

Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Maritime & Aviation

Aan: Eneco Wind B.V.
Van: [REDACTED]
Datum: 18 juni 2020
Kopie: [REDACTED]
Ons kenmerk: BG8375-RHD-ZZ-XX-NT-G-0008
Classificatie: Projectgerelateerd
Goedgekeurd door: [REDACTED]
Goedgekeurd door: [REDACTED]

Onderwerp: Windpark Maasvlakte 2: resultaten Plaxis 3D EEM berekening

Inhoud

1	Algemeen	1
2	Berekening met Plaxis 3D	2
2.1	Opzet 3D Eindige Elementen Model	2
2.2	Invoer materiaaleigenschappen	3
2.3	Rekenfasen en belastinggevallen	5
3	Resultaten	6
4	Conclusie	8

1 Algemeen

Deze notitie beschrijft de invoer en resultaten van de 3D-eindige elementen berekeningen in het programma Plaxis 3D als onderdeel van het voorlopig ontwerp van de windturbinefundering op locatie HZ-10.

Conform eis 'M1.2.4' uit de verificatiematrix dient door middel van een 3D-eindige elementen berekening te worden aangetoond dat sprake is van een robuuste fundering. De eis is hieronder aangeven:

<i>M1.2.4</i>	<i>Aantonen robuuste fundering</i>	<i>Aantonen bezwijkbelasting fundering</i>	<i>Opdrachtnemer dient bij de aanvraag van de omgevingsvergunning met een 3D-eindige elementenberekening in een bijeenkomst met het regieteam aan te tonen dat in het ontwerp van de turbines de bezwijkbelasting van de fundering van de turbines, typen V117 en V162, op de Harde Zeewering ten minste 25% hoger ligt dan de bezwijkbelasting van de mast inclusief de verbinding.</i>
---------------	------------------------------------	--	--

De eis heeft betrekking op een 'geïntegreerde aanpak' voor het funderingsontwerp voor de windturbines in de Harde Zeewering. Met de geïntegreerde aanpak wordt bedoeld de samenstelde constructie van de zeewering, de grondterp inclusief geogrids en de betonnen fundering inclusief de palen. In tegenstelling tot hetgeen is gedefinieerd, dient deze eis niet om de 25% oversterkte aan te tonen, maar om te

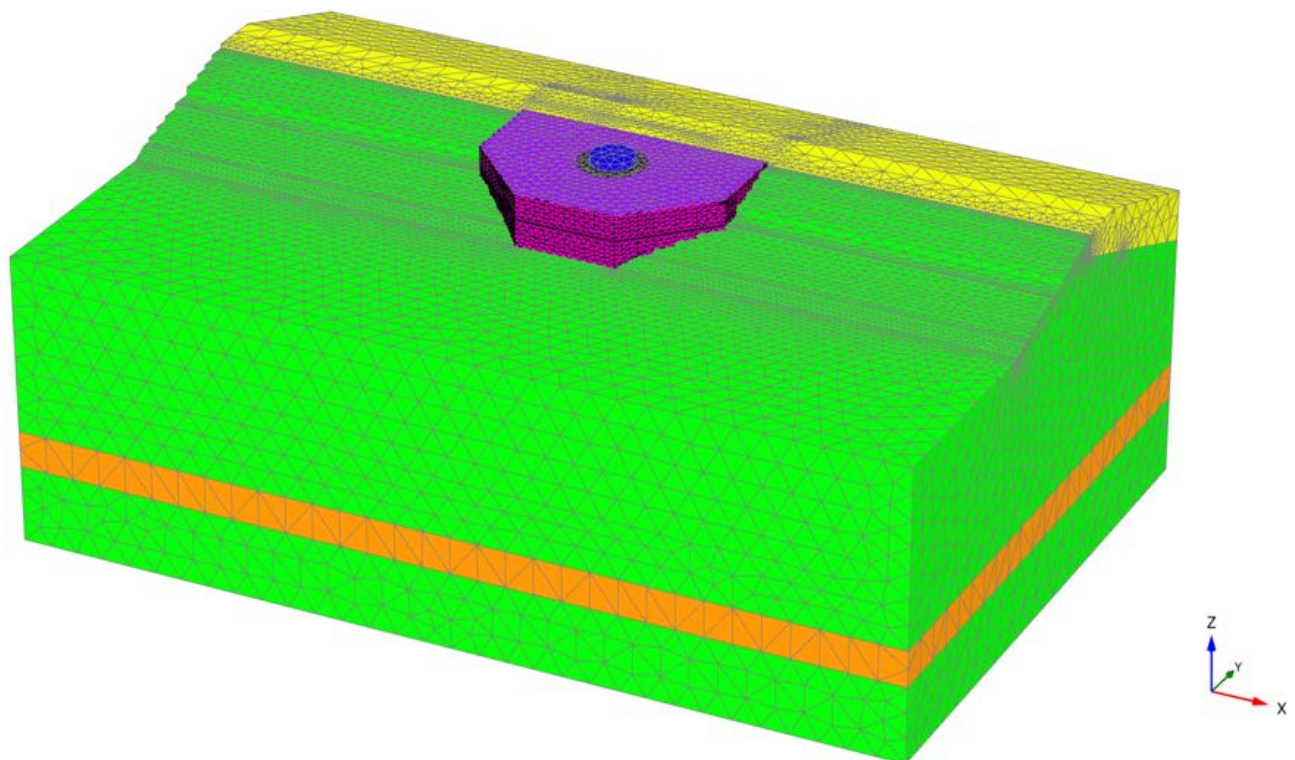
garanderen dat de interactie tussen grond en constructie is gewaarborgd. De 25% oversterkte is gewaarborgd in het eerste deel van eis M1.2.4¹ door voor het geotechnisch en constructief funderingsontwerp uit te gaan van de strengste gevolgklasse CC3 (RC3), terwijl voor de mast veiligheidsklasse CC1 van toepassing is.

