

Bijlagenboek 9.12

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I

Projectomschrijving	Versterking Markermeerdijken		
Documentnummer	AMMD-005498		
Bedrijfsonderdeel	Markt- en Productontwikkeling		
Werkpakket	WP-00123 - Bewezen sterkte-methodiek		
Status	Definitief		
Revisie	1.0	Revisiedatum	10-7-2018

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I



Pagina

2 van 32

Revisiedatum

10-7-2018

Documentnummer

AMMD-005498

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I


 hoogheemraadschap
**Hollands
 Noorderkwartier**
ALLIANTIE MARKERMEERDIJKEN

Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
3 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

Autorisatiekader

Opsteller		Controleur	^{DS} Bl	Vrijgever	^{DS} EN
A.W. van der Meer		Ben Castricum		Erica Nijpels	
J. Noordermeer					
A. Weijenburg	^{DS} Bl				
Ben Castricum					

Documenthistorie

Versienummer	Versiedatum	Omschrijving
0.1	21/08/2017	Eerste opzet rapportage
0.2	04/09/2017	Samenvoeging deelrapportages
0.3	08/09/2017	Commentaren/aanvullingen verwerkt
0.4	03/05/2018	Beperkte tekstuele wijzigingen en verduidelijkingen na opmerkingen rapportage Deltares op overleg 24/11/2017. Titel gewijzigd in 'Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I'
1.0	10/07/2018	Definitieve versie

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
1.1	Algemeen	6
1.2	Locaties	6
1.3	Referenties	6
1.4	Leeswijzer	7
2	Basisgegevens	8
2.1	Norm	8
3	Schematiseren	9
3.1	Beschouwde situaties	9
3.2	Algemene kenmerken	9
3.2.1	Geometrie	9
3.2.2	Ondergrondschematisatie	9
3.2.3	Geotechnische parameters	9
3.2.4	Buitenwaterstand	11
3.3	Situatie tijdens beoordeling 2071	12
3.3.1	Waterspanningen	12
3.3.2	Kans op infiltratie door golfoverslag	13
3.3.3	Verkeersbelasting	14
4	Methodiek	15
5	Analyses locatie Grote Braak HE-11A	17
5.1	Semi-probabilistische analyses	17
5.1.1	Gevoeligheidsanalyses	17
5.1.2	Maatgevende glijcirkels	18
5.2	Probabilistische stabiliteitsanalyses	19
5.2.1	Fragility curves	19
5.2.2	Totale faalkans binnenwaartse macrostabiliteit	20
5.3	Bewezen sterkte	22
6	Analyses locatie Katwoude EA-4B	23

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I



Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
5 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

6.1	Semi-probabilistische analyses	23
6.1.1	Gevoeligheidsanalyses	23
6.1.2	Maatgevende glijcirkels	23
6.2	Probabilistische stabiliteitsanalyses	24
6.2.1	Fragility curve	24
6.2.2	Totale faalkans binnenwaartse macrostabiliteit	25
6.3	Bewezen sterkte	27
7	Conclusies en aanbevelingen	28
7.1	Conclusies	28
7.2	Aanbevelingen	28
8	Reflectie aanbevelingen RUPP oefensessies december 2016	31

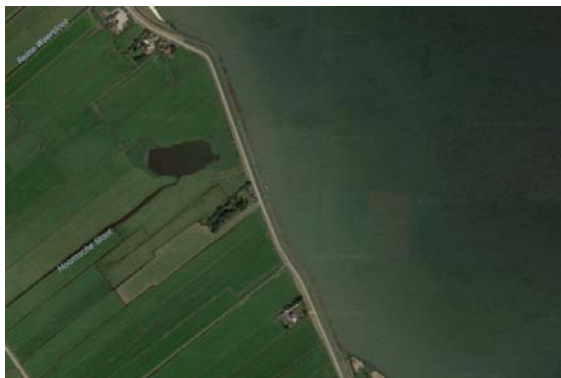
1 Inleiding

1.1 Algemeen

In deze rapportage wordt ingegaan op de beoordeling van het faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI) middels een probabilistische analyse en bewezen sterkte.

