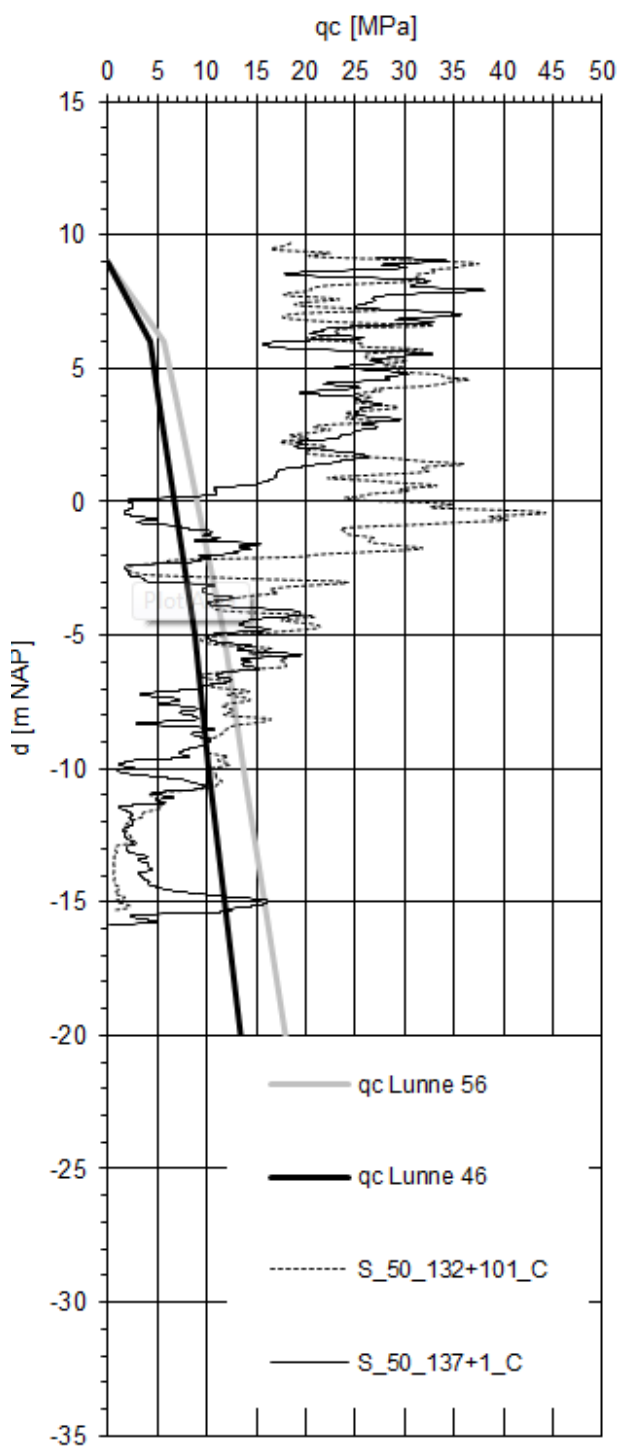
	ΔH;kritiek m	ΔH;optr m	SF -	SF >= 1,0 Voldoet
1	1,14	2,89	0,39	Voldoet niet
2	1,14	1,10	1,03	Voldoet
3				
4				
5				
D	1,14	2,89	0,39	Voldoet niet

	L;benod m	L;tekort m
1	113,4	73,4
2	38,5	0,0
3		
4		
5		
D	113,4	73,4

Oordeel opbarsten en heave	#N/A
Oordeel Sellmeijer	Voldoet niet
Eindoordeel piping Sellmeijer	#N/A

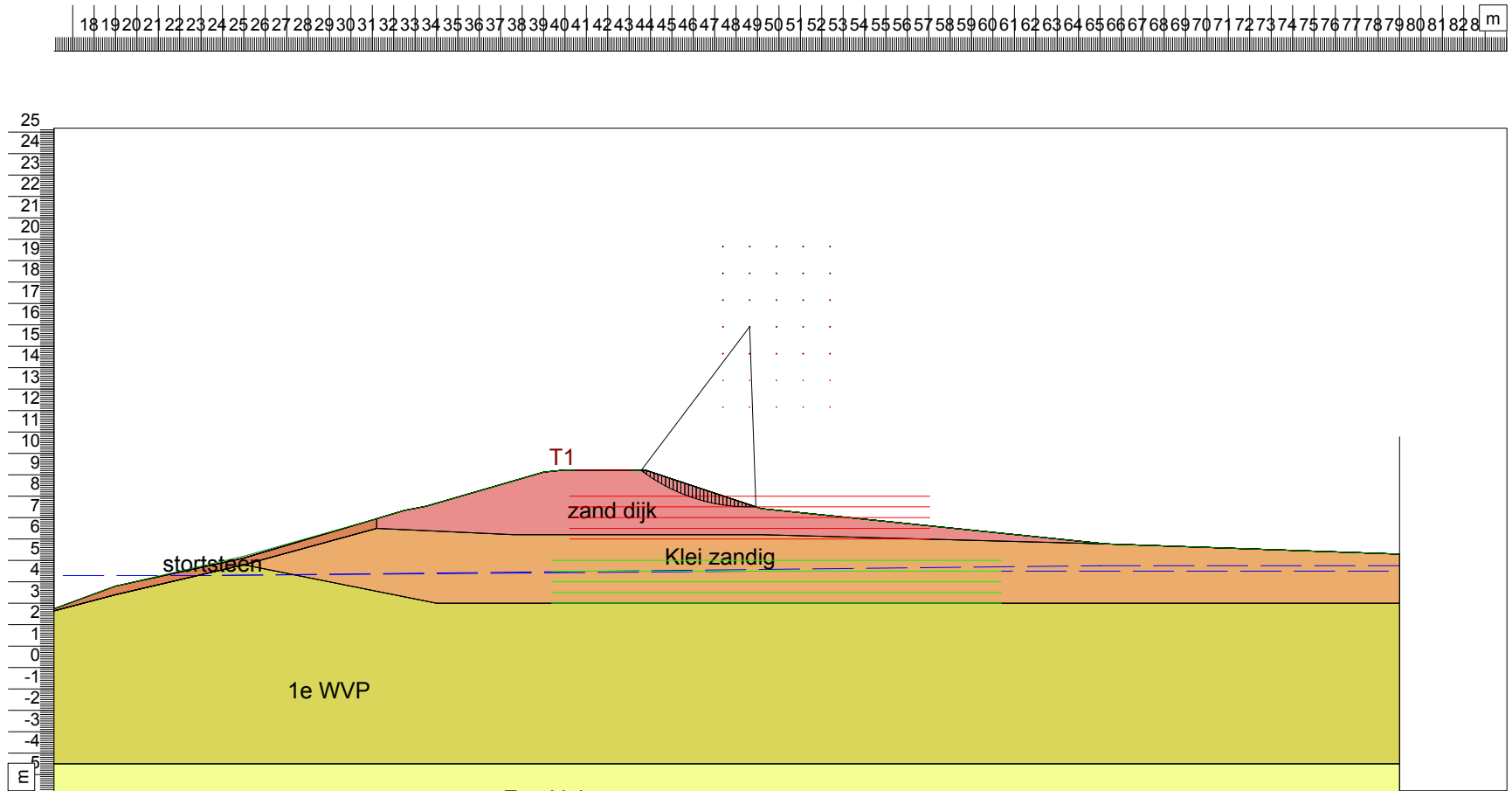
## A7 Verwekingsanalyse

Obv formule Lunne



## A8 Resultaten stabiliteitsberekeningen

# Critical Circle Bishop



Xm : 49,63 [m]  
Ym : 15,91 [m]

Radius : 8,41 [m]  
Safety : 1,71



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort  
Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

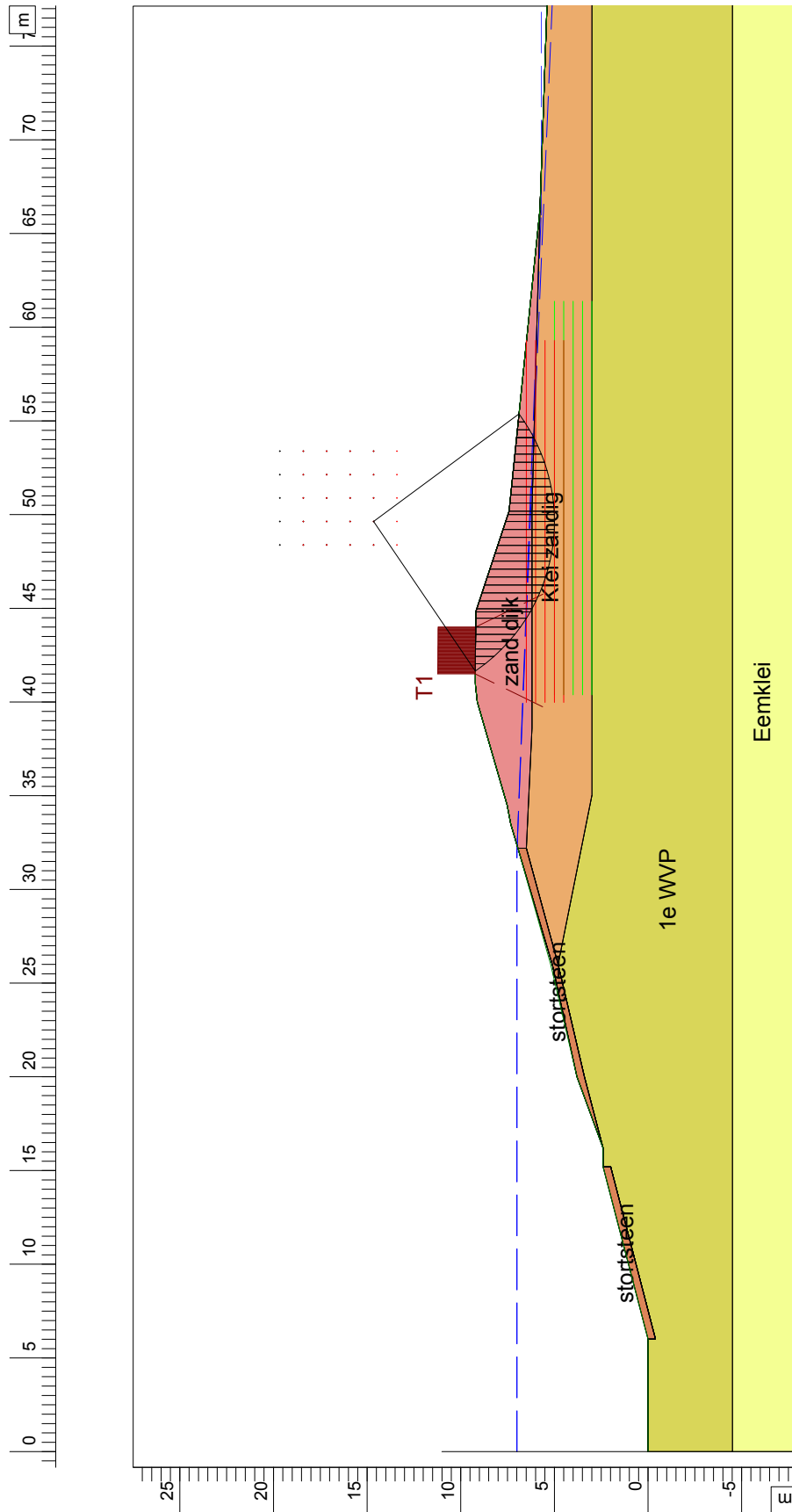
D:\Geo Stability\18.1 : DP21\_huidig\_dagelijks\_STBI.stl

DR51-DP21 WT2  
STBI  
Huidige situatie, dagelijkse omstandigheden

Annex -	BE4157	27-6-2018	IHE
		date	dnv.
A4		df.	form.



# Critical Circle Bishop



Radius : 9,66 [m]  
Safety : 2,11

Xm : 49,63 [m]  
Ym : 14,66 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_huidig-HW1xperjr\_STBI.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date  
27-6-2018

drw.  
IHE

DR51-DP21 WT2  
STBI

BE4157

ctr.