Vanwege de geometrisch bijzondere situatie (terp tegen een talud met daarin een fundering op palen) kan de interactie tussen fundering en grond het beste met een 3D eindige elementenmodel (EEM) worden geanalyseerd. Ten opzichte van de (conservatieve) 2D rekenmodellen levert de toepassing van 3D modellen een meer realistische beschouwing en beter inzicht in het werkelijke stijfheids- en vervormingsgedrag.

2 Invoer berekening met Plaxis 3D

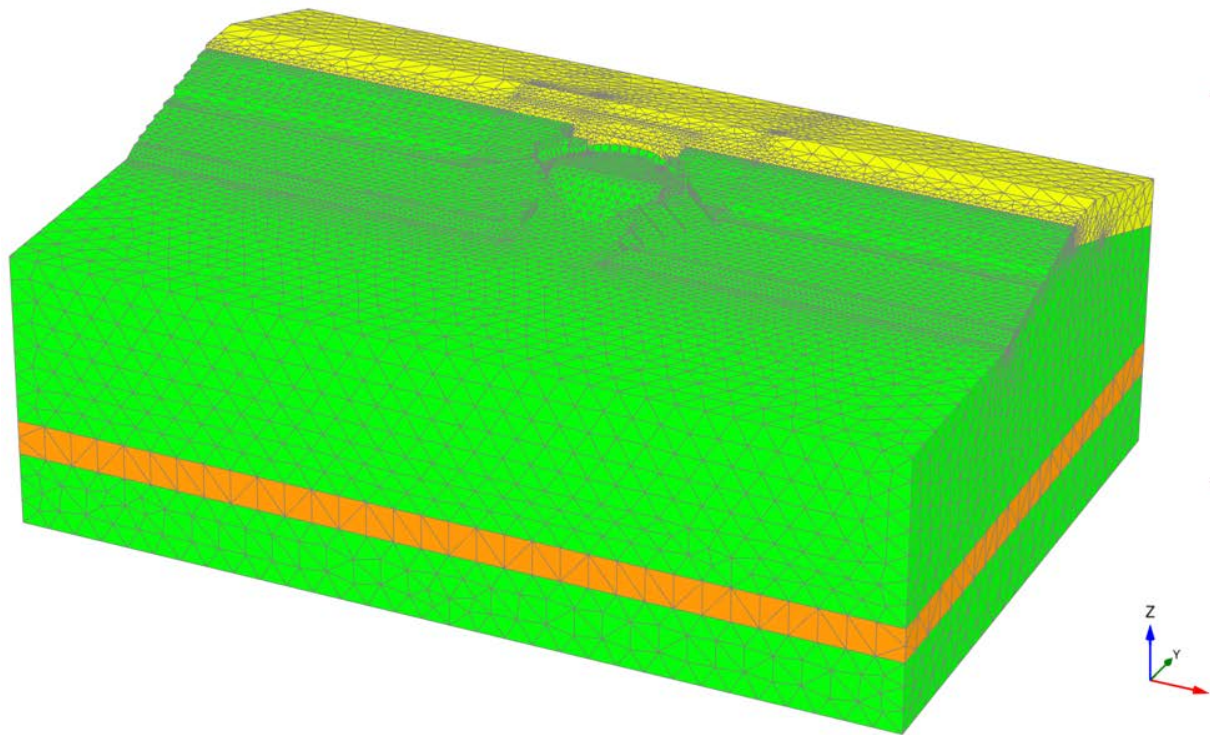
2.1 Opzet 3D Eindige Elementen Model

In onderstaande figuren is de opzet van het 3D model in Plaxis weergegeven.

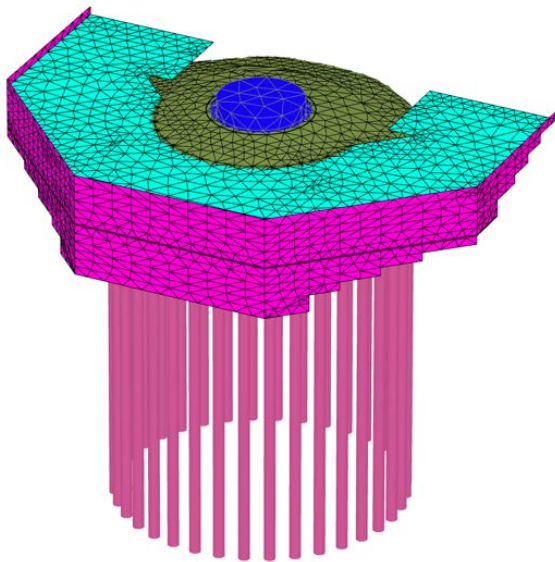


Figuur 2-1: Plaxis 3D model eindsituatie voor HZ10

¹ Eerste deel eis M1.2.4 "Bezwijkbelasting fundering" is als volgt: *De bezwijkbelasting van de fundering van de turbines, typen V117 en V162, op de Harde Zeewering dient ten minste 25% hoger te liggen dan de bezwijkbelasting van de mast inclusief de verbinding.*



Figuur 2-2: Plaxis 3D model voor HZ-10 met ontgraving zeewering



Figuur 2-3: Plaxis 3D model – detail fundering en grondwapening

2.2 Invoer materiaaleigenschappen

In de tabellen op de volgende bladzijden zijn de gehanteerde eigenschappen van de grond en constructiematerialen aangegeven.

Opgemerkt wordt dat de cohesie van het zand is verhoogd naar 3 kPa om zeer plaatselijk instabiliteit (ondiepe glijvlakken) te voorkomen en ervoor te zorgen dat het model kan worden doorgerekend.