1.2 Locaties

Voor het uitvoeren van de probabilistische- en bewezen sterkte analyses zijn de locaties geselecteerd die voldoen aan het uitgangspunt dat op basis van de huidige geometrie voor de gehele ontwerpperiode alleen het oordeel op STBI onvoldoende is zoals bepaald middels de 0-variant analyse in het VO van het project Versterking Markermeerdijken. Met dit uitgangspunt kon slechts 1 locatie (Katwoude, figuur 2) worden geselecteerd. Daarom is er in aanvulling daarop nog een locatie (Grote Braak, figuur 1) geselecteerd, waarvoor er slechts een beperkt tekort m.b.t. het HBN (hoogte) is van 0,1 m op het laagste punt. Bovengenoemd uitgangspunt zorgt ervoor dat, als de analyses aantonen dat mogelijk tot goedkeuren kan worden gekomen, dat de veiligheid dan voor de gehele ontwerpperiode verzekerd is voor alle faalmechanismen en dat hiermee de locaties niet omvangrijk versterkt hoeven te worden.



Figuur 1 Luchtfoto locatie Grote Braak (HE-11A)



Figuur 2 Luchtfoto locatie Katwoude (EA-4B)

1.3 Referenties

1. Alliantie Markermeerdijken (2017). Ontwerpbasis Hydraulische Randvoorwaarden DO2. Kenmerk AMMD-003182.
2. Alliantie Markermeerdijken (2016). Ontwerpbasis Dijken VO. Kenmerk AMMD-000637.
3. Alliantie Markermeerdijken. (2016). Geotechnische Ontwerpbasis VO. Kenmerk AMMD-001268.
4. Alliantie Markermeerdijken (2017). Ontwerpnota VO Grote Braak. Kenmerk AMMD-002646.
5. Alliantie Markermeerdijken (2017). Ontwerpnota VO Katwoude. Kenmerk AMMD-002658.
6. Deltares (2017). Handreiking Faalkansanalyses Macrostablieit - CONCEPT. Kenmerk 11200575-016-GEO-0004

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I



Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
7 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 behandelt de basisgegevens, waaronder de (faalkans-)eis waaraan de doorsneden moeten voldoen. Hoofdstuk 3 gaat in op de schematisatie van de ondergrond en de waterstanden, voor de situatie van 2071. In hoofdstuk 4 wordt de analysemethodiek kort besproken. In hoofdstukken 5 en 6 worden de resultaten van de semi-probabilistische en probabilistische stabiliteitsberekeningen gepresenteerd voor twee locaties. Hoofdstuk 7 gaat in op de belangrijkste conclusies en aanbevelingen. Tenslotte wordt in hoofdstuk 8 een korte reflectie gegeven met betrekking tot de aanbevelingen uit de RUPP oefensessies van december 2016.

2 Basisgegevens

2.1 Norm

De norm waaraan de dijkvakken moeten voldoen is opgenomen in tabel 1. De faalkanseis op doorsnedeniveau wordt afgeleid van de faalkans op trajectniveau door:

- 1) Het toepassen van de specifieke faalkansruimte ω voor STBI (default waarde OI is 0,04, voor Markermeerdijken wordt 0,24 aangehouden).
- 2) Het verdisconteren van lengte-effect factor N ($N=1+aL/b$). Default-waarden ($a=0,033$; $b=50$ m) uit het OI2014v4 zijn gebruikt om deze factor te bepalen.

Daarnaast is de benodigde semi-probabilistische veiligheidsfactor γ_n bepaald uit de betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau aan de hand van de relatie die is afgeleid uit de kalibratie STBI 2016. De benodigde stabiliteitsfactor is tevens opgenomen in tabel 1.

Tabel 1 Bepaling normstelling

	Zeevang (HE-11A)		Katwoude (EA-4B)	
Traject [-]	13-8		13-9	
P_{norm} (1/jaar)	1/1000		1/1000	
Trajectlengte [m]	11.600		28.800	
ω [-]	0,24	0,04	0,24	0,04
$P_{eis,dsn}$ (1/jaar)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
$\beta_{eis, dsn}$ [β/jaar]	4,0	4,4	4,2	4,6
$\gamma_{n,eis}$	1,01	1,07	1,04	1,1

3 Schematiseren

3.1 Beschouwde situaties

De volgende situaties zijn beschouwd:

1. Situatie tijdens de beoordeling in 2071 zonder significante golfoverslag;
2. Situatie tijdens de beoordeling in 2071 met significante golfoverslag.

Mocht uit de probabilistische berekeningen volgen dat de stap met bewezen sterkte noodzakelijk is voor het mogelijk goedkeuren van de doorsnede, dan wordt de situatie tijdens hoogwater in 1998 beschouwd (observatie).