Huidige situatie, HW situatie 1x per jr

Annex -

form.  
A4

DR51-DP21 WT2

STBI

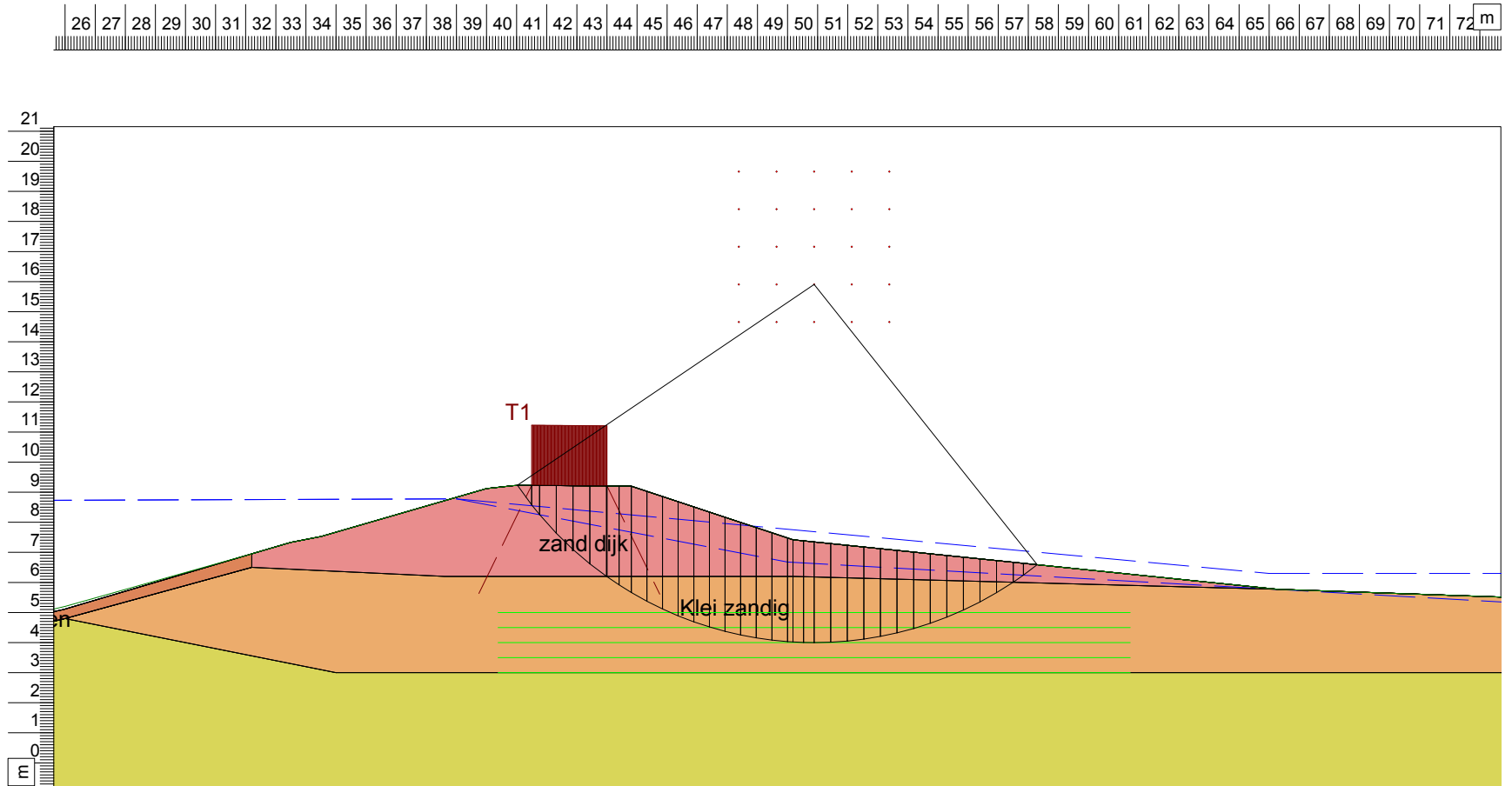
BE4157

Annex -

form.  
A4

Huidige situatie, extreme omstandigheden

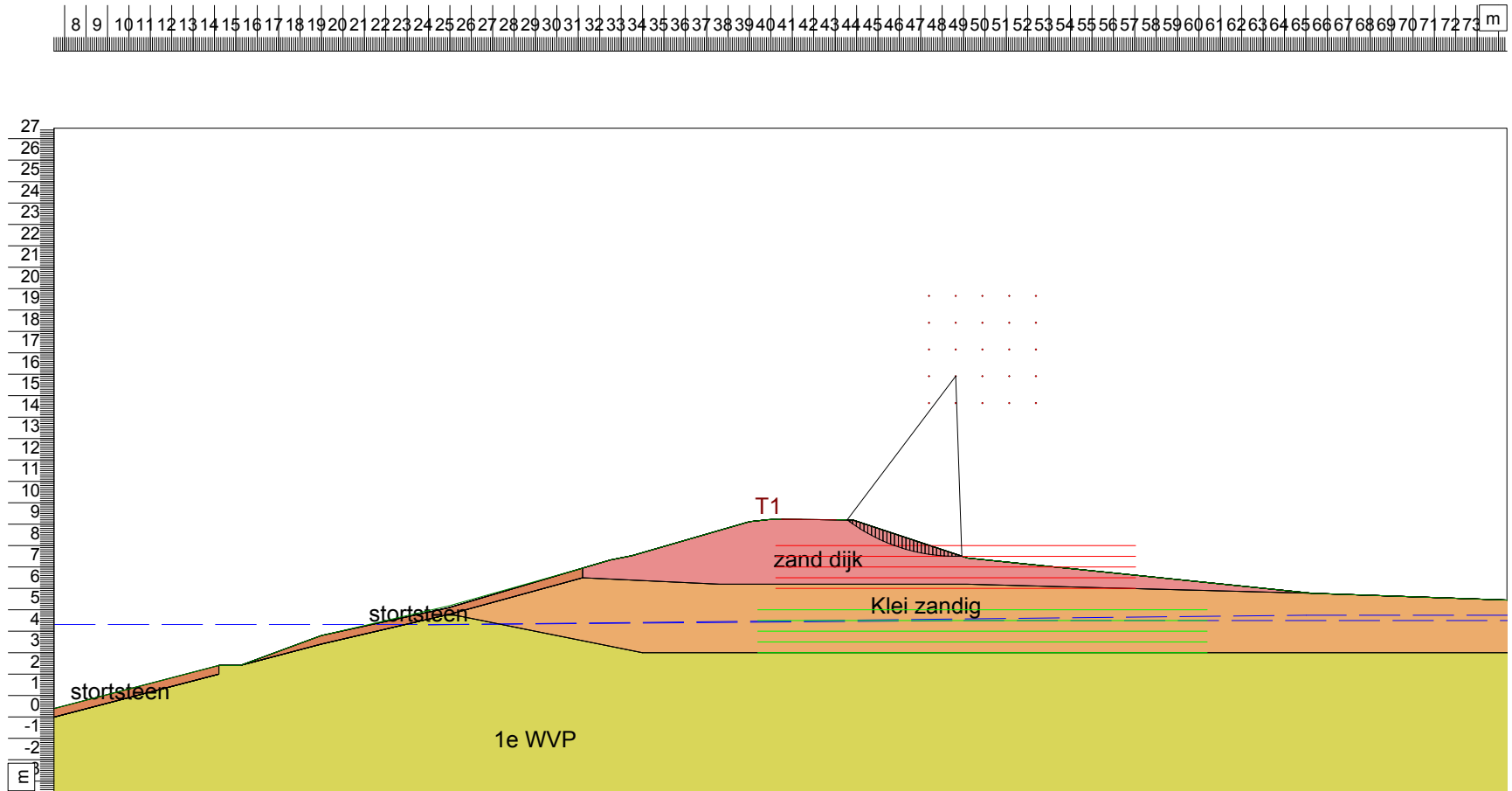
### Critical Circle Bishop



Xm : 50,88 [m]  
Ym : 15,91 [m]

Radius : 11,91 [m]  
Safety : 1,67

# Critical Circle Bishop



Xm : 49,63 [m]  
Ym : 15,91 [m]

Radius : 8,41 [m]  
Safety : 1,30



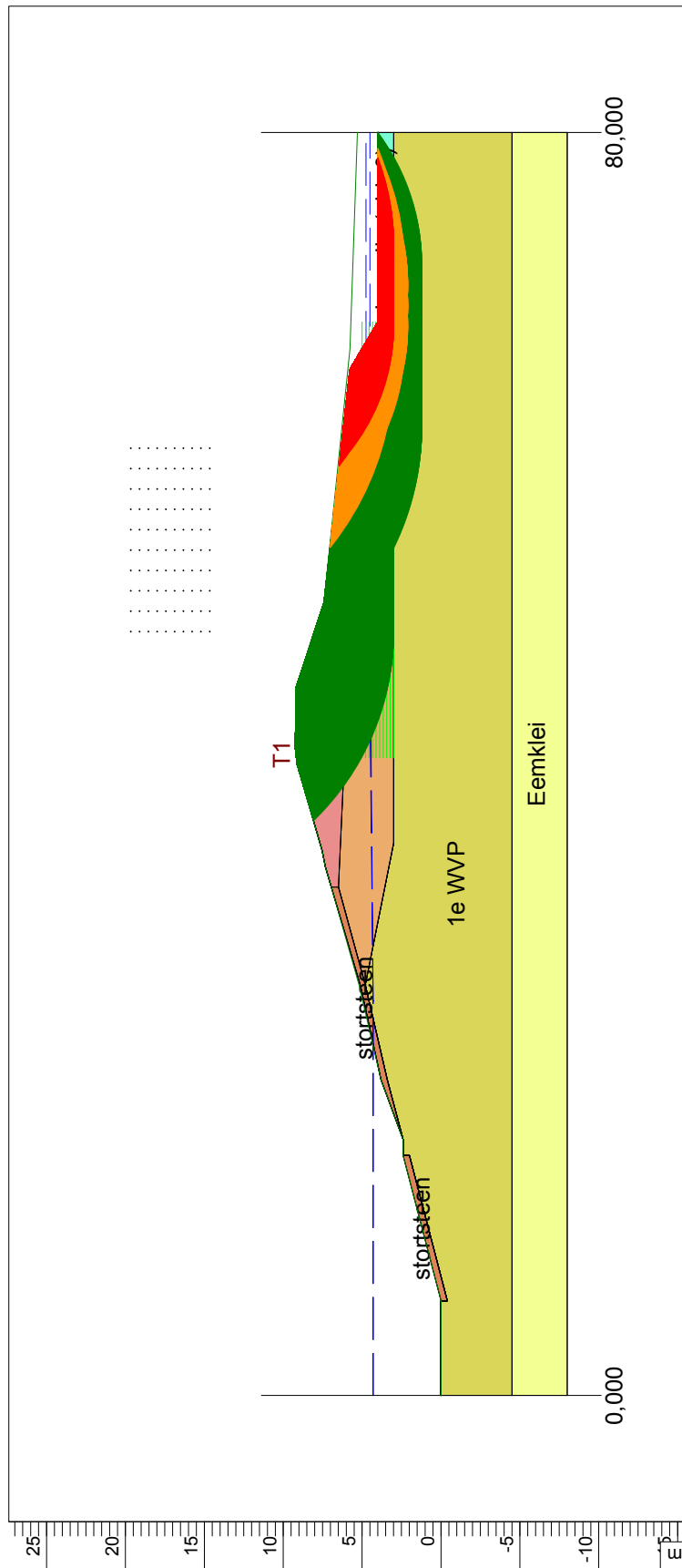
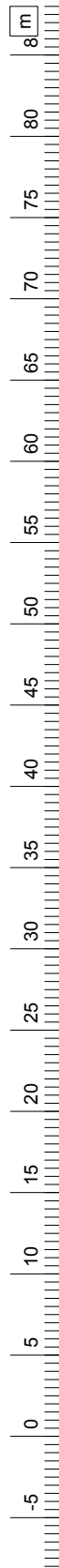
Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort  
Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

D:\Geo Stability\18.1 : DP21\_Bouw\_STBI.sit

DR51-DP21 WT2  
STBI  
Bouwfase, dagelijkse omstandigheden

Annex -	BE4157	27-6-2018	date
A4		IHE	drv.

# Safety Overview



D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_bouw\_ontgr\_STBI.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date  
5-7-2018

drw.  
IHE

DR51-DP21 WT2  
STBI

BE4157

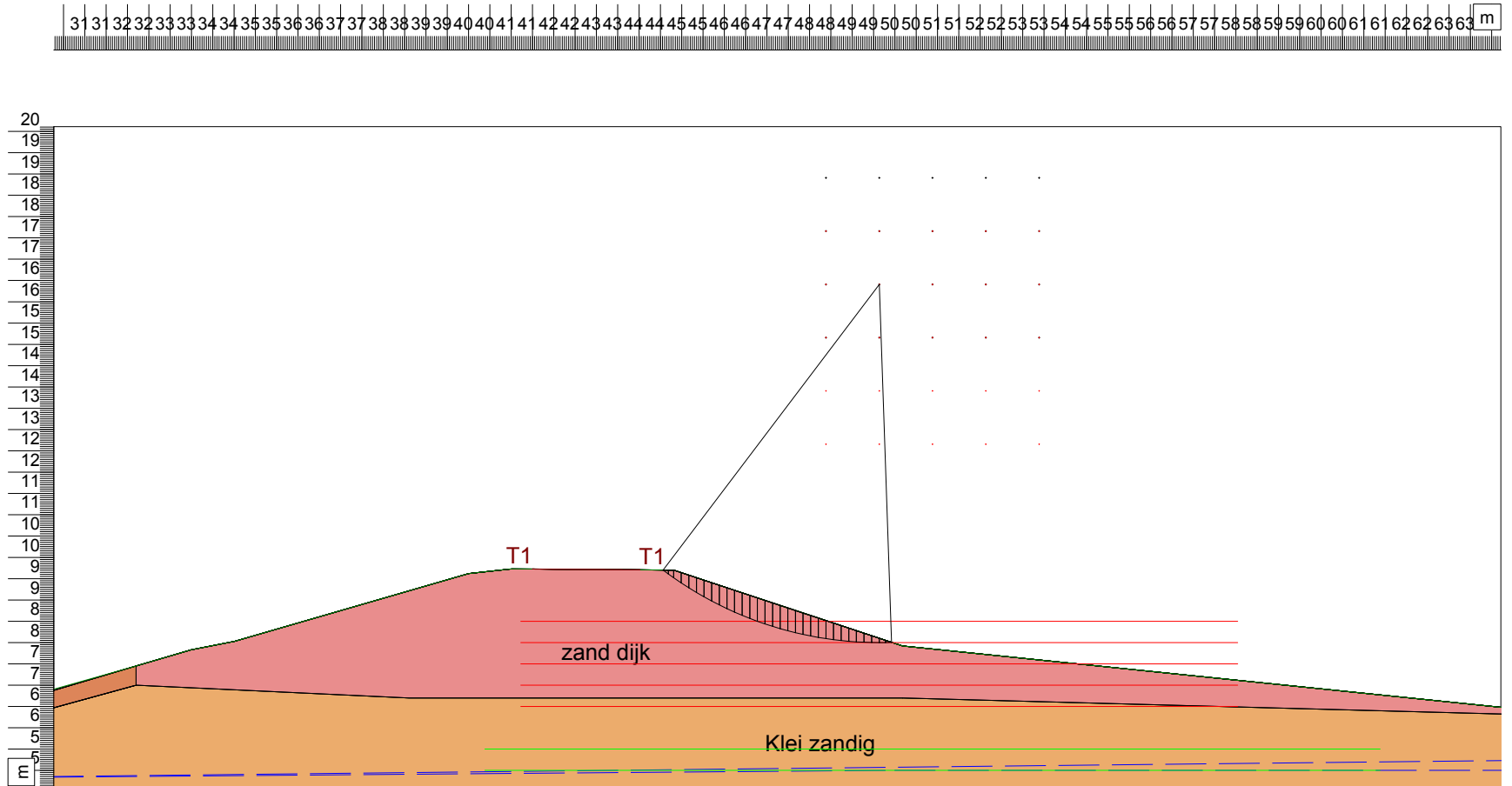
ctr.

Bouwfase, ontgraving fundering dagelijkse omstan

Annex -

form.  
A4

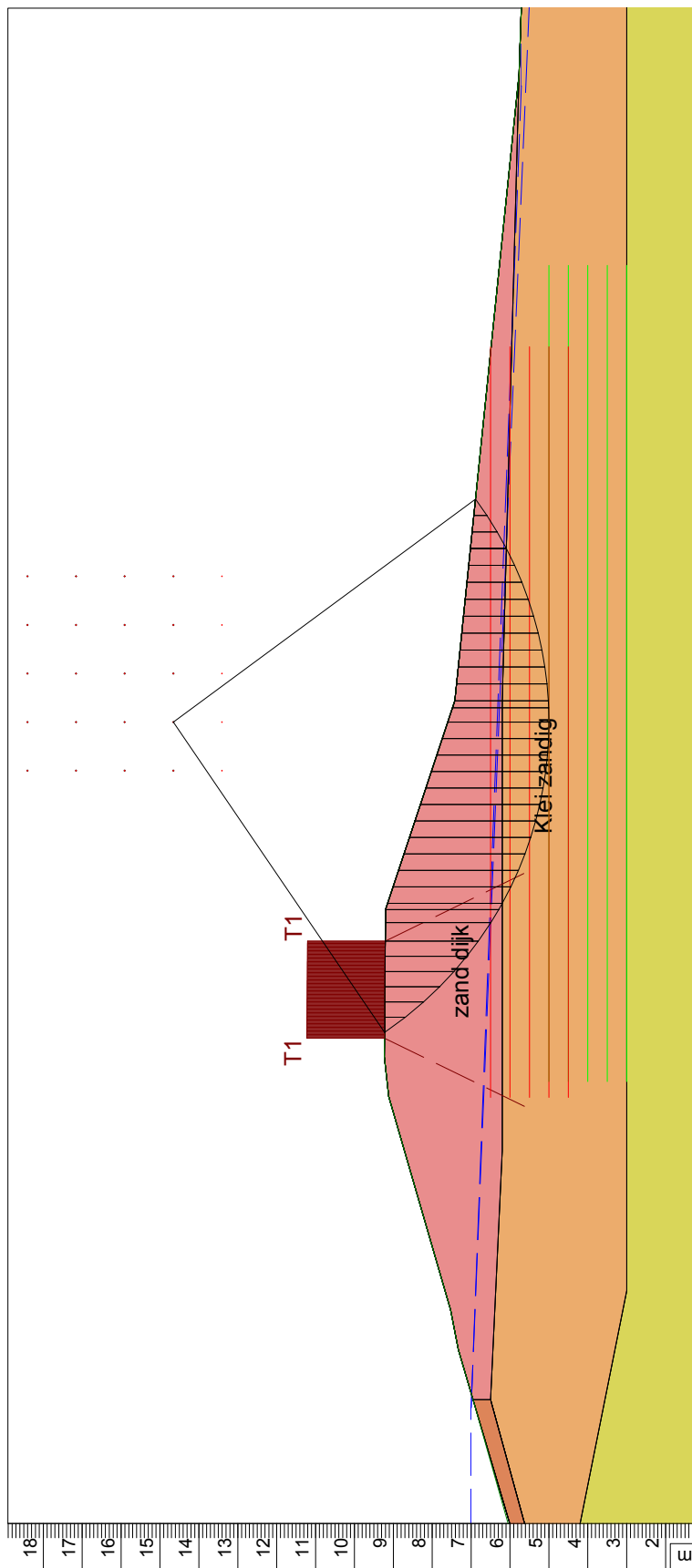
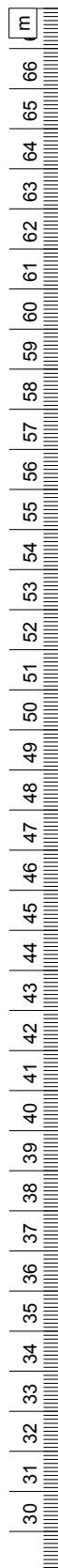
### Critical Circle Bishop



Xm : 49.63 [m]  
Ym : 15.91 [m]

Radius : 8.41 [m]  
Safety : 1.69

# Critical Circle Bishop



Radius : 9,66 [m]  
Safety : 2,05

Xm : 49,63 [m]  
Ym : 14,66 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_gebruik draaiend\_STBI.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date  
27-6-2018

drw.  
IHE

DR51-DP21 WT2  
STBI

BE4157

ctr.