VOLUME ELEMENTS PROPERTIES						
Identification		sand/medium/dense	sand/coarse/dense	geogrid fill	Clay_Peat	concrete
Identification number		1	3	4	5	2
Material model		Hardening soil	Hardening soil	Hardening soil	Hardening soil	Linear elastic
Drainage type		Drained	Drained	Drained	Undrained (A)	Non-porous
Colour		RGB 8, 247, 12	RGB 238, 250, 5	RGB 154, 11, 249	RGB 251, 150, 9	RGB 21, 6, 234
Comments						
γ_{unsat}	kN/m ³	18	18	19	20	24
γ_{sat}	kN/m ³	19	19	20	20	24
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
e_{min}		0	0	0	0	0
e_{max}		999	999	999	999	999
Rayleigh α		0	0	0	0	0
Rayleigh β		0	0	0	0	0
E_{50}^{ref}	kN/m ²	4.50E+04	4.50E+04	4.50E+04	8000	3.00E+07
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	4.50E+04	4.50E+04	4.50E+04	8000	0.2
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	1.35E+05	1.35E+05	1.35E+05	2.40E+04	1.25E+07
power (m)		0.5	0.5	0.5	1,000	3.33E+07
Use alternatives		No	No	No	No	2260
C_c		7.67E+00	7.67E+00	7.67E+00	0.04312	3691
C_s		2.30E+00	2.30E+00	2.30E+00	0.01294	Yes
e_{init}		0.5	0.5	0.5	0.5	0
c_{ref}	kN/m ²	3	3	3	13	0
ϕ (phi)	°	33	40	35	22.5	Manual
ψ (psi)	°	3,000	10	5,000	0	0.8
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
v_{ur}		0.2	0.2	0.2	0.2	0
p_{ref}	kN/m ²	100	100	100	100	Impermeable
K_{0}^{nc}		0.4554	0.3572	0.4264	0.6173	0
c_{inc}	kN/m ² /m	0	0	0	0	0
z_{ref}	m	0	0	0	0	Automatic
R_f		0.9	0.9	0.9	0.9	Yes
Tension cut-off		Yes	Yes	Yes	Yes	0.5
Tensile strength	kN/m ²	0	0	0	0	0.5
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	1,000
Skempton-B		0.9866	0.9866	0.9866	0.9866	0
v_u		0.495	0.495	0.495	0.495	0
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	5.53E+09	5.53E+09	5.53E+09	9.83E+05	0
Strength		Manual	Manual	Manual	Manual	0
R_{inter}		0.8	0.8	0.8	0.8	0.5
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	1.00E+15
δ_{inter}		0	0	0	0	
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	
Drainage conductivity_1, dk	m ³ /day/m	0	0	0	0	
Drainage conductivity_2, dk	m ³ /day/m	0	0	0	0	
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	
$K_{0,x} = K_{0,y}$		Yes	Yes	Yes	Yes	
$K_{0,x}$		0.4554	0.3572	0.4264	0.6173	
$K_{0,y}$		0.4554	0.3572	0.4264	0.6173	
OCR		1,000	1,000	1,000	1,000	
POP	kN/m ²	0	0	0	0	
k_x	m/day	0	0	0	0	
k_y	m/day	0	0	0	0	
k_z	m/day	0	0	0	0	
e_{init}		0.5	0.5	0.5	0.5	
S_s	1/m	0	0	0	0	
c_k		1.00E+15	1.00E+15	1.00E+15	1.00E+15	

GEOGRIDS				
Identification		F110T and F55T	F150T	F200T
Identification number		1	2	3
Comments				
Colour		RGB 0, 255, 225	RGB 250, 0, 208	RGB 255, 255, 0
Material type		Elastic	Elastic	Elastic
Isotropic		Yes	Yes	Yes
EA_1	kN/m	450	443	591
EA_2	kN/m	450	443	591
GA	kN/m	225	221.5	295.5
Identification number		1	2	3
Identification number		1	2	3

Identification		pile
Identification number		1
Comments		
Colour		RGB 199, 82, 143
Material type		Elastic
E	kN/m ²	3.40E+07
γ	kN/m ³	6,000
Beam type		Predefined
Predefined beam type		Massive circular beam
Diameter	m	0.54
A	m ²	0.229
I_2	m ⁴	4.17E+00
I_3	m ⁴	4.17E+00
Rayleigh α		0
Rayleigh β		0
Axial skin resistance		Linear
T_skin, start, max	kN/m	100
T_skin, end, max	kN/m	200
F_max	kN	3000
Identification number		1

2.3 Rekenfasen en belastinggevallen

Fasering

In het model zijn de volgende fasen onderscheiden:

- Initiële fase met ontgraving t.b.v. de aanleg
- Fase 1 t/m 6: opbouw van de grondterp met lagen 1 t/m 6 (tot onderzijde fundering)
- Fase 7: aanbrengen paalfundering en betonnen plaat;
- Fase 8 t/m 13: aanbrengen geogrid lagen 7 t/m 12
- Fase 14: aanbrengen belasting op het fundament

Belastinggevallen

Beschouwd zijn de operationele en extreme belastingen voor de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) en de uiterste grenstoestand (UGT). Voor de UGT is gerekend met een hoge en lage waarde van de partiële belastingfactor van respectievelijk 1,21 en 0,90 overeenkomstig het ontwerp.

De belasting op het fundament is voor twee richtingen beschouwd:

- Negatief: horizontale belasting en moment van de zeevering af
- Positief: horizontale belasting en moment richting de zeevering.

Onder extreme omstandigheden is gerekend met een grondwaterstand van NAP +5,5 m, gelijk aan het maaiveld bij de binnenteen.

3 Resultaten

Paalbelastingen

In onderstaande tabel is een overzicht geven van de berekende paalbelastingen. De belastingen zijn vergeleken met de gehanteerde waarden op basis van een eenvoudige 2D analytisch rekenmodel.