Voor elke situatie zijn drie waterstanden beschouwd:

1. NAP-0,4 meter (dagelijkse waterstand);
2. NAP+1,0 meter (peil bij norm);
3. NAP+1,7 meter (zeer extreme waterstand).

3.2 Algemene kenmerken

3.2.1 Geometrie

De geometrie is overgenomen van de geometrie als gebruikt voor het VO door de Alliantie Markermeerdijken [ref. 2]. Deze is niet gecorrigeerd voor de verwachte bodemdaling tussen nu en 2071. Deze is gebaseerd op inmetingen uit de periode 2010-2015 en wordt als een deterministische variabele beschouwd.

3.2.2 Ondergrondschematisatie

De ondergrondschematisatie is overgenomen van de ondergrondschematisatie als gebruikt voor het ontwerp door de Alliantie Markermeerdijken. De ondergrondschematisatie is als een deterministische variabele opgenomen. Gegeven de dichtheid van het grondonderzoek is er geen gebruik gemaakt van scenario's, maar is de maatgevende doorsnede beschouwd. De maatgevende doorsnede is bepaald middels een methodiek die zowel de geometrie van het bestaande dijklichaam als de sterkte vanuit de sonderingen meeneemt van alle raaien binnen een rekensectie. Hierdoor is het vergelijken van secties overzichtelijk gemaakt waardoor gefundeerd de maatgevende locatie wordt vastgesteld.

3.2.3 Geotechnische parameters

De geotechnische parameters worden als stochastische variabelen gemodelleerd met een kansverdeling, gemiddelde en standaardafwijking of variatiecoëfficiënt.

Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S

De gemiddelde waarde van de S is herleid uit [ref. 2]. De normale verdeling is gehanteerd vanuit het oogpunt van consistentie met eerder gemaakte probabilistische berekeningen voor project Markermeerdijken.

Tabel 2 Parameters kansverdeling modelparameter S

Materiaal	Verdeling	μ [kPa]	σ [kPa]
Veen	NORM	0,470	0,03
Klei Antropogeen	NORM	0,303	0,05
Klei Duinkerke	NORM	0,333	0,05
Klei Calais	NORM	0,303	0,05

Sterkte toename exponent m

De gemiddelde waarde van de m is herleid uit [ref. 2]. De normale verdeling is gehanteerd vanuit het oogpunt van consistentie met eerder gemaakte probabilistische berekeningen voor project Markermeerdijken.

Tabel 3 Parameters kansverdeling modelparameter m

Materiaal	Verdeling	μ [kPa]	σ [kPa]
Veen	NORM	0,9	0,03
Overig	NORM	0,883	0,05

Grensspanning σ_{vy}

De verdeling van de grensspanning is verkregen op basis van de karakteristieke waarde, variatie coëfficiënt en dagelijkse effectieve spanning die zijn berekend in de VO fase van het versterkingsproject op basis van de Dijken op Veen methode. De gemiddelde waarde is dus teruggerekend. De dagelijkse effectieve spanning is de shift aangezien de grensspanning nooit lager kan zijn dan de dagelijkse effectieve spanning. De verdeling is zodoende een lognormale verdeling omdat deze verdeling het niet mogen overschrijden van een ondergrens het best benadert. De ondergrens is in dit geval de dagelijkse effectieve spanning.

Tabel 4 Parameters kansverdelingen grensspanningen Grote Braak Zeevang (HE-11A)

X-coördinaat	Y-coördinaat	Verdeling	Shift [kPa]	μ [kPa]	v.c. [-]
-101	2,02	LOGN	16,54	53,05	0,235
-101	-0,15	LOGN	37,16	151,22	0,238
-101	-2,25	LOGN	45,72	121,67	0,235
-101	-4,50	LOGN	55,48	105,51	0,237
-101	-7,50	LOGN	80,11	116,98	0,233
-89	-2,37	LOGN	17,13	44,99	0,241
-89	-3,75	LOGN	20,95	63,25	0,239
-89	-5,10	LOGN	26,43	60,43	0,242
-89	-7,55	LOGN	42,37	70,56	0,233
-64	-2,39	LOGN	3,10	26,91	0,271
-64	-3,20	LOGN	6,00	35,54	0,271
-64	-4,30	LOGN	8,53	90,06	0,264
-64	-7,05	LOGN	19,24	73,93	0,257

Tabel 5 Parameters kansverdelingen grensspanningen Katwoude (EA-4B)