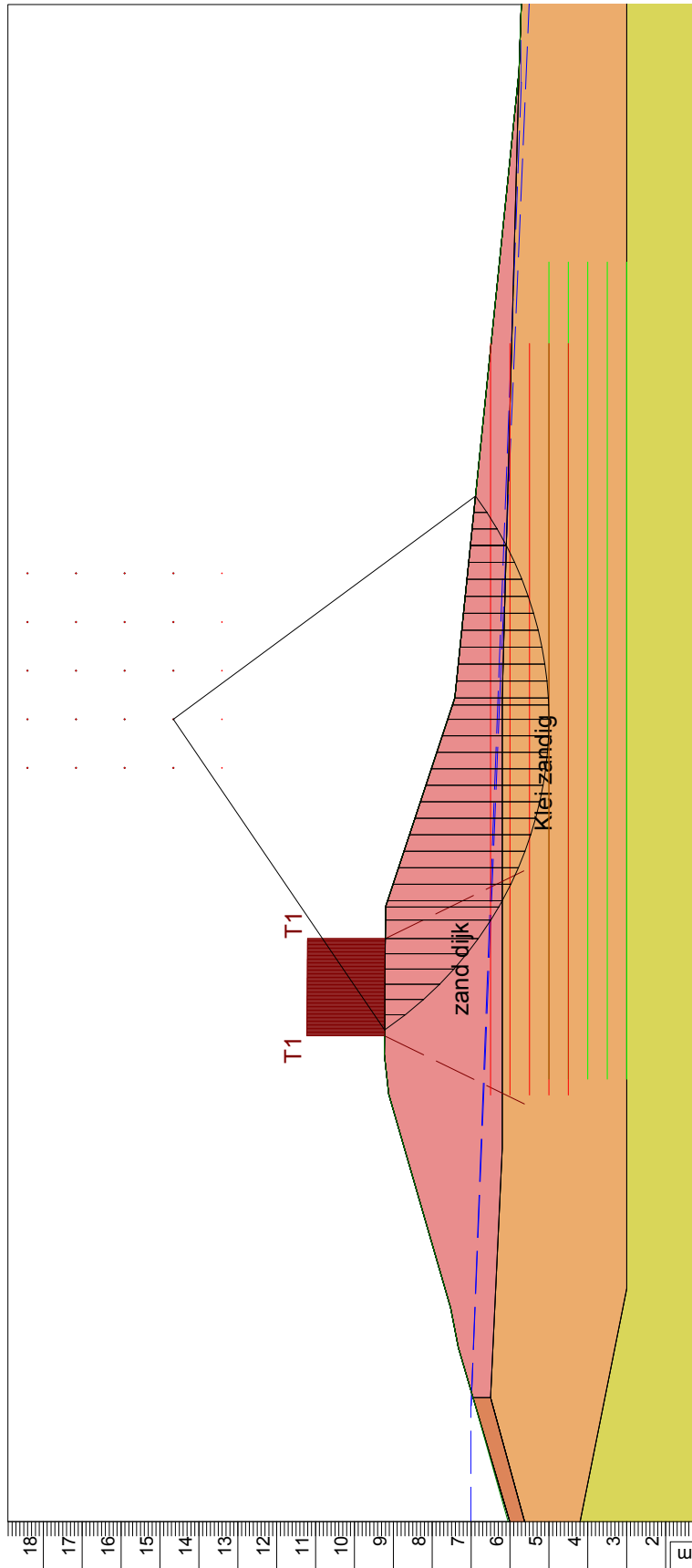
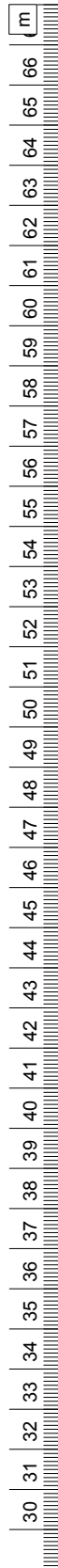
gebruiksfase bladen draaiend, HW situatie 1x per jr

Annex -

form.  
A4



# Critical Circle Bishop



Radius : 9,66 [m]  
Safety : 1,99

Xm : 49,63 [m]  
Ym : 14,66 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_gebruik stil\_STBI.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

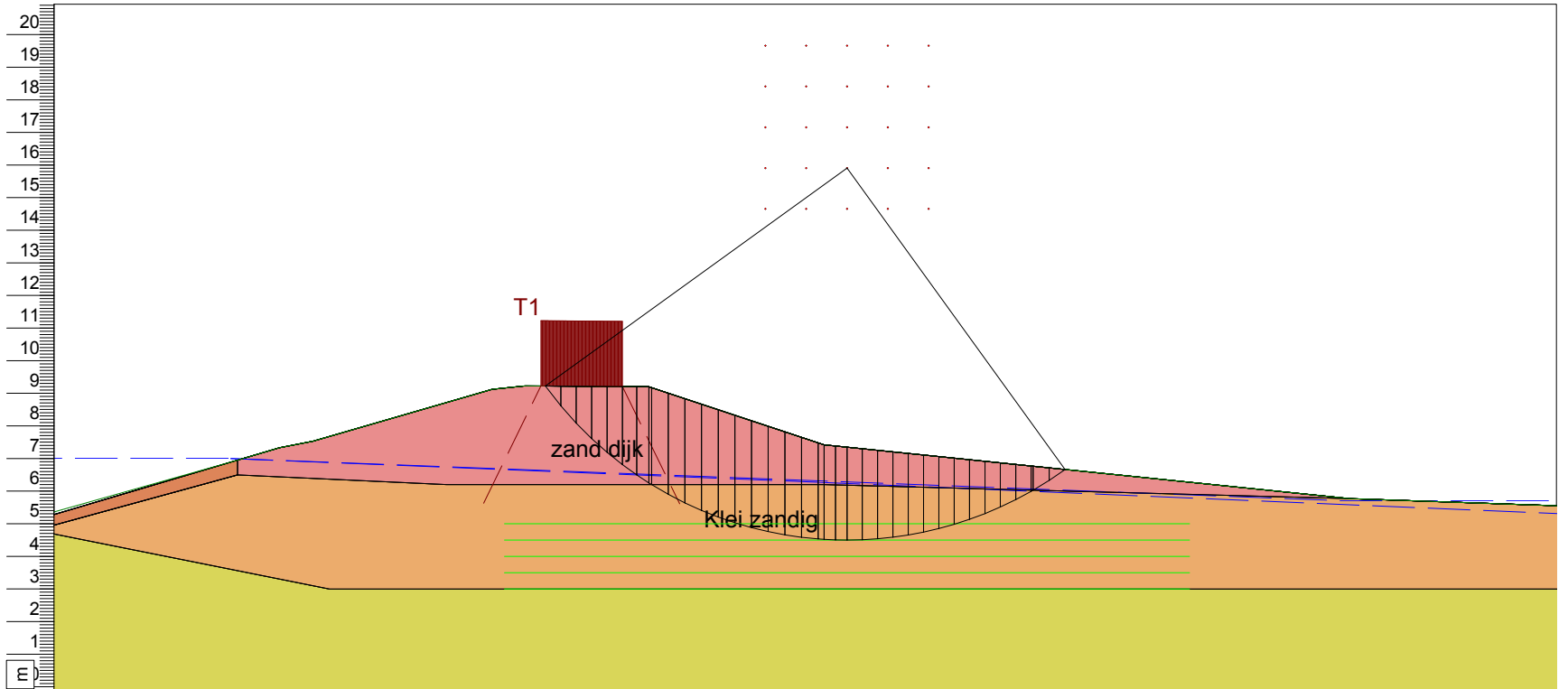
Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date	drw.
27-6-2018	IHE
BE4157	ctr.
Annex -	form. A4

DR51-DP21 WT2  
STBI

gebruiksfase bladen stil, HW situatie 1x per jr

# Critical Circle Bishop



Xm : 50,88 [m]  
Ym : 15,91 [m]

Radius : 11,41 [m]  
Safety : 1,92



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

D:\Geo Stability\18.1 : Dp21\_gebruik.stp\_STBI.sil

date  
27-6-2018

drv.  
IHE

DR51-DP21 WT2

BE4157

dr.

STBI

gebruiksfase noodstop, HW situatie 1x per jr

Annex -

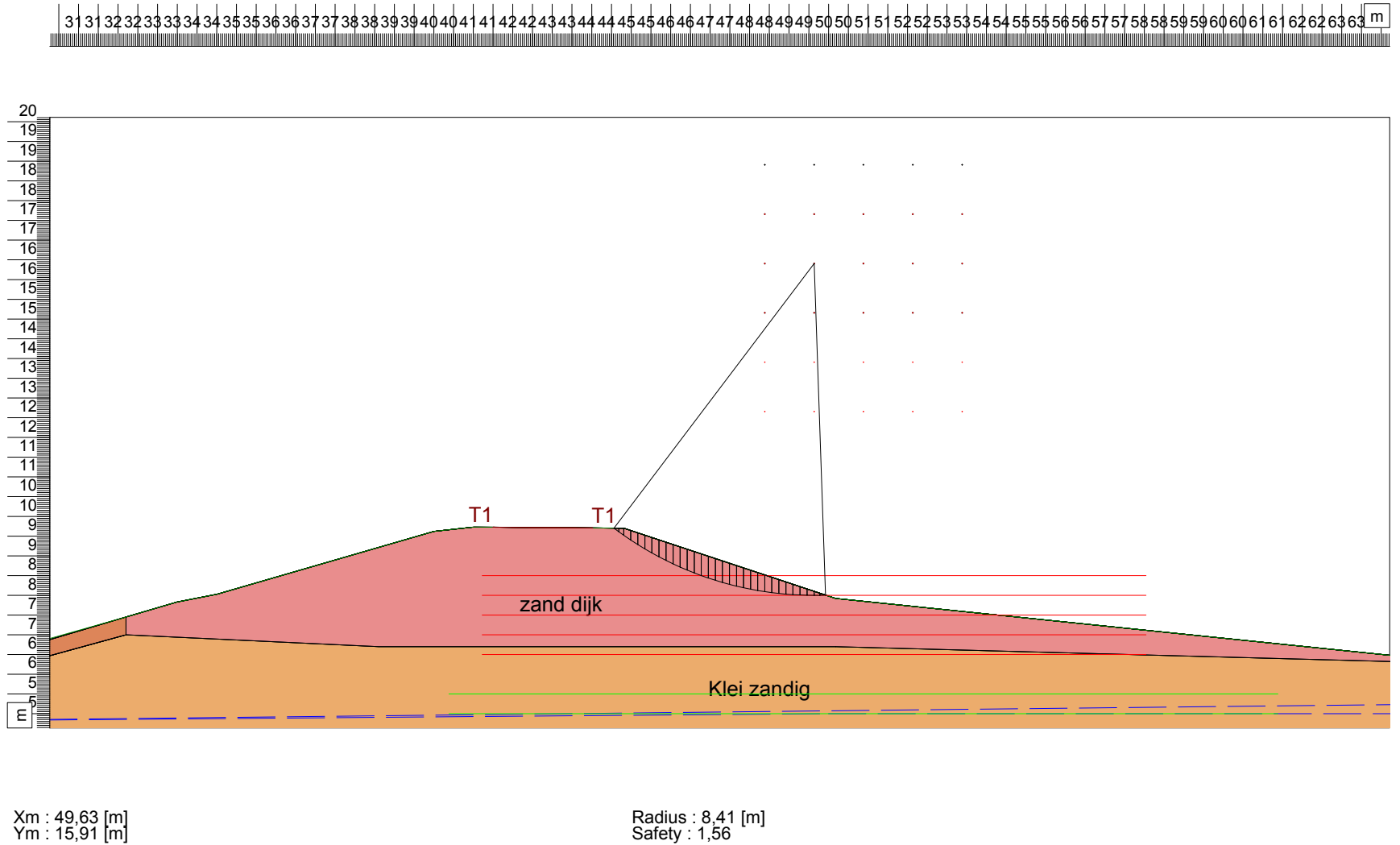
form.  
A4

DR51-DP21 WT2  
STBI  
Sloopfase dagelijkse omstandigheden

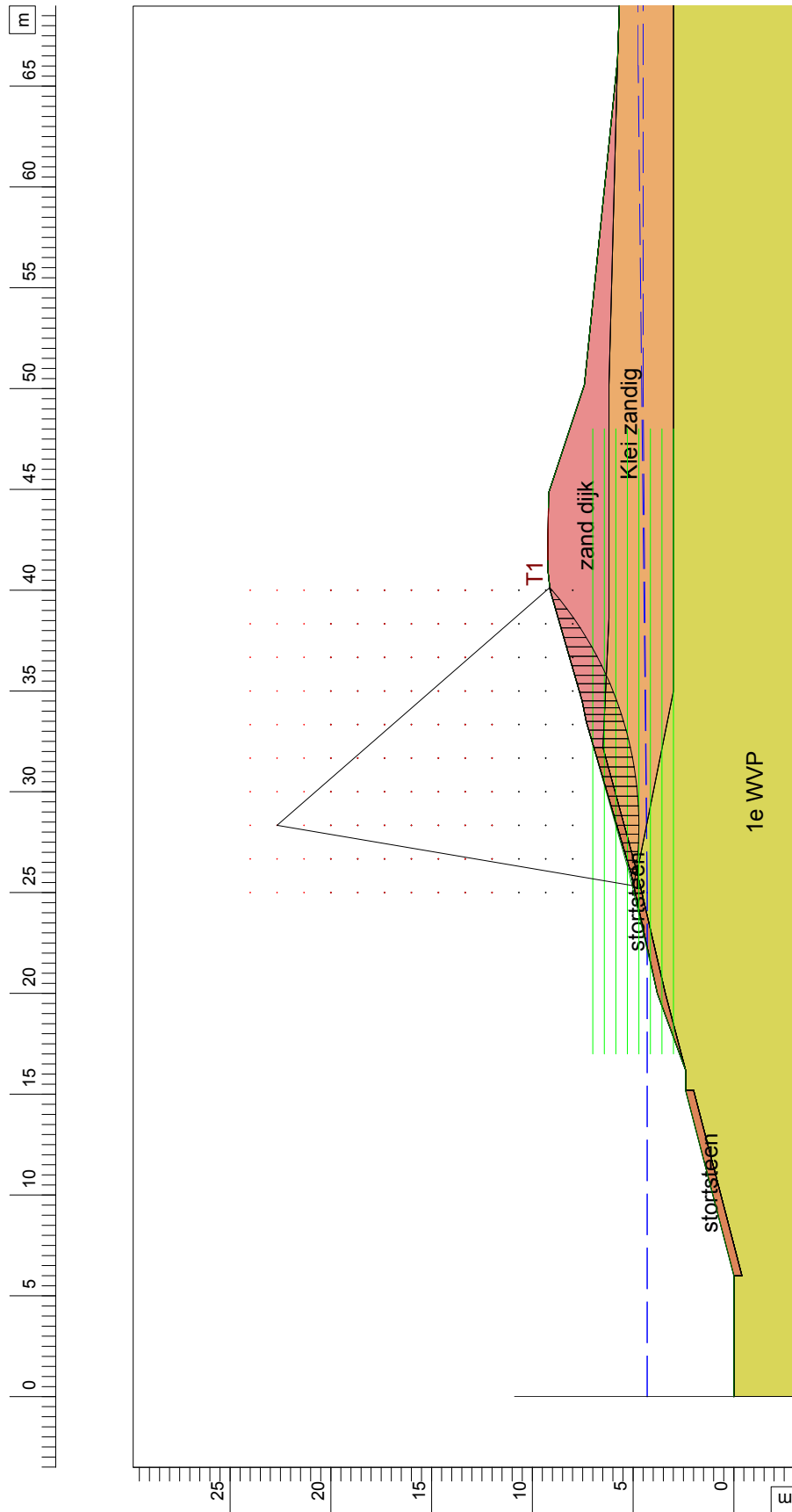
Annex -  
BE4157  
A4

date 27-6-2018  
dvw. IHE  
dft.

### Critical Circle Bishop



# Critical Circle Bishop



Radius : 17,95 [m]  
Safety : 1,74

Xm : 28,33 [m]  
Ym : 22,67 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_huidig\_dagelijks\_STBU.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date  
27-6-2018

drw.  
IHE

DR51-DP21 WT2  
STBU

BE4157

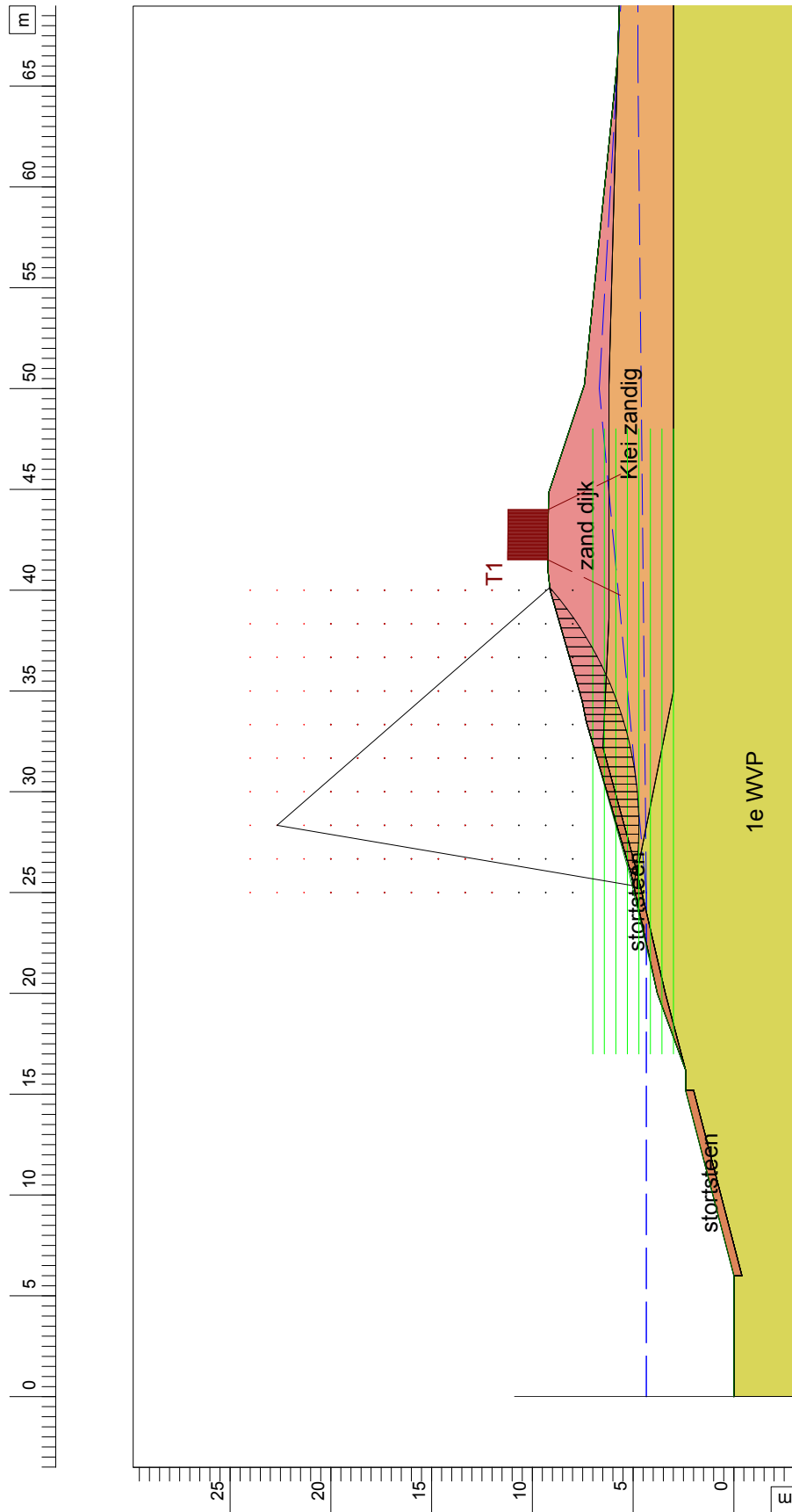
ctr.