				F_{druk;3D}	<i>F_{druk;2D}</i>	F_{trek;3D}	<i>F_{trek;2D}</i>
Belasting		PSF DL	Richting	[kN/paal]	<i>[kN/paal]</i>	[kN/paal]	<i>[kN/paal]</i>
Operationeel	BGT	1,00	Negatief	1564	<i>1705</i>	-51	<i>247</i>
Operationeel	BGT	1,00	Positief	1447	<i>1705</i>	-89	<i>247</i>
Extreem	BGT	1,00	Negatief	1944	<i>2184</i>	-256	<i>-132</i>
Extreem	BGT	1,00	Positief	1854	<i>2184</i>	-49	<i>-132</i>
Extreem	UGT max	1,21	Negatief	2193	<i>2642</i>	-463	<i>-477</i>
Extreem	UGT max	1,21	Positief	2107	<i>2642</i>	-217	<i>-477</i>
Extreem	UGT min	0,90	Negatief	2116	<i>2642</i>	-537	<i>-477</i>
Extreem	UGT min	0,90	Positief	2039	<i>2642</i>	-300	<i>-477</i>

Uit de berekeningen blijkt:

- De berekende drukbelasting is lager dan aangenomen in het ontwerp.
- Maatgevende trekbelasting is iets hoger dan aangenomen in het ontwerp, maar kan ruimschoots worden opgenomen ($R_{t;d} > 848$ kN).

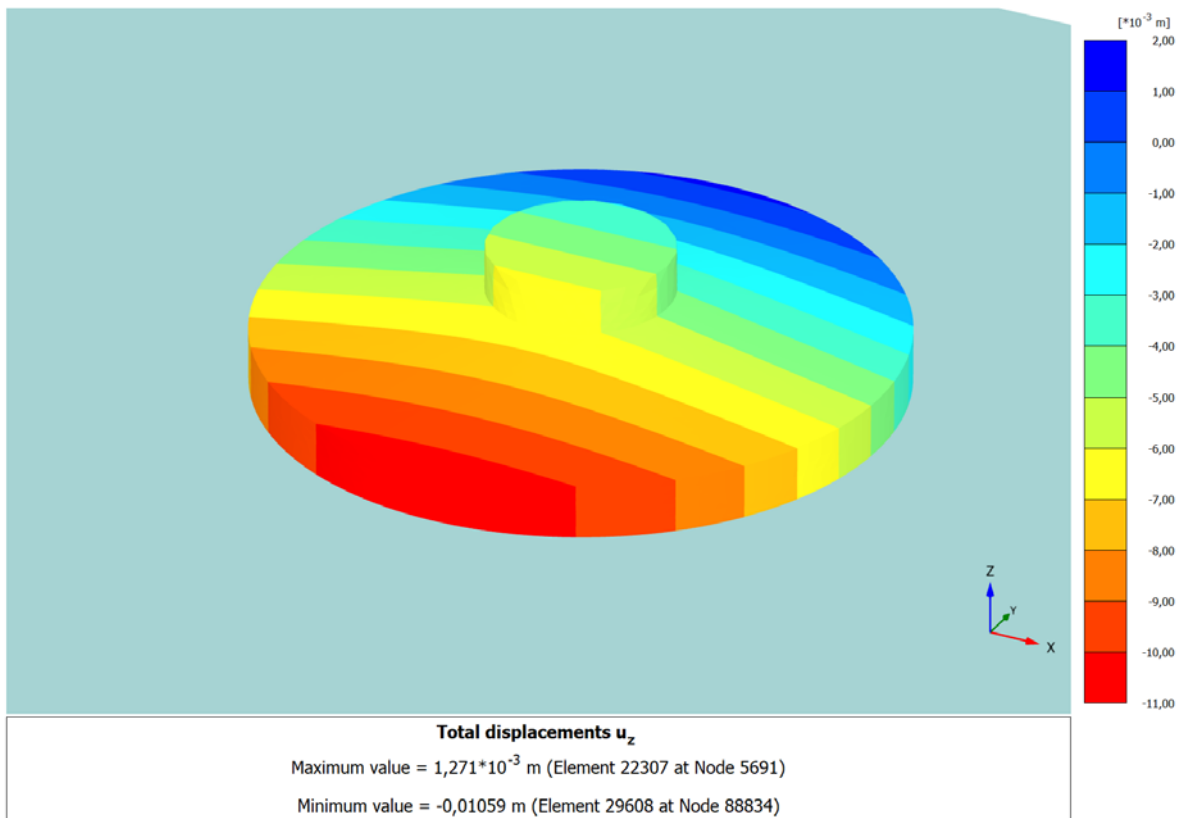
Vervormingen

De berekende vervormingen (BGT) zijn in onderstaande tabel aangegeven.