X-coördinaat	Y-coördinaat	Verdeling	Shift [kPa]	μ [kPa]	v.c. [-]
-100,5	1,9	LOGN	13,29	48,76	0,237
-100,5	-1,0	LOGN	43,42	119,00	0,233
-100,5	-4,8	LOGN	75,27	155,66	0,233
-100,5	-8,5	LOGN	108,32	274,09	0,244
-86	-2,0	LOGN	14,40	50,68	0,242
-86	-4,3	LOGN	33,59	99,76	0,233
-86	-8,1	LOGN	68,79	171,29	0,246
-67	1,3	LOGN	3,09	24,15	0,279
-67	-2,8	LOGN	7,86	22,12	0,259
-67	-5,1	LOGN	16,48	40,44	0,260
-67	-8,5	LOGN	46,56	486,95	0,268

De grensspanning van de onderste cohesieve laag in het achterland is opvallend hoog (487 kPa). Deze waarde volgt uit de DoV-rekenmethode en lijkt het resultaat van een afwijkende keuze van de laagscheiding ten opzichte van de sondeerweerstand. Vanwege de relatief ondiepe ligging van de glijcirkel heeft deze waarde echter geen invloed op het resultaat.

3.2.4 Buitenwaterstand

De buitenwaterstand is berekend met Hydra-NL conform de uitgangspunten van het ontwerp van de Markermeerdijken als omschreven in de Ontwerpbasis Hydraulische Randvoorwaarden [ref. 1]. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 6.

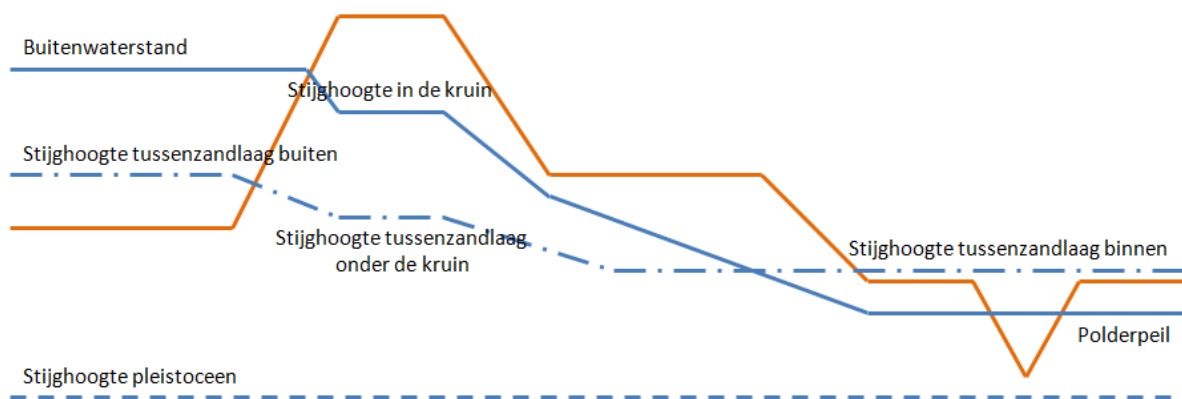
Tabel 6 Waterstand in [m] t.o.v. NAP

Terugkeertijd [jaar]	Grote Braak	Katwoude
0	-0,330	-0,330
10	0,283	0,327
30	0,388	0,431
100	0,501	0,541
300	0,610	0,647
1.000	0,738	0,774
3.000	0,868	0,901
10.000	1,025	1,054
30.000	1,186	1,212
100.000	1,378	1,400

3.3 Situatie tijdens beoordeling 2011

3.3.1 Waterspanningen

De freatische lijn is geschematiseerd conform de uitgangspunten [ref. 2] voor de dagelijkse situatie (NAP-0,4 m) en de situatie maatgevend hoogwater (NAP+1,0 m). De waterspanningen voor de extremere hoogwaterstand zijn lineair geëxtrapoleerd. De gehanteerde waterspanningen zijn gegeven in tabellen 7 t/m 10. De waterspanningen worden als een deterministische variabele aangehouden in de probabilistische berekeningen.