Huidige situatie, dagelijkse omstandigheden

Annex -

form.  
A4

# Critical Circle Bishop



D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_huidig\_extreem\_STBU.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date  
27-6-2018

drw.  
IHE

DR51-DP21 WT2  
STBU

BE4157

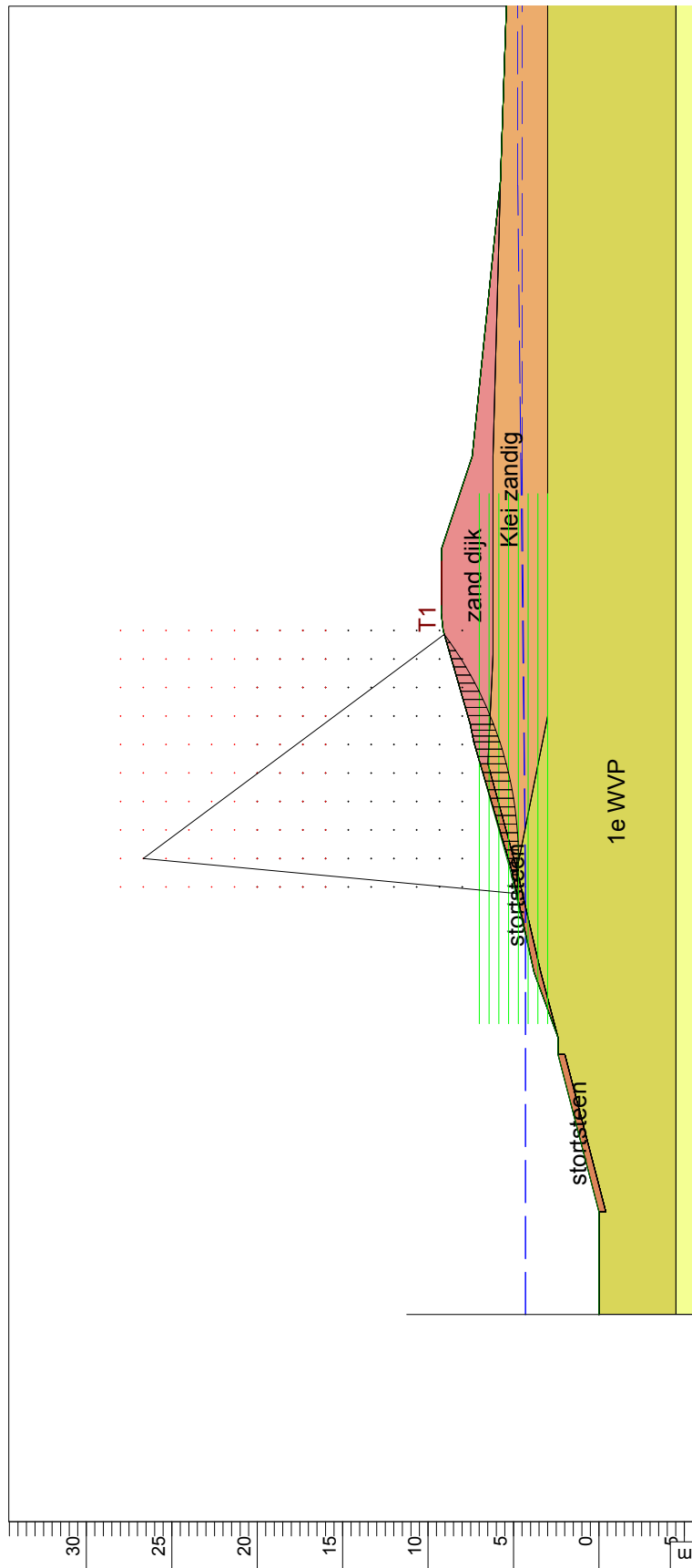
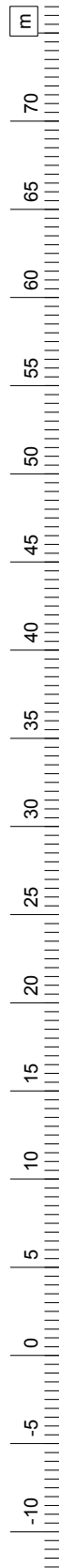
ctr.

Huidige situatie, extreme omstandigheden

Annex -

form.  
A4

# Critical Circle Bishop



Radius : 21,95 [m]  
Safety : 1,29

Xm : 26,67 [m]  
Ym : 26,67 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_bouw\_STBU.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

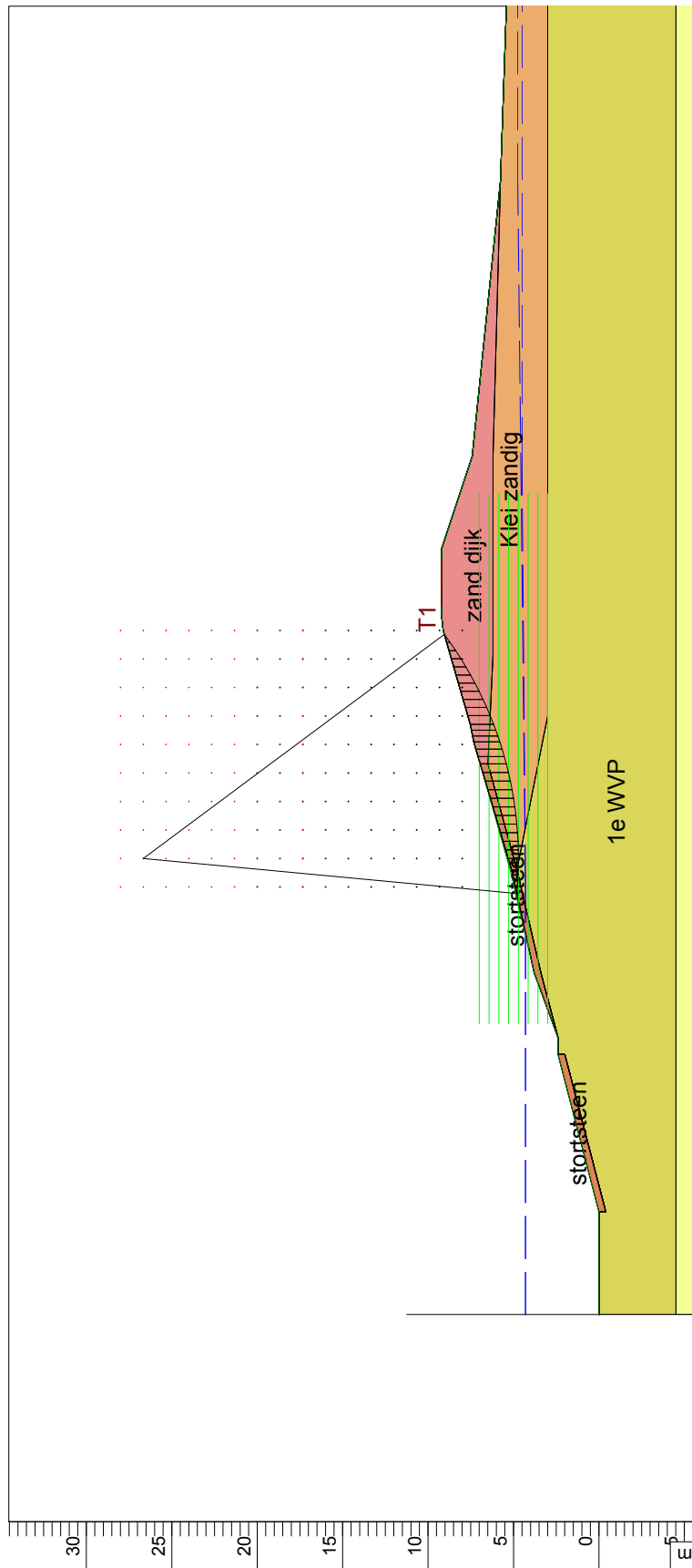
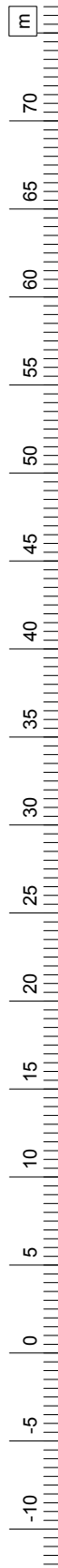
date	drw.
27-6-2018	IHE
BE4157	ctr.
Annex -	form. A4

DR51-DP21 WT2  
STBU

Bouwfase, dagelijkse omstandigheden



# Critical Circle Bishop



Radius : 21,95 [m]  
Safety : 1,71

Xm : 26,67 [m]  
Ym : 26,67 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_gebruik\_dagelijks\_STBU.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date  
27-6-2018

drw.  
IHE

DR51-DP21 WT2  
STBU

BE4157

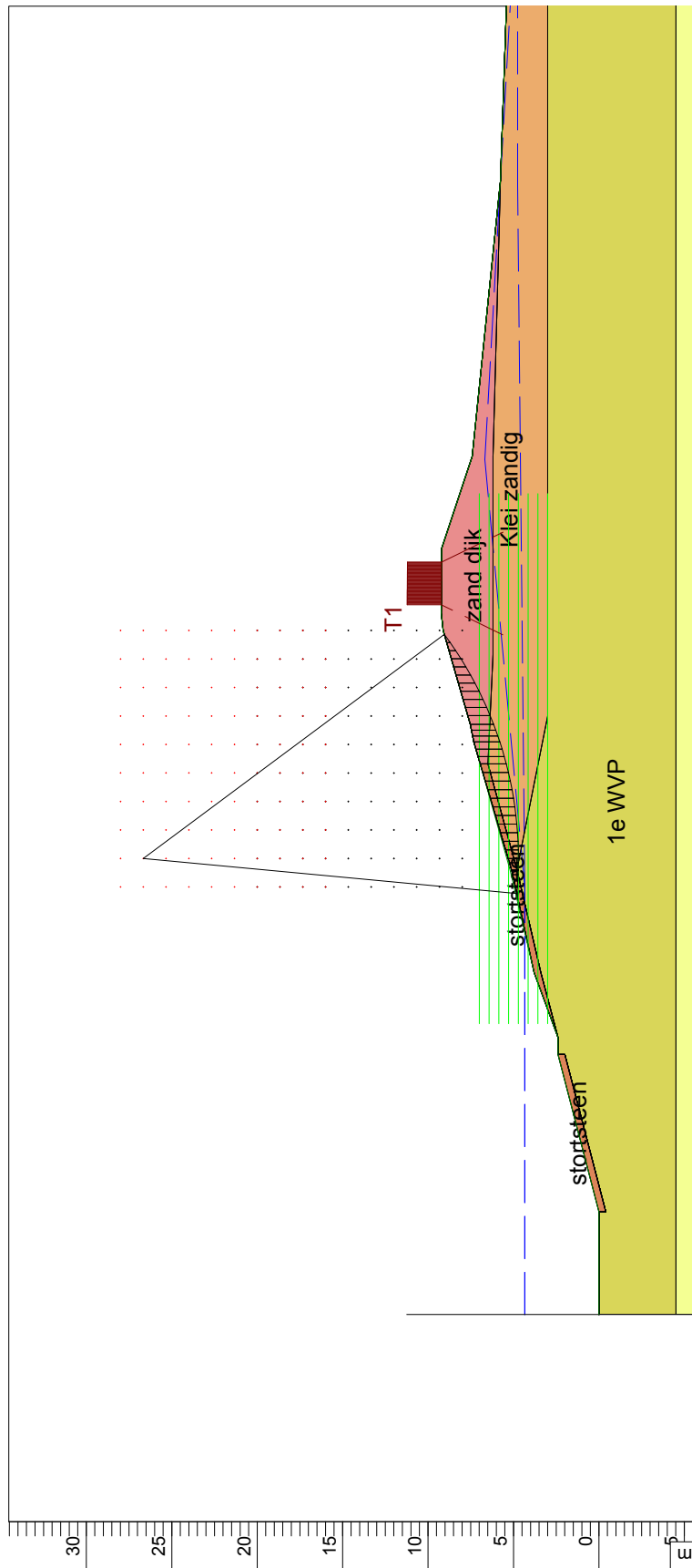
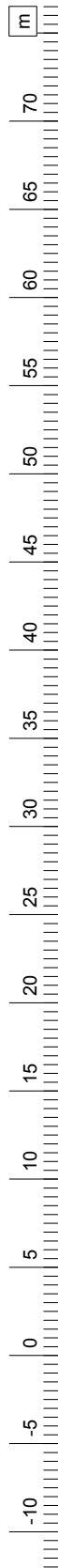
ctr.

Gebruiksfase, dagelijkse omstandigheden

Annex -

form.  
A4

# Critical Circle Bishop



Radius : 21,95 [m]  
Safety : 1,64

Xm : 26,67 [m]  
Ym : 26,67 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_gebruik stil\_STBU.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

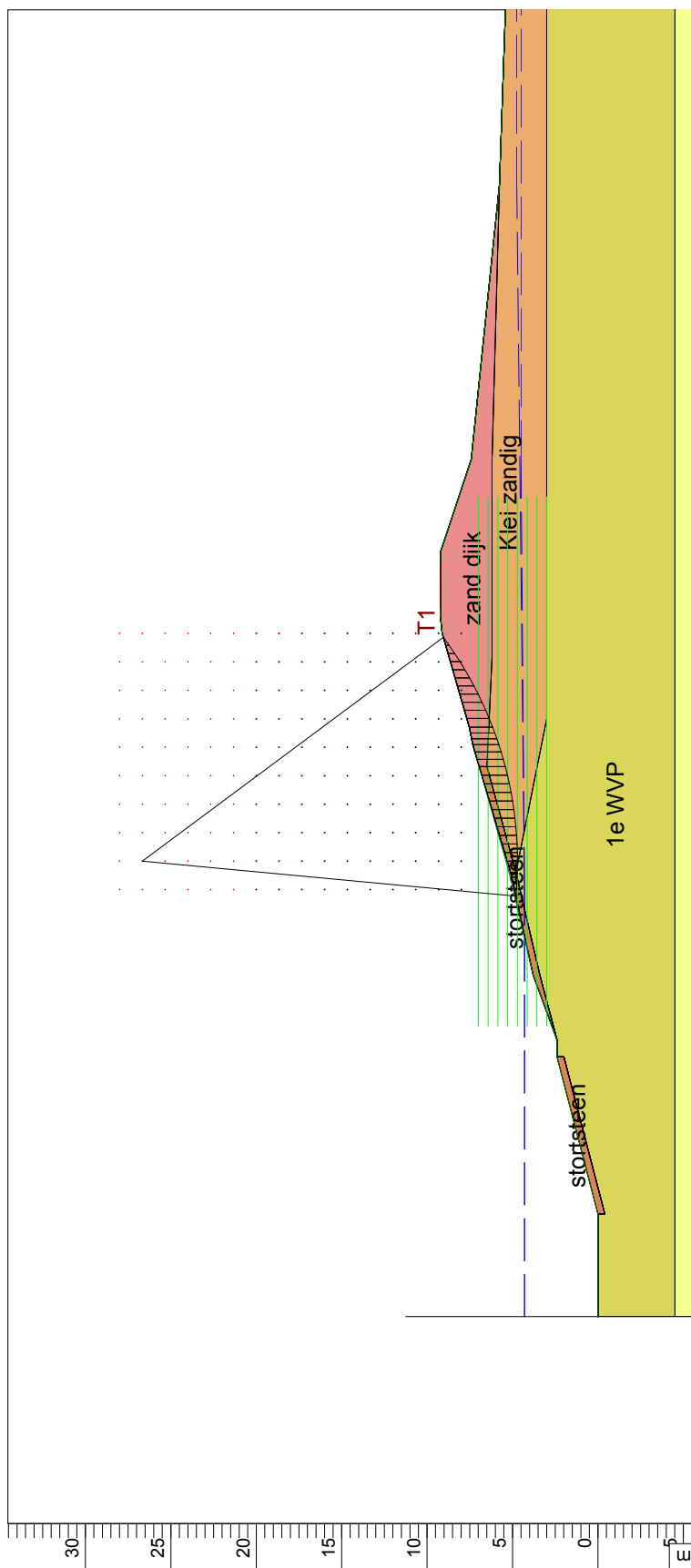
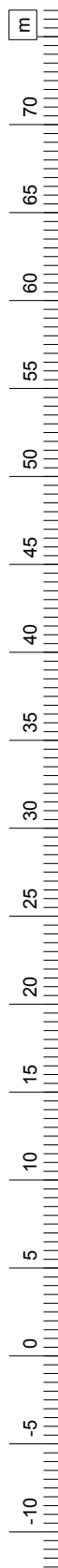
Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date	27-6-2018	drw.	IHE
	BE4157	ctr.	
Annex	-	form.	A4