				U_{hor;3D}	<i>U_{hor;2D}</i>	U_{vert;3D}	<i>U_{vert;2D}</i>
Belasting		PSF DL	Richting	[mm]	<i>[mm]</i>	[mm]	<i>[mm]</i>
Operationeel	BGT	1,00	Negatief	4,5	<i>4,5</i>	7,0	<i>13-21</i>
Operationeel	BGT	1,00	Positief	1,7	-	5,2	<i>13-21</i>
Extreem	BGT	1,00	Negatief	7,7	-	10,6	<i>14-23</i>
Extreem	BGT	1,00	Positief	3,2	-	7,7	<i>14-23</i>

Uit de berekeningen blijkt:

- Dat de horizontale vervorming komt overeen met de 2D berekening (4,5 mm)
- De verticale paalkopzakking is ruim lager dan op basis van de 2D berekeningen.



Figuur 3-1: Verticale vervorming funderingsblok (Extreem UGT negatief)

Algehele stabiliteit

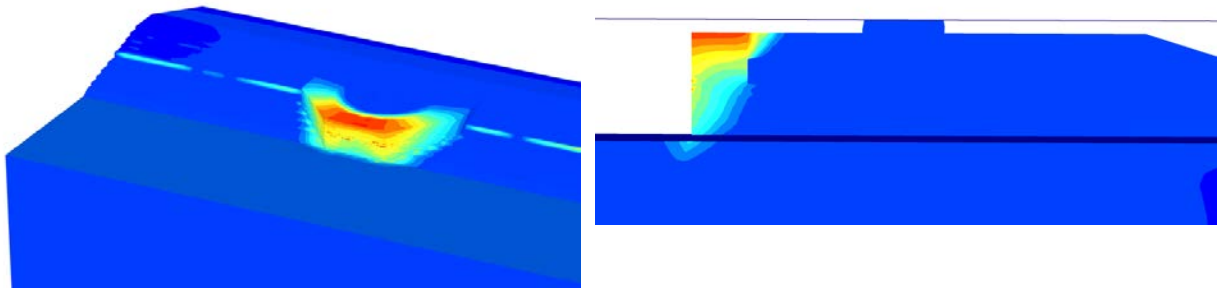
De veiligheid tegen afschuiven is bepaald voor de UGT op basis van rekenwaarden voor de belastingen en karakteristieke waarden voor de grondparameters. Aangezien de ondergrond en aanvulling uit zand bestaan dient de veiligheid tegen afschuiven groter te zijn dan 1,24 (op basis van materiaalfactor 1,30 voor $\tan\phi'$ behorend bij klasse RC3).

De berekende veiligheidsfactor tegen afschuiven is:

- $\geq 1,55$ voor de belasting van de zeewering af;
- $\geq 1,42$ voor de belasting in de richting van de zeewering.

De berekende veiligheidsfactoren zijn ruim hoger² dan de vereiste waarde van 1,24. Een potentieel afschuifvlak beperkt zich tot de gewapende grond, zoals blijkt uit onderstaande figuur.

² De berekening is afgebroken na 40 rekenstappen, maar vertoont een doorgaande toename van de veiligheidsfactor.



Figuur 3-2: maatgevend afschuifvlak

4 Conclusie

In Plaxis 3D is een eindige elementen berekening uitgevoerd, waarbij de interactie tussen de fundering, de gewapende grondconstructie en de zeewering is beschouwd. Uit de berekening volgt dat het voorlopig ontwerp voldoende veilig is:

- De algehele stabiliteit bij maatgevende extreme belastingen in de UGT voldoet aan de veiligheidsfactor behorend bij klasse RC3. Hiermee wordt voldaan aan de eis dat de fundering 25% sterker dient te zijn de mast, die ontworpen wordt op basis van RC1.
- Daarnaast is aangetoond dat de vervormingen (en daaraan gekoppelde stijfheden) in de BGT op basis van 2D analyses gelijkwaardig of conservatiever zijn dan op basis van de 3D analyse. Het voorlopig ontwerp op basis van 2D analysis is dus robuust.