Figuur 3 Kenmerkende punten schematisatie waterspanningen

Tabel 7 Waterspanningen Grote Braak (HE-11A) voor de situatie zonder infiltratie door golfoverslag in [m] t.o.v. NAP

Buitenwaterstand	-0,4	1,01	1,7
Stijghoogte in de kruin	1,25	1,40	1,48
Polderpeil	-2,31	-2,31	-2,31
Stijghoogte tussenzandlaag buiten	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stijghoogte tussenzandlaag onder de kruin	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stijghoogte tussenzandlaag binnen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stijghoogte pleistoceen	-2,25	-1,65	-1,35

Tabel 8 Waterspanningen Katwoude (EA-4B) voor de situatie zonder infiltratie door golfoverslag in [m] t.o.v. NAP

Buitenwaterstand	-0,4	1,0	1,7
Stijghoogte in de kruin	0,3	0,8	1,05
Polderpeil	-1,45	-1,45	-1,45
Stijghoogte tussenzandlaag buiten	-1,99	-0,87	-0,31
Stijghoogte tussenzandlaag onder de kruin	-1,99	-1,15	-0,73
Stijghoogte tussenzandlaag binnen	-1,99	-1,50	-1,25
Stijghoogte pleistoceen	-2,44	-1,84	-1,54

Tabel 9 Waterspanningen Grote Braak Zeevang (HE-11A) voor de situatie met infiltratie door golfoverslag in [m] t.o.v. NAP

Buitenwaterstand	-0,4	1,0	1,7
Stijghoogte in de kruin	3,35	3,35	3,35
Polderpeil	-2,31	-2,31	-2,31
Stijghoogte tussenzandlaag buiten	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stijghoogte tussenzandlaag onder de kruin	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stijghoogte tussenzandlaag binnen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stijghoogte pleistoceen	-2,25	-1,65	-1,35

Tabel 10 Waterspanningen Katwoude (EA-4B) voor de situatie met infiltratie door golfoverslag in [m] t.o.v. NAP

Buitenwaterstand	-0,4	1,0	1,7
Stijghoogte in de kruin	2,8	2,8	2,8
Polderpeil	-1,45	-1,45	-1,45
Stijghoogte tussenzandlaag buiten	-1,99	-0,87	-0,31
Stijghoogte tussenzandlaag onder de kruin	-1,99	-1,15	-0,73
Stijghoogte tussenzandlaag binnen	-1,99	-1,50	-1,25
Stijghoogte pleistoceen	-2,44	-1,84	-1,54

3.3.2 Kans op infiltratie door golfoverslag

In de analyse is aangenomen dat indien er minder dan 1 l/s/m golfoverslag plaatsvindt er sprake is van geen infiltratie en indien er meer dan 10 l/s/m golfoverslag plaatsvindt er sprake is van volledige infiltratie. De lokale waterstand van het illustratiepunt is aangenomen als waterstand vanaf waar de betreffende overslagsituatie plaatsvindt. De gebruikte uitgangspunten bij het berekenen van deze hydraulische randvoorwaarden zijn overgenomen uit de uitgangspunten van het ontwerp van de Markermeerdijken als omschreven in de Ontwerpbasis hydraulische randvoorwaarden [ref. 1]. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 11.

Tabel 11 Lokale waterstand bij illustratiepunt overslag in [m] t.o.v. NAP

	Grote Braak	Katwoude
Lokale waterstand illustratiepunt $q=1$ l/s/m	0,62	0,57
Lokale waterstand illustratiepunt $q=10$ l/s/m	1,39	0,93

Bij deze waterstanden dient te worden opgemerkt dat er geen onzekerheidsmarge in rekening is gebracht, aangezien er bij het afleiden van de waterstand in Hydra-NL al is gerekend met een onzekerheidsmarge.

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I



Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
14 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

3.3.3 Verkeersbelasting

Geen volledige verzadiging

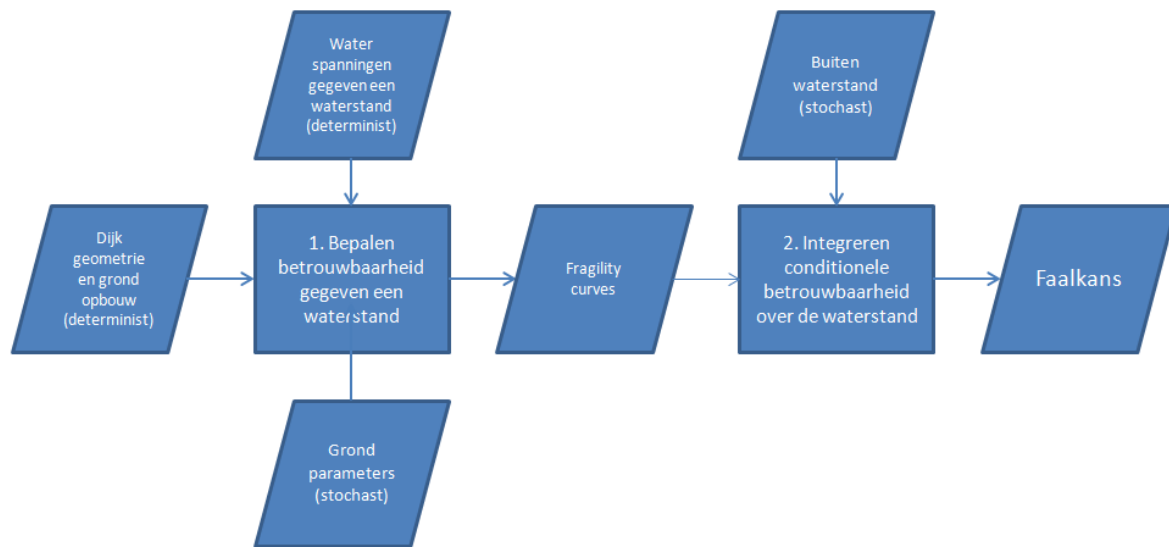
Voor de verkeersbelasting wordt een grootte van 5 kN/m^2 over 1,5 m breedte op het midden van de kruin als een tijdelijke belasting gehanteerd met een spreiding van 30° conform de uitgangspunten van het ontwerp [ref. 2]. Er is gerekend met een aanpassingspercentage van 20% voor de klei- en veenlagen en 100% voor de zandlagen.