DR51-DP21 WT2  
STBU

Gebruiksfase, bladen stil, extreme omstandigheden

# Critical Circle Bishop



Radius : 21,95 [m]  
Safety : 1,57

Xm : 26,67 [m]  
Ym : 26,67 [m]

D-Geo Stability 18.1 : Dp21\_sloop\_STBU.sti



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

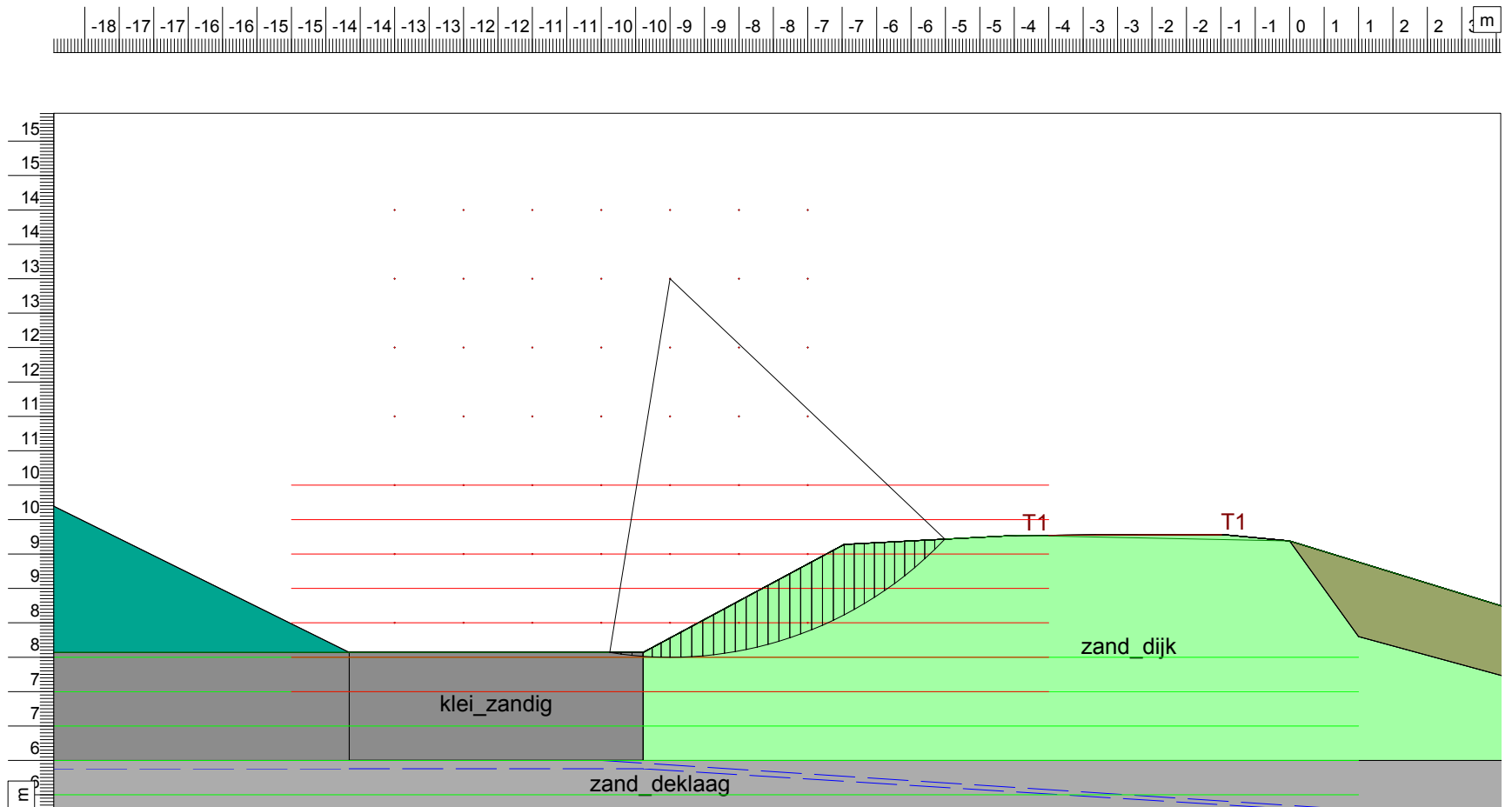
Phone +31 (0)6 46 37 14 07  
Fax

date	drw.
27-6-2018	IHE
BE4157	ctr.
Annex -	form. A4

DR51-DP21 WT2  
STBU

Sloopfase, dagelijkse omstandigheden

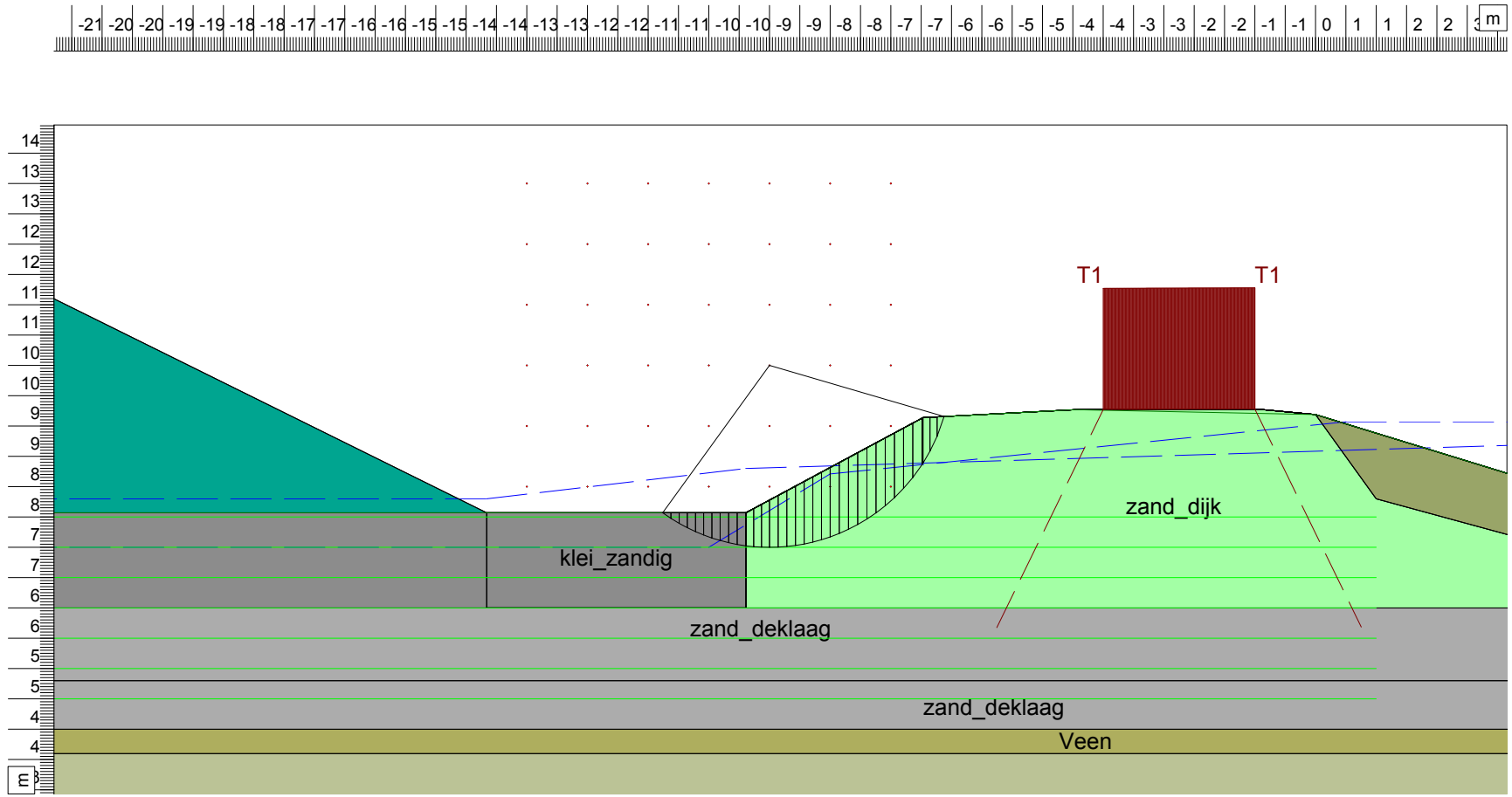
### Critical Circle Bishop



Xm : -9,00 [m]  
Ym : 13,00 [m]

Radius : 5,50 [m]  
Safety : 1,51

# Critical Circle Bishop



Xm : -9,00 [m]  
Ym : 10,00 [m]

Radius : 3,00 [m]  
Safety : 1,10



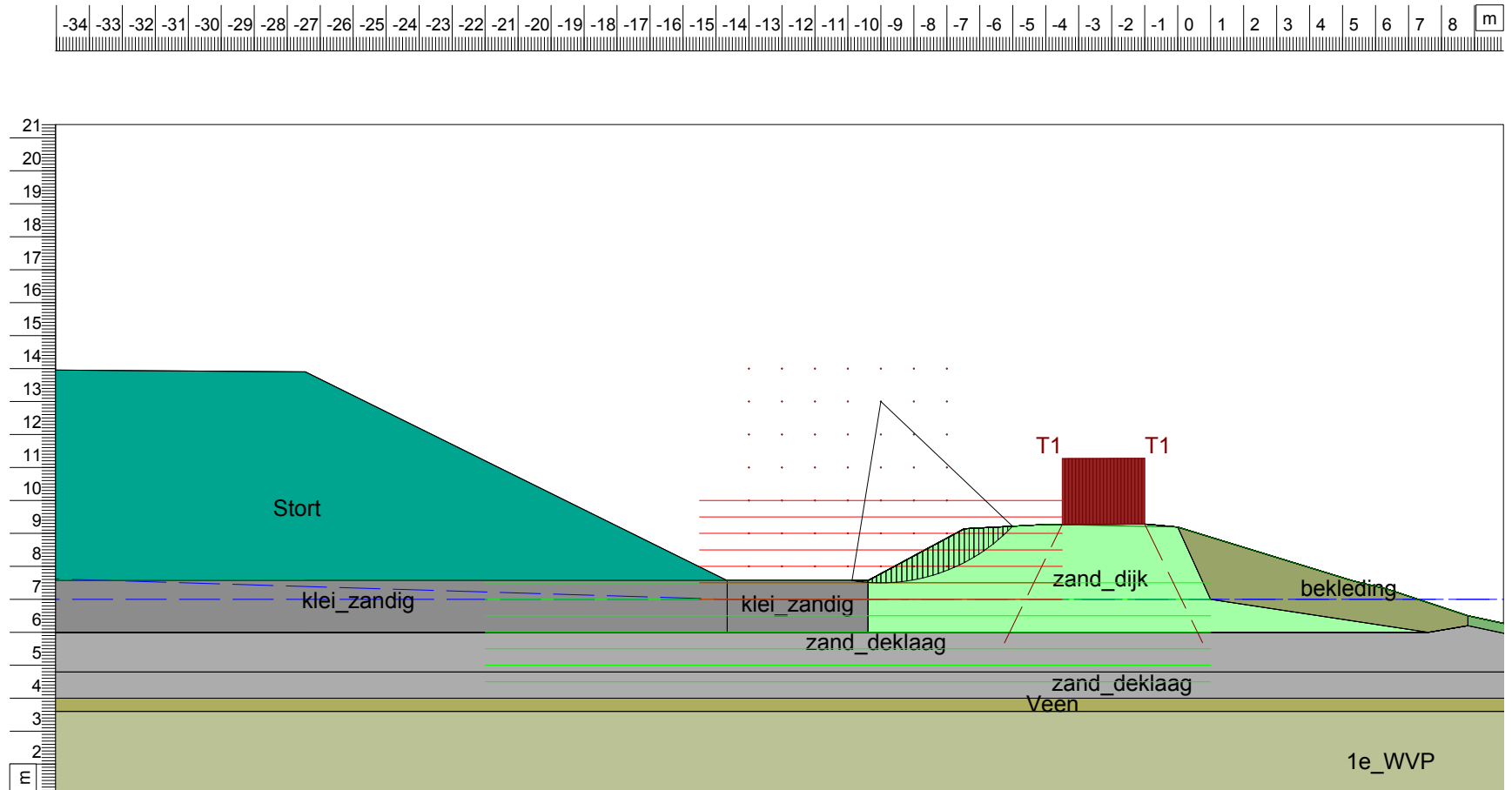
Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort  
Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

D:\Geo Stability 18.1 : Dp136\_huidig\_extreem\_STBI.sil

DR50-DP136 WT3  
STBI  
Huidige situatie, extreme omstandigheden

Annex -	BE4157	27-6-2018	IHE
A4			

### Critical Circle Bishop

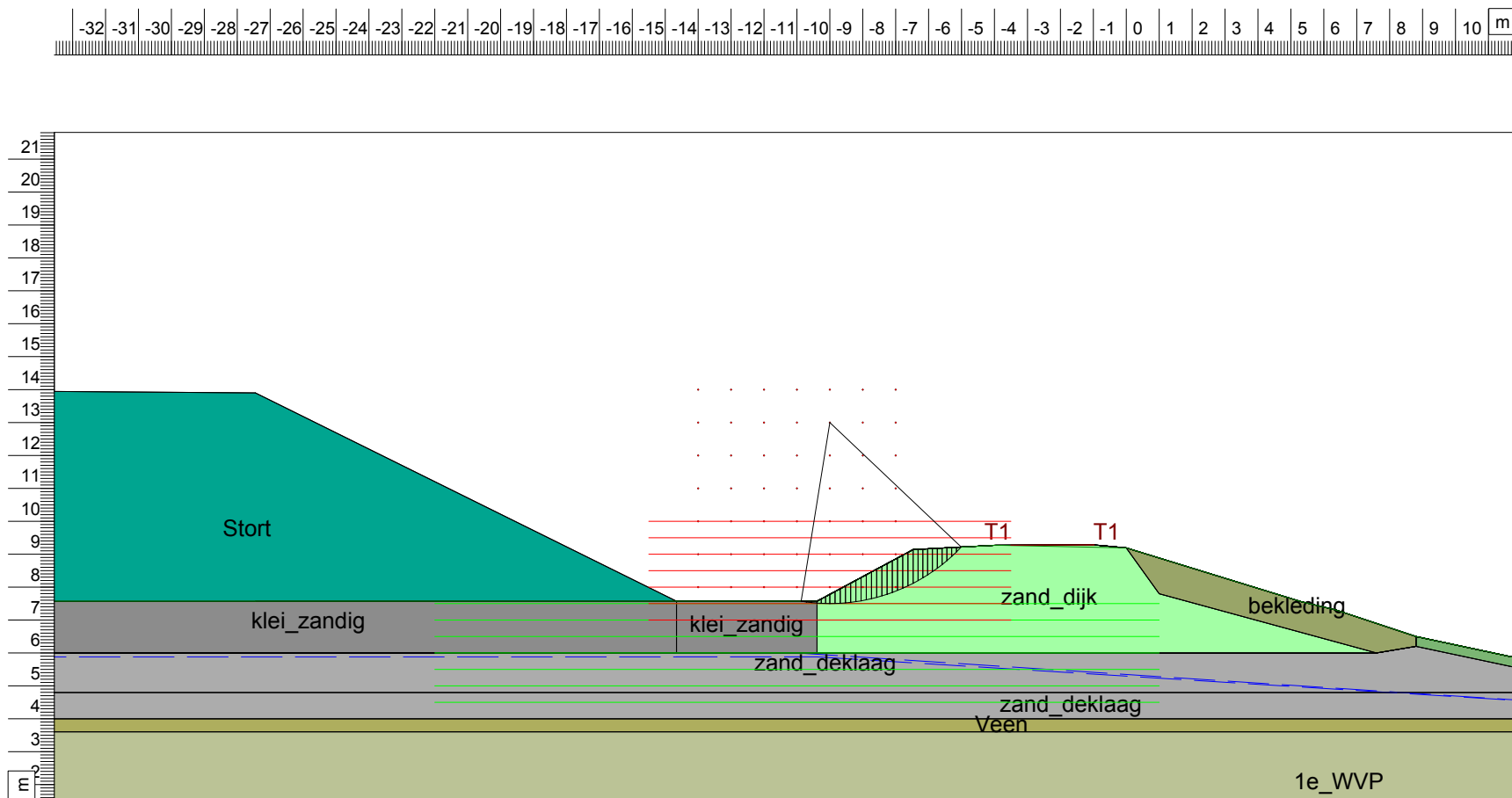


Xm : -9,00 [m]  
Ym : 13,00 [m]

Radius : 5,50 [m]  
Safety : 1,51



# Critical Circle Bishop



$X_m : -9.00$  [m]  
 $Y_m : 13.00$  [m]

Radius : 5,50 [m]  
 Safety : 1,20



Laan 1914 nr 35  
 3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
 Fax

D:\Geo Stability 18.1 : Dp136\_bouw\_STBI.stl

date  
 27-6-2018

drw.  
 IHE

DR50-DP136 WT3

STBI

BE4157

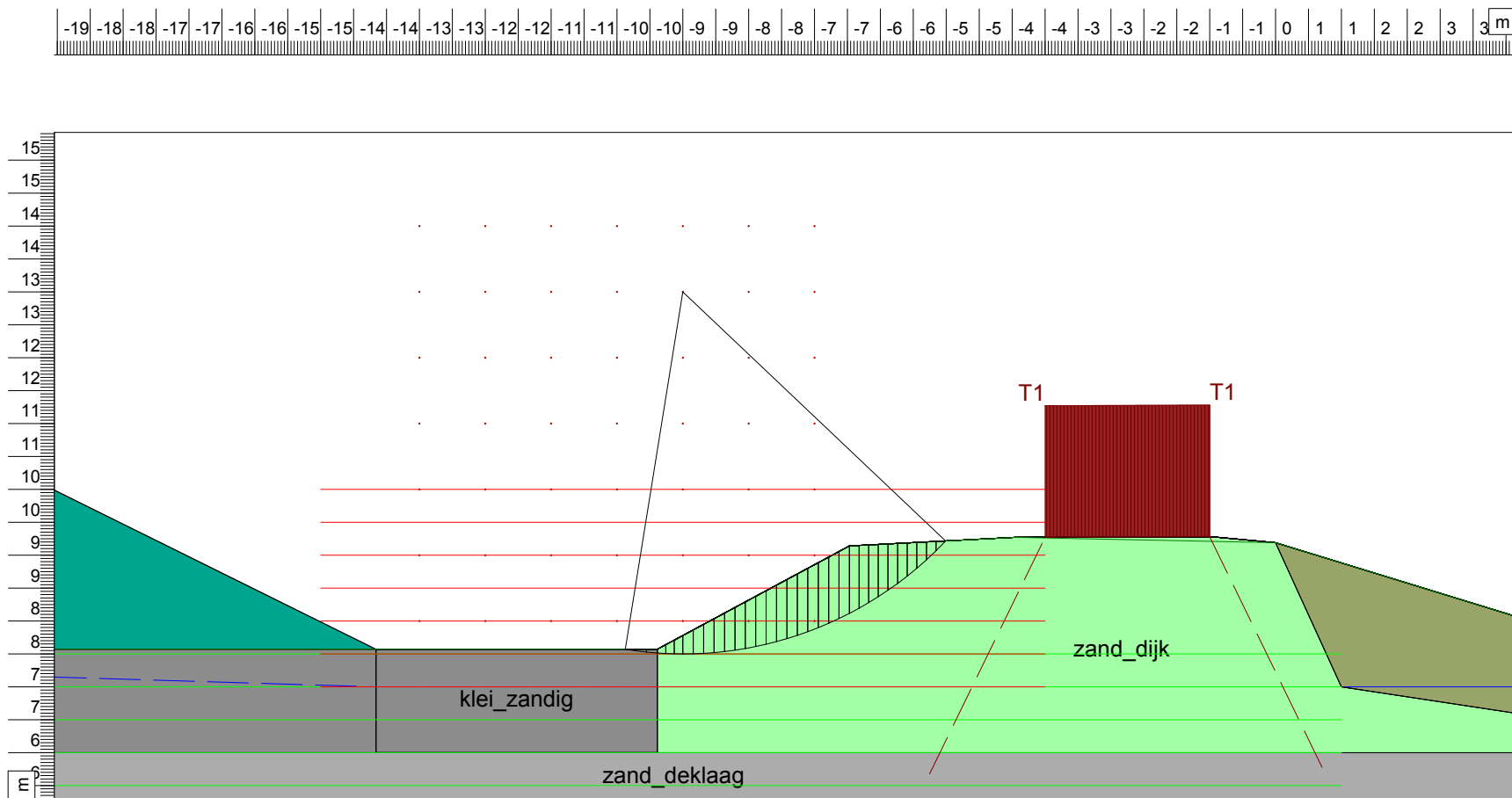
form.

Bouwfase, dagelijkse omstandigheden

Annex -

A4

# Critical Circle Bishop



$X_m : -9.00$  [m]  
 $Y_m : 13.00$  [m]

Radius : 5,50 [m]  
 Safety : 1,45



Laan 1914 nr 35  
 3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
 Fax

D:\Geo Stability 18.1 : Dp136\_gebruik stil\_STBI.stl

date  
 27-6-2018

drw.  
 IHE

DR50-DP136 WT3

STBI

BE4157

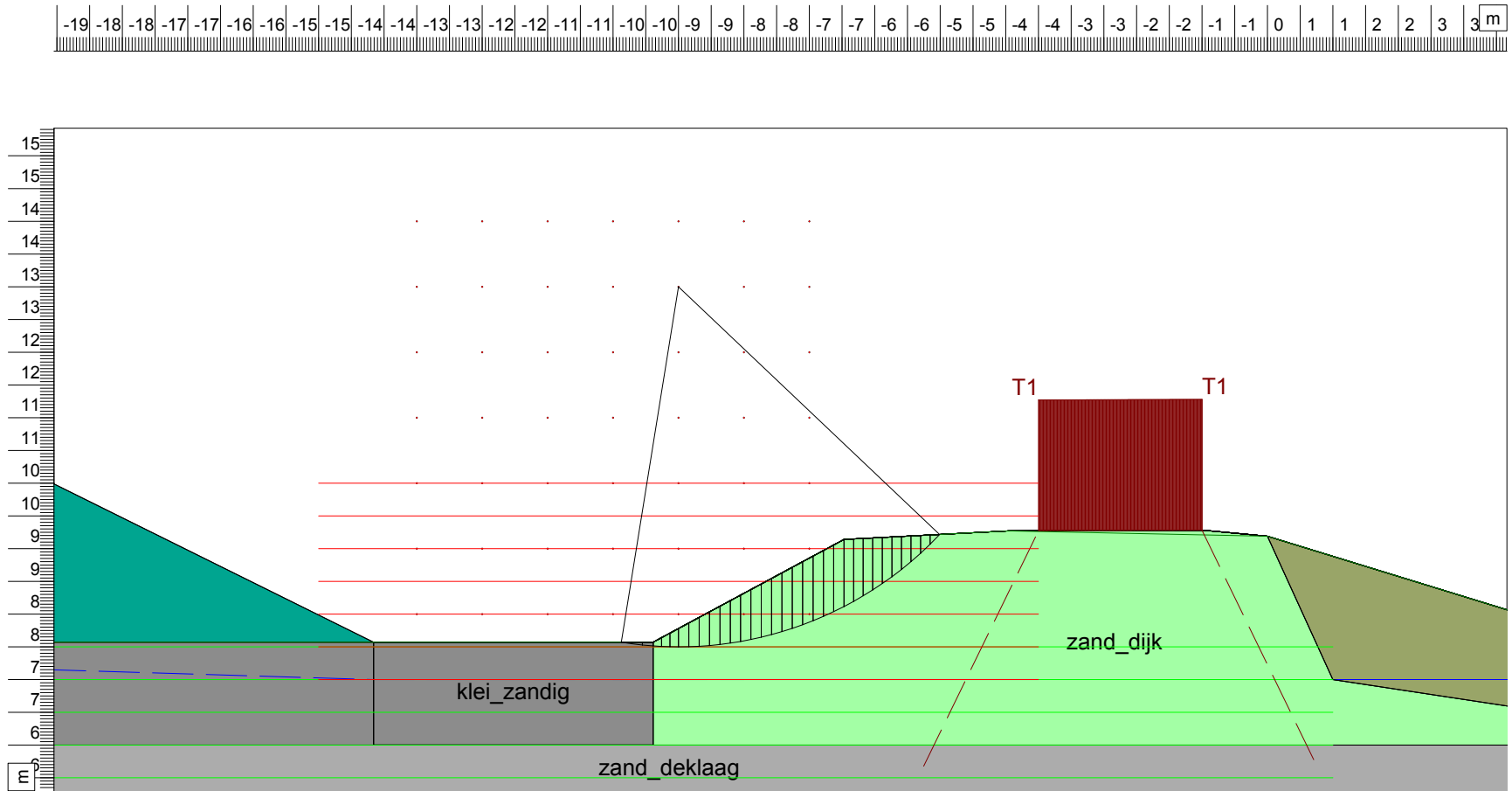
dr.

Gebruiksfase bladen stil, HW omstandigheden

Annex -

form.  
 A4

# Critical Circle Bishop



$X_m : -9.00$  [m]  
 $Y_m : 13.00$  [m]

Radius : 5,50 [m]  
 Safety : 1,48



Laan 1914 nr 35  
 3818 EX Amersfoort  
 Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
 Fax

D:Geo Stability 18.1 : Dpt36\_gebruik draaiend\_STBI.stl

date  
 27-6-2018

drw.  
 IHE

DR50-DP136 WT3

STBI

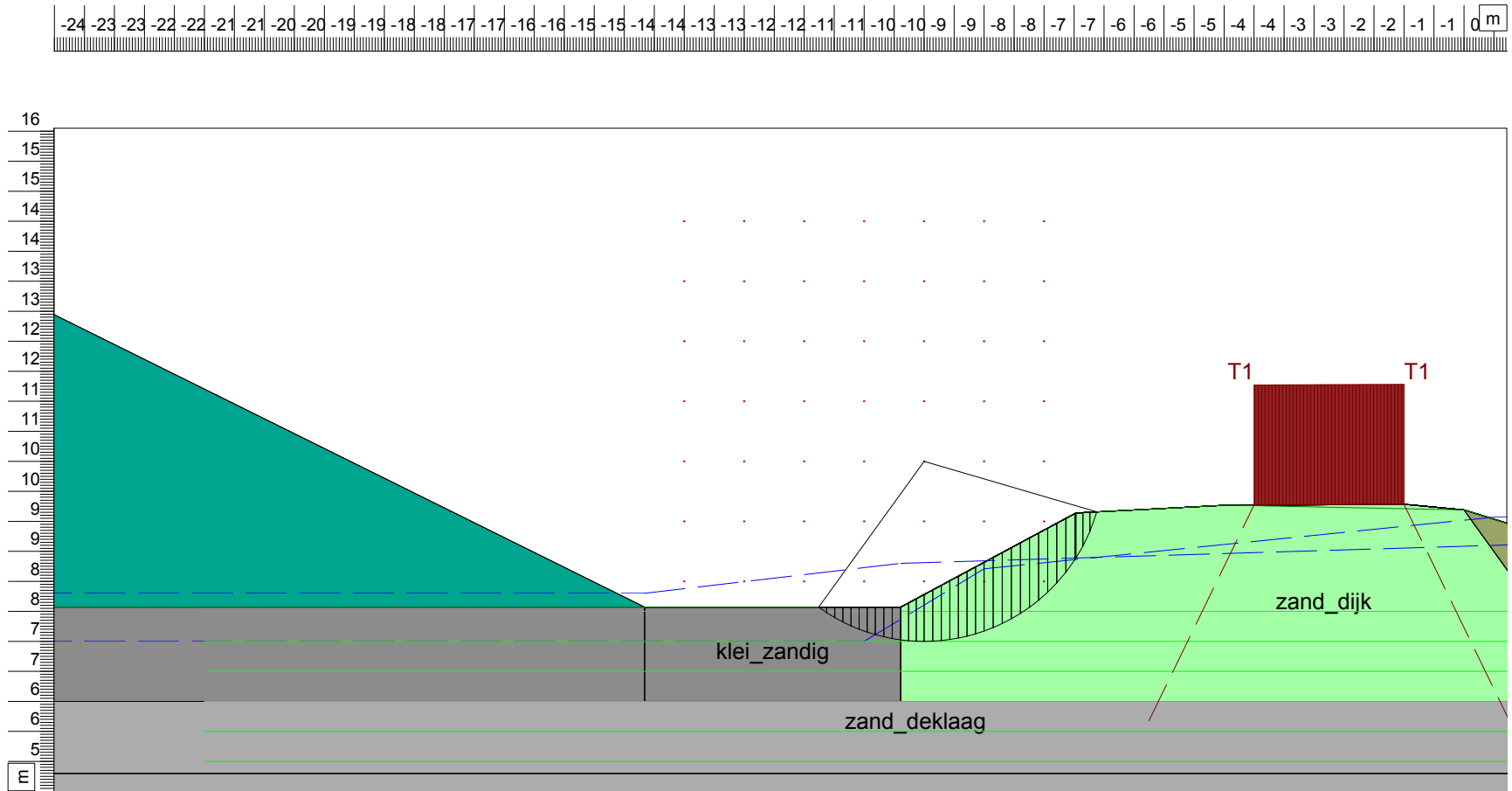
BE4157

Annex -

form.  
 A4

Gebruiksfase bladen draaiend, HW omstandigheden

# Critical Circle Bishop



Xm : -9,00 [m]  
Ym : 10,00 [m]

Radius : 3,00 [m]  
Safety : 1,09



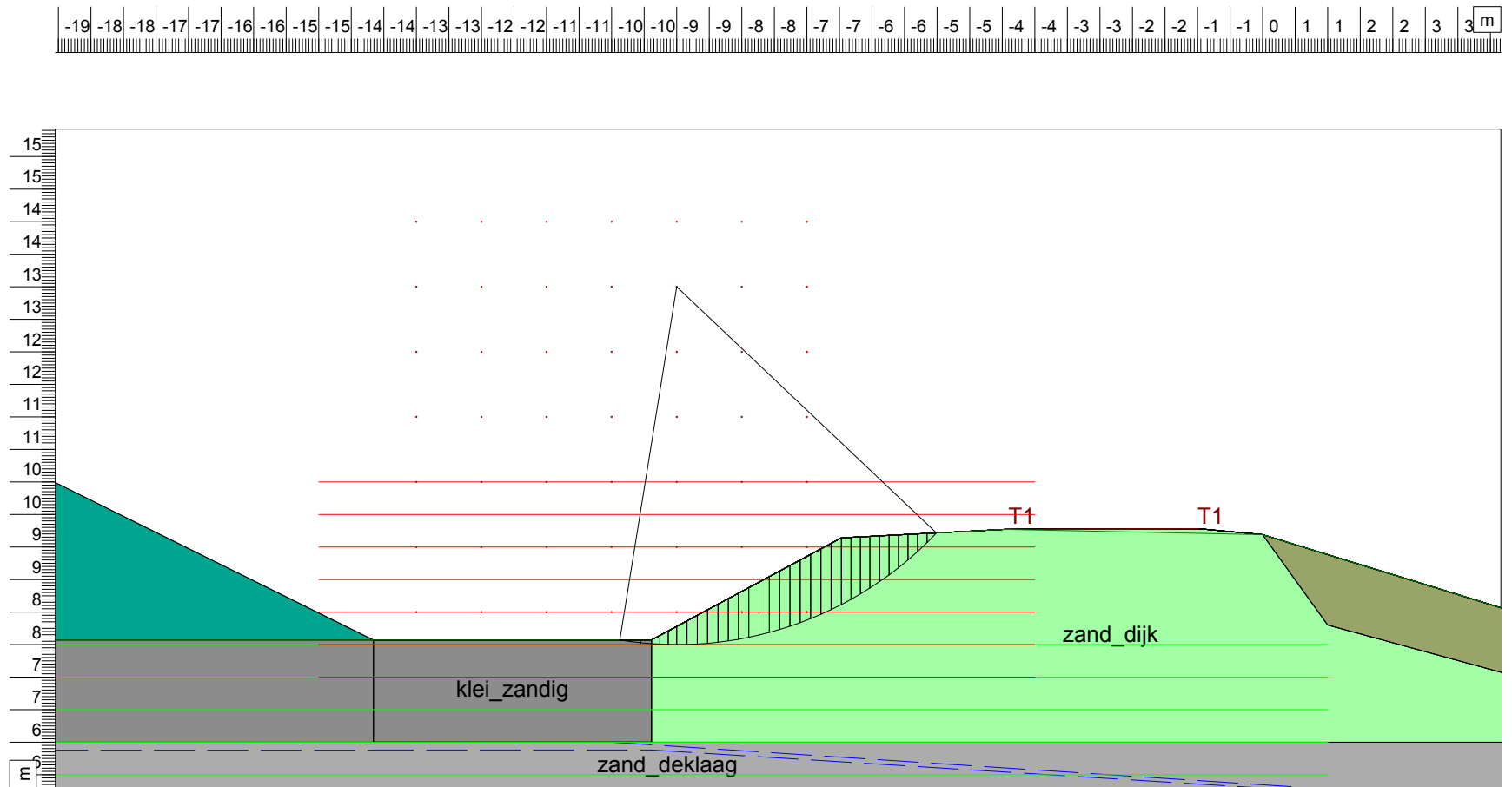
Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort  
Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

D:Geo Stability 18.1 : Dp136\_gebruik\_dag\_extreem\_STBI.stl

DR50-DP136 WT3  
STBI  
Gebruiksfase, extreme waterstand dagelijkse trill

Annex -	BE4157	5-7-2018	IHE
		date	div.
A4		form.	dt.

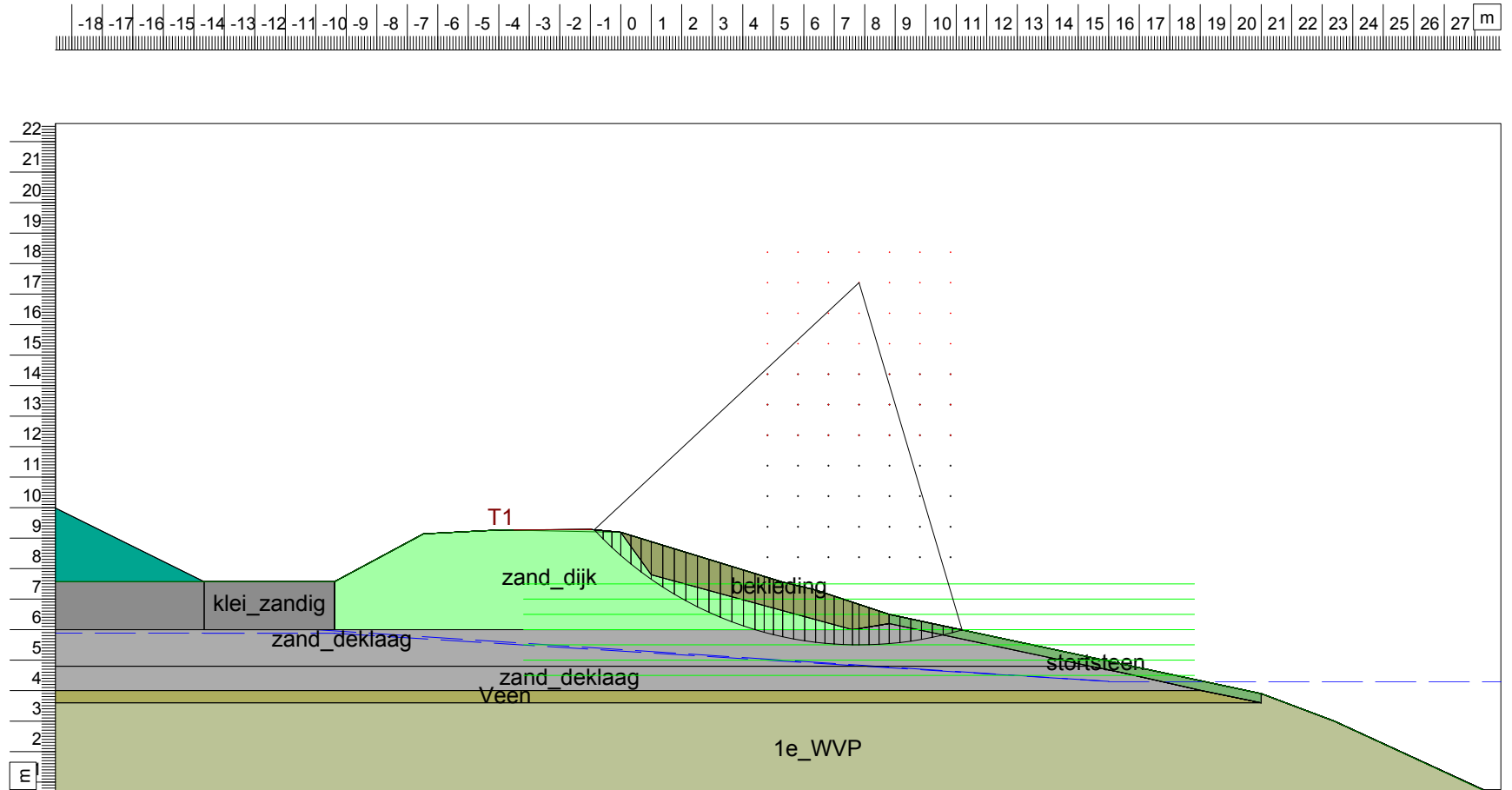
### Critical Circle Bishop



Xm : -9,00 [m]  
Ym : 13,00 [m]

Radius : 5,50 [m]  
Safety : 1,39

### Critical Circle Bishop

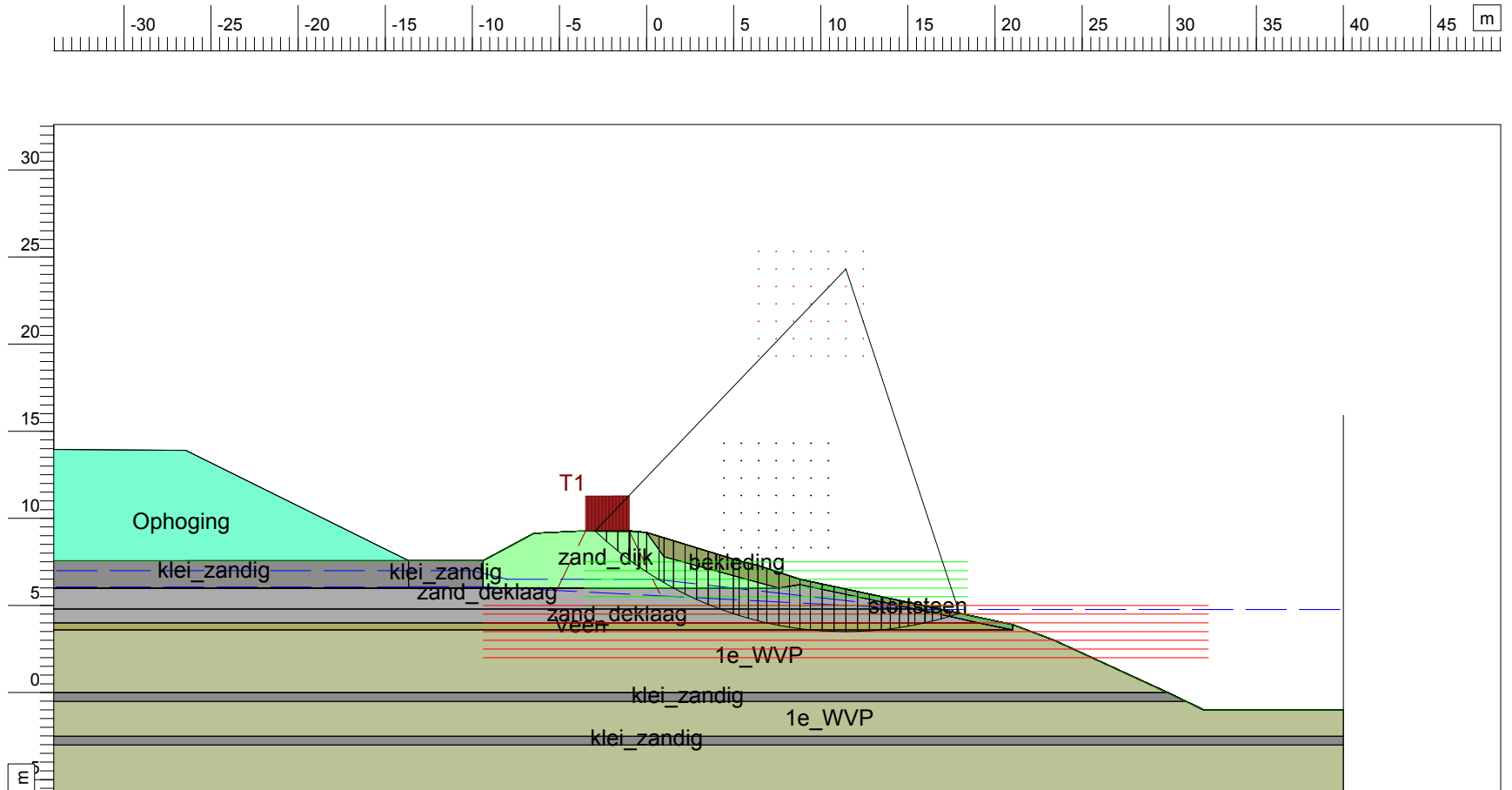


Xm : 7,81 [m]  
Ym : 17,38 [m]

Radius : 11,88 [m]  
Safety : 1,95



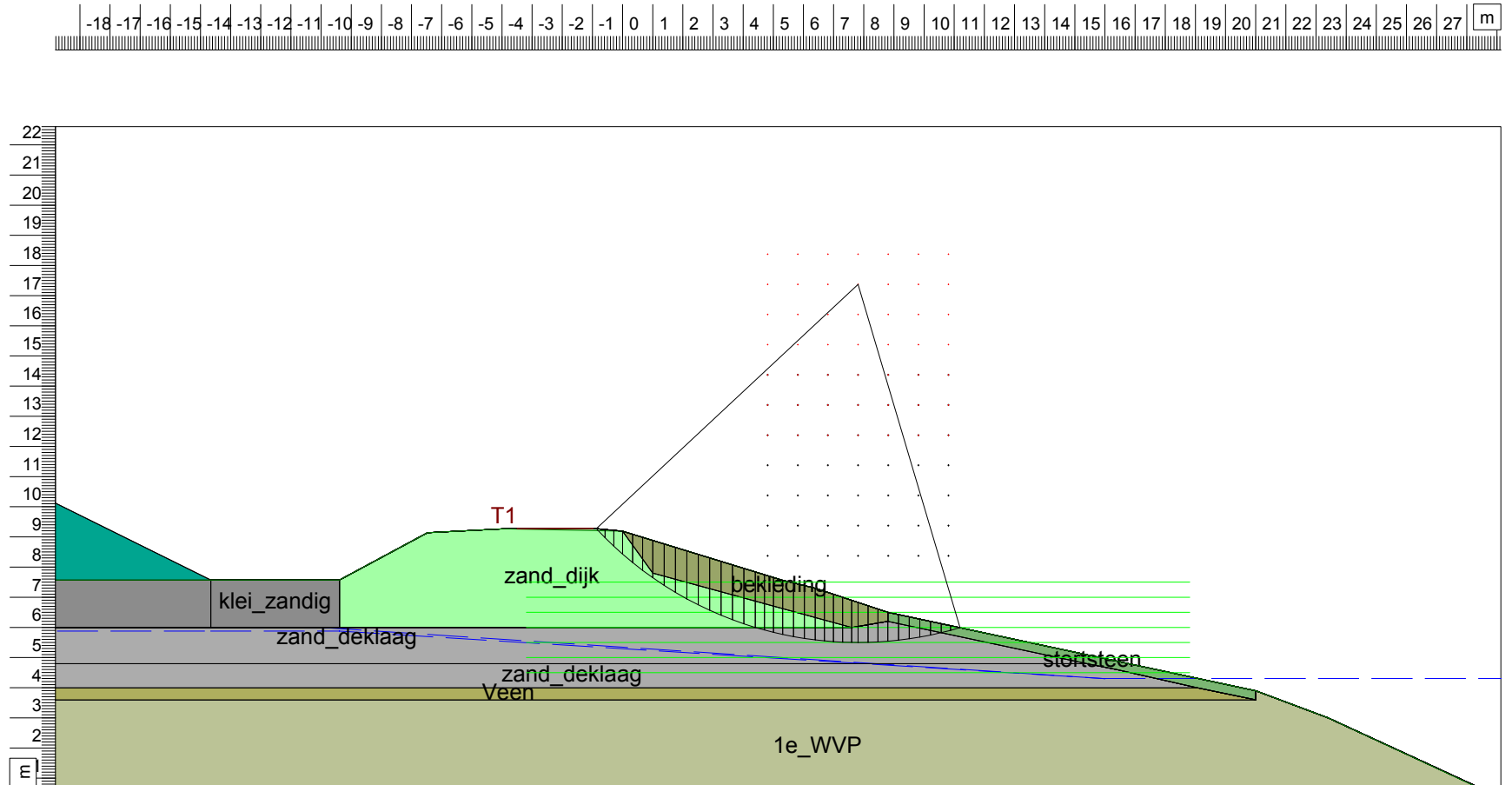
### Critical Circle Bishop



$X_m : 11,44$  [m]  
 $Y_m : 24,31$  [m]

Radius : 20,81 [m]  
Safety : 1,61

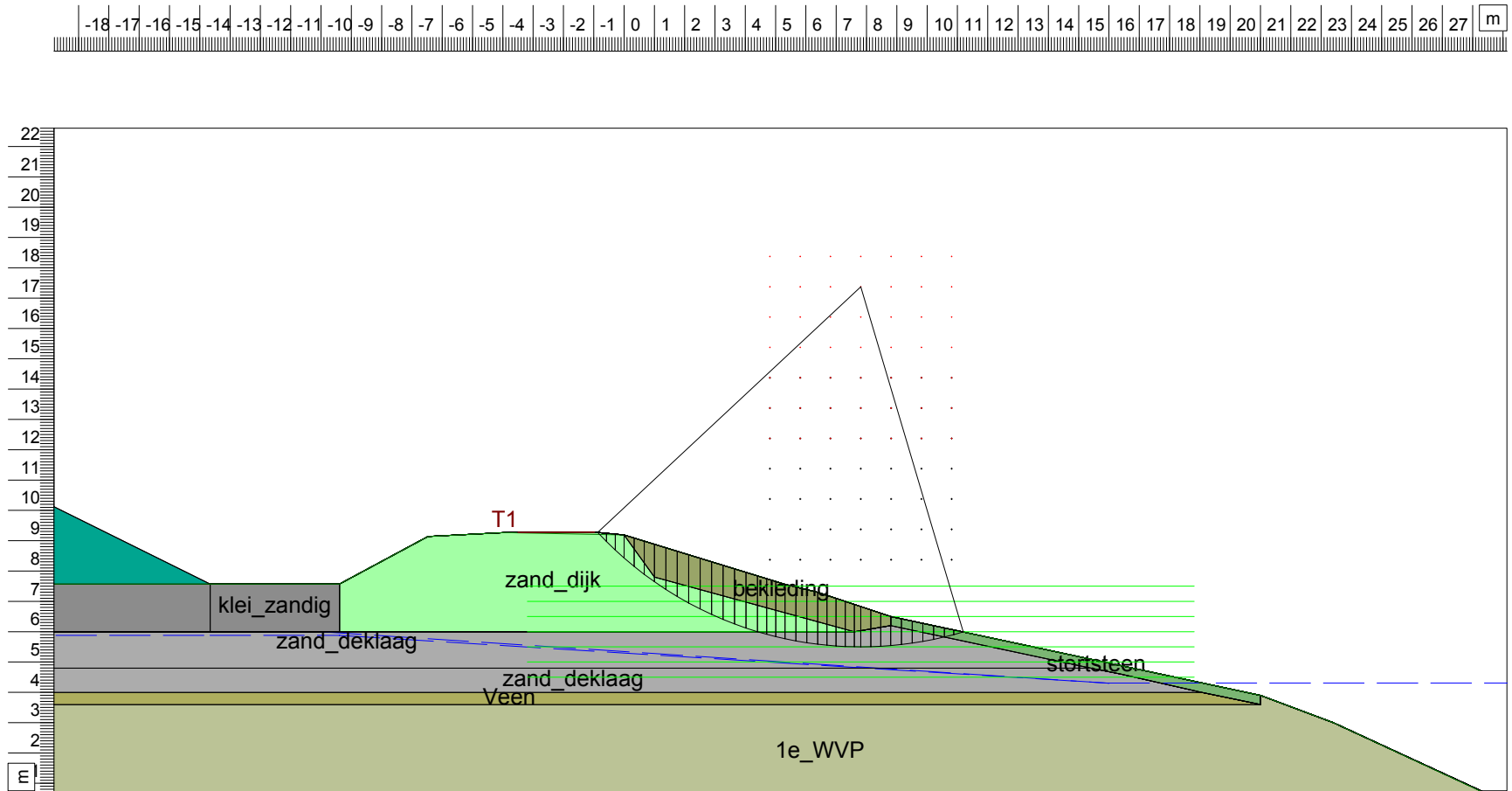
### Critical Circle Bishop



Xm : 7,81 [m]  
Ym : 17,38 [m]

Radius : 11,88 [m]  
Safety : 1,46

# Critical Circle Bishop



Xm : 7,81 [m]  
Ym : 17,38 [m]

Radius : 11,88 [m]  
Safety : 1,92



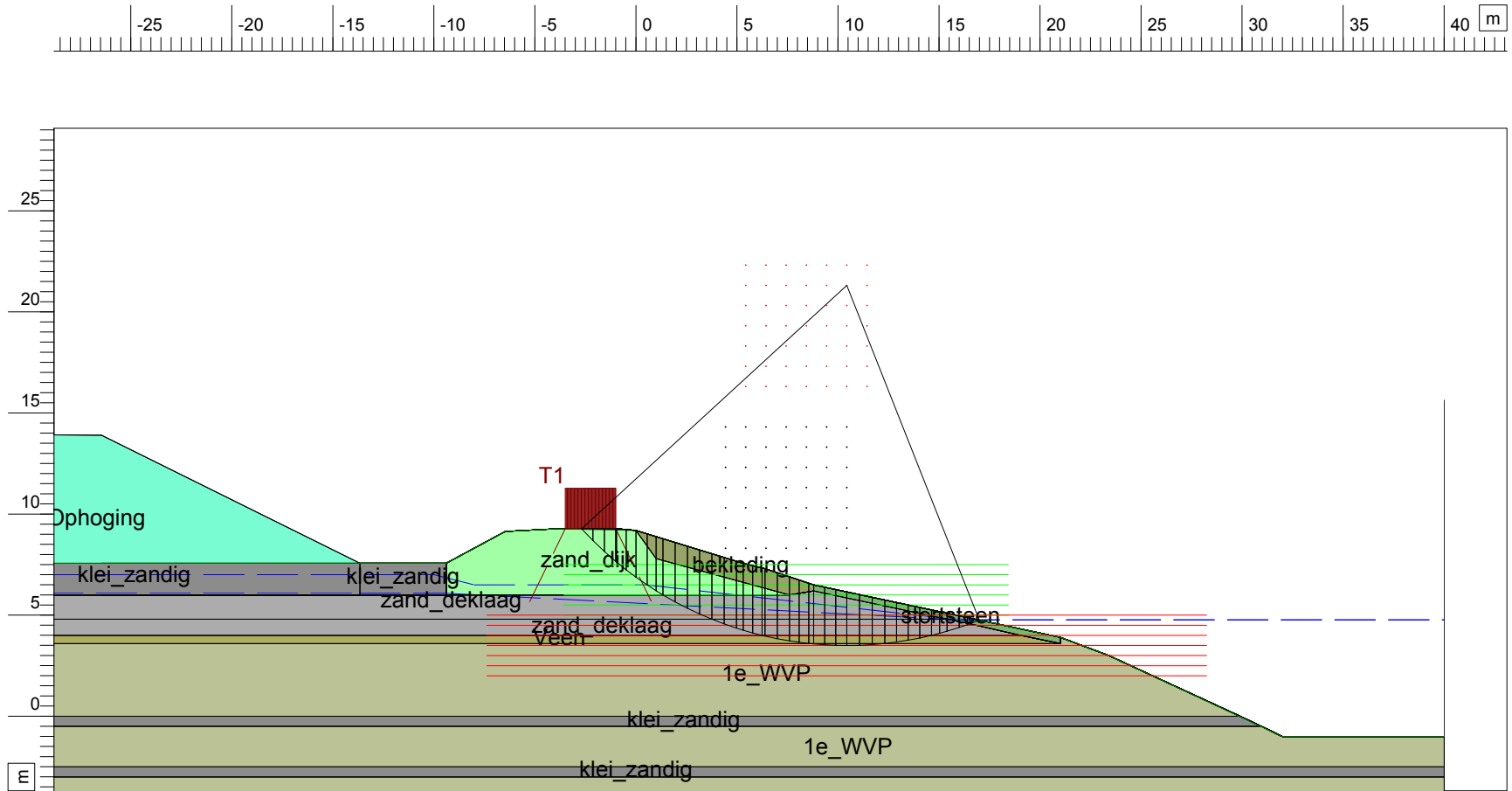
Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort  
Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

D:\Geo Stability 18.1 : Dp136\_gebruik\_dagelijks\_STBU.sit

DR50-DP136 WT3  
STBU  
Gebruiksfase, dagelijkse omstandigheden

Annex -	BE4157	27-6-2018	IHE
A4			

# Critical Circle Bishop



Xm : 10,44 [m]  
Ym : 21,31 [m]

Radius : 17,81 [m]  
Safety : 1,52



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

D:Geo Stability 18.1 : Dp136 gebruik stil\_STBU.stl

date  
27-6-2018

drv.  
IHE

DR50-DP136 WT3

BE4157

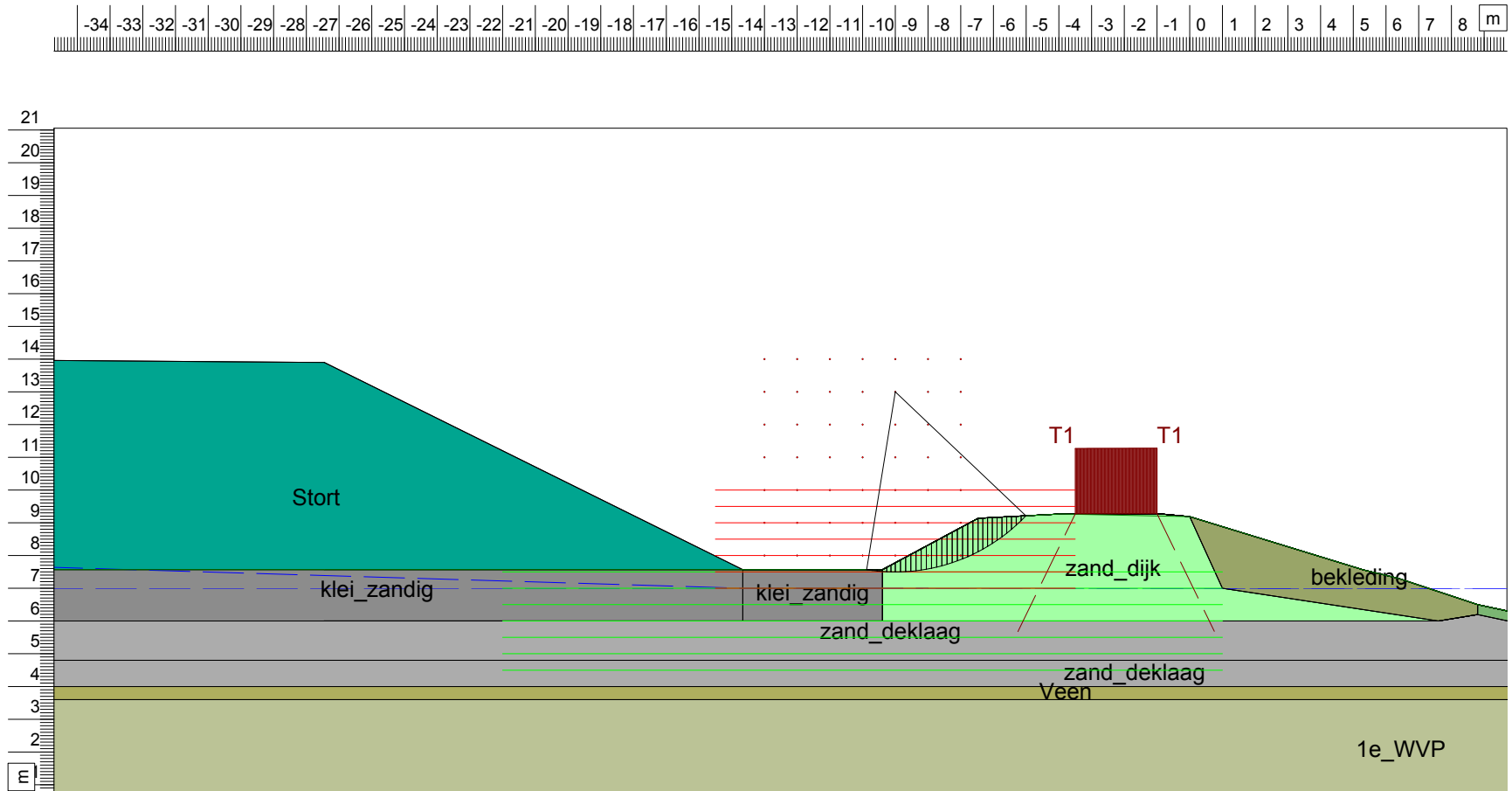
dr.

STBU  
Gebruiksfase bladen stil, extreme omstandigheden

Annex -

form.  
A4

# Critical Circle Bishop



Xm : -9,00 [m]  
Ym : 13,00 [m]

Radius : 5,50 [m]  
Safety : 1,41



Laan 1914 nr 35  
3818 EX Amersfoort

Phone +31 (0)8 46 37 14 07  
Fax

D:Geo Stability 18.1 : Dp136\_gebruik-noodstop\_STBI.sil

date  
27-6-2018

drw.  
IHE

DR50-DP136 WT3

STBI

BE4157

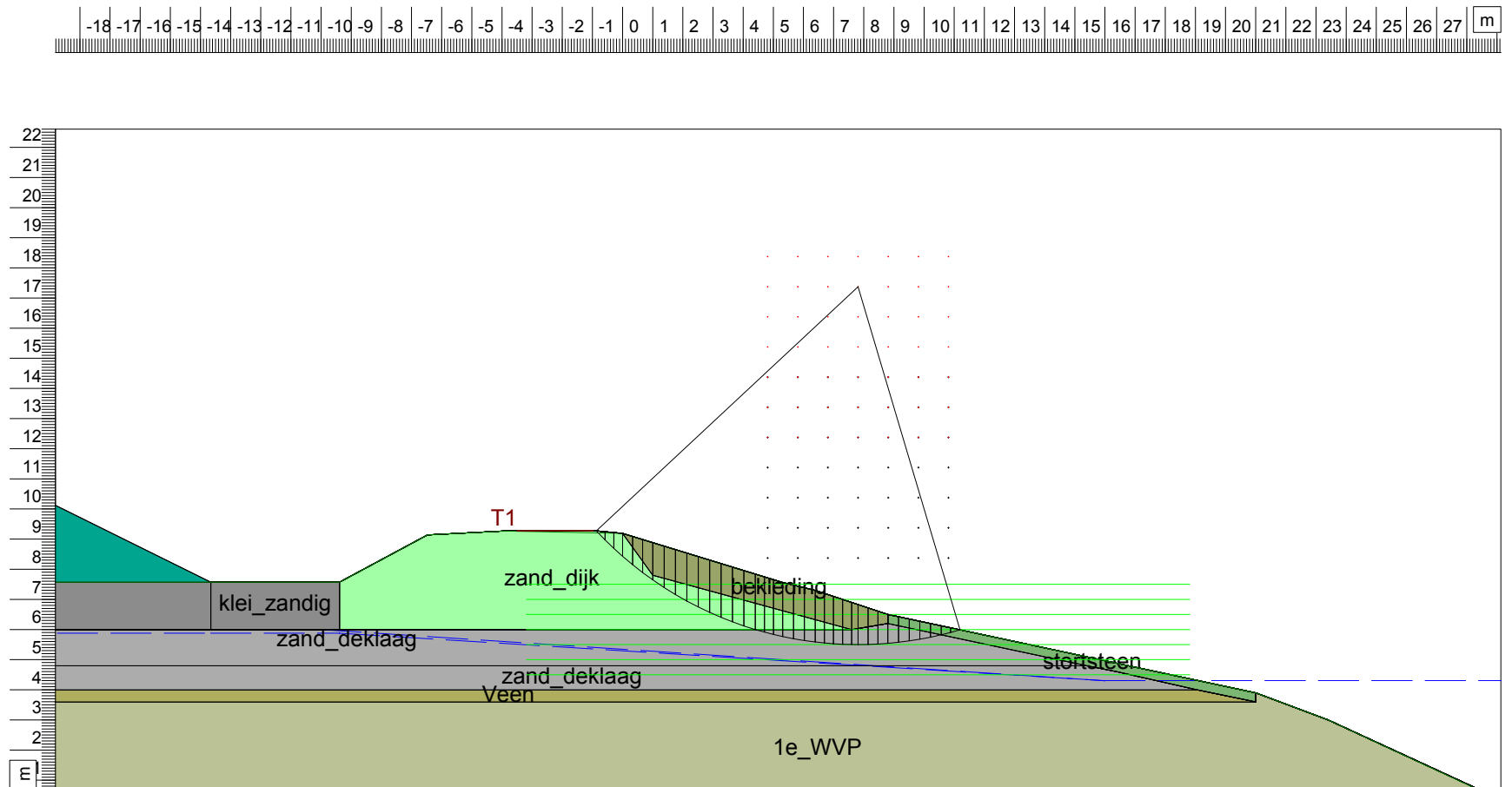
dr.

Gebruiksfase noodstop, HW omstandigheden

Annex -

form.  
A4

### Critical Circle Bishop



Xm : 7,81 [m]  
Ym : 17,38 [m]

Radius : 11,88 [m]  
Safety : 1,76

## A9 Tekening transportroutes en kraanopstelplaatsen

WT 1 en WT 2







## A10 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. De gewichten van de gondel en rotor verschillen per leverancier. De gewichten voor de maatgevend gestelde turbine GE 2.75 met 120 m rotordiameter en 125 m ashoogte zijn ingeschat in paragraaf 2.2 van het hoofdrapport. Op basis van extrapolatie van gewichten voor de kleinere modellen zijn de volgende gewichten aangehouden.

Tabel A10-1: gewichten van de gondel en rotor

Onderdeel	Gewicht (ton)
Gondel	93
Rotornaaf met bladen	68
Complete gondel met rotornaaf en bladen	161

#### Benaderingswijze

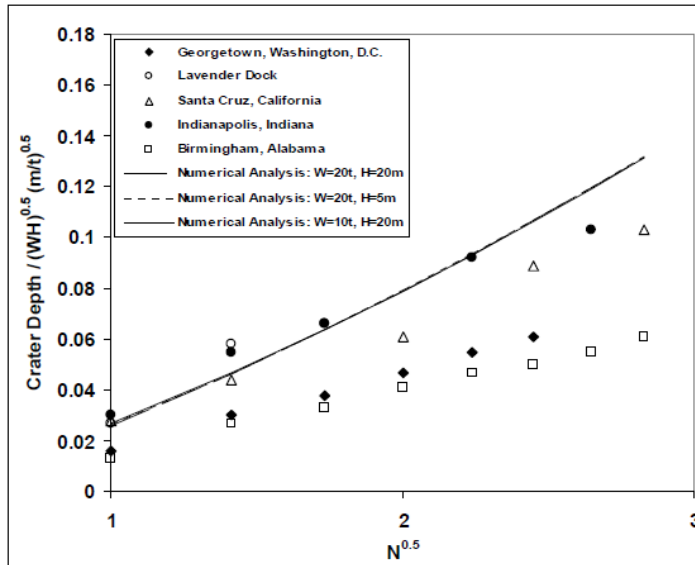
Er is in de praktijk weinig tot geen ervaring met grondvervorming door vallende voorwerpen, die qua afmetingen, gewicht en valsnelheid vergelijkbaar zijn met de situatie van een vallende windturbinegondel. Bestaande theorieën zijn veelal gebaseerd op kleinere voorwerpen (<40 ton) met geringere valhoogten (<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 Mayne<sup>2</sup> 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:  $75\% \times 161 \text{ t} = 121 \text{ t}$ .

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:  $0,015 \times (121 \times 125)^{0.5} = 1,8 \text{ m}$
- Bovengrens:  $0,03 \times (121 \times 125)^{0.5} = 3,7 \text{ m}$

**Voor de val van de gondel en rotor wordt uitgegaan van een kraterdiepte van 3,7 m.**

<sup>2</sup> 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 GE 2.75-120 is aangenomen op 15 t, ofwel circa 150 kN. Het zwaartepunt ligt op 21,6 m vanaf de as van de rotor ( $R_z$ ). Het blad kan onder verschillende hoeken ( $\alpha$ ) 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:  $n = 13$  rpm
- Bij overtoeren (2xnominaal):  $n = 26$  rpm

De lanceersnelheid bedraagt dan:

- Bij nominaal toerental:  $v_0 = 2 \cdot \pi \cdot (13/60) \cdot 21,6 = 29,4$  m/s
- Bij overtoeren (2xnominaal):  $v_0 = 2 \cdot \pi \cdot (26/60) \cdot 21,6 = 58,8$  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  $9,81$  m/s<sup>2</sup>.

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 ( $v_y=0$  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:  $y_{top} = 29,4^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 44$  m
- Bij overtoeren (2xnominaal):  $y_{top} = 58,8^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 176$  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 22 m, respectievelijk 88 m.

#### 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 B6-2: 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	125	44	169	0,8	1,5
- Maximale werpafstand	125	22	147	0,7	1,4
Overtoeren					
- Maximale werphoogte	125	176	301	1,0	2,0
- Maximale werpafstand	125	88	213	0,8	1,7

**Voor de val van rotorblad wordt uitgegaan van een kraterdiepte van 1,5 m voor nominaal toerental en 2,0 m bij overtoeren.**