Volledige verzadiging

Conform OI2014v4 dient gerekend te worden zonder verkeersbelasting, maar HHNK heeft aangegeven dat zij tijdens de maatgevende condities met een klein onderhoudsvoertuig over de kruin van de dijk moeten kunnen rijden waardoor met een verkeersbelasting gerekend wordt. Daarom wordt dezelfde verkeersbelasting gemodelleerd als voor de situatie waarbij geen volledige verzadiging is opgetreden.

4 Methodiek

De analyses worden uitgevoerd conform de Handreiking Faalkansanalyses Macrostablieit [ref. 3]. Het stroomschema voor deze analyse is schematisch weergegeven in figuur 4.



Figuur 4 Stroomschema faalkansanalyses (Bron: Handreiking Faalkansanalyses Macrostablieit)

Alvorens wordt gestart met het bepalen van de betrouwbaarheid (probabilistische analyse) wordt een semi-probabilistische gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De semi-probabilistische gevoeligheidsanalyses hebben een tweeledig doel, namelijk:

- 1) het identificeren van de gevoeligheid van de stabiliteitsfactor voor een aantal invoerparameters;
- 2) het identificeren van mogelijk maatgevende glijcirkels waarvoor een probabilistische analyse wordt uitgevoerd.

Aan de hand van de resultaten van de semi-probabilistische analyse wordt de maatgevende glijcirkel bepaald. Voor deze glijcirkel wordt een fragility curve opgesteld. Een fragility curve geeft de faalkans gegeven de waarde van een bepaalde belastingvariabele. In dit geval wordt de buitenwaterstand h als gegeven beschouwd, ofwel: $P_{f|h} = P(Z < 0|h)$. Bij het bepalen van de faalkans wordt in de grenstoestandsfunctie uitgegaan van een modelfactor met een gemiddelde van 0,995 en een standaardafwijking van 0,03.

Bij lagere waterstanden zal de hoeveelheid overslaand water als gevolg van golfaanval naar verwachting minimaal zijn. Bij hogere waterstanden zal de hoeveelheid overslaand water als gevolg van golfaanval significant toenemen. De infiltratie van een grote hoeveelheid overslaand water heeft een direct effect op de freatische lijn in de dijk, welke zal stijgen. Het meest conservatieve scenario is dat de dijk volledig is verzadigd door grote hoeveelheden overslaand water. Wanneer de waterstand verandert, verandert dus ook de kans op het scenario van volledige overslag. Hoe hoger de waterstand, des te meer raakt de dijk verzadigd. Het scenario van geen volledige verzadiging en wel volledige verzadiging van het dijklichaam lopen dus langzaam in elkaar over.

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I



Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
16 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

Daarom dient er een 'samengestelde' fragility curve te worden afgeleid om de totale faalkans te bepalen. Om dit mogelijk te maken worden er fragility curves bepaald voor twee situaties:

- 1) geen volledige verzadiging van het dijklichaam;
- 2) volledige verzadiging dijklichaam door golfoverslag.

Belangrijke vraag is bij welke waterstand er sprake is van 'weinig overslag' en bij welke waterstand sprake is van 'veel overslag' (met volledige verzadiging als gevolg van infiltratie tot gevolg). Hierbij is gekozen voor de illustratiepunten behorende bij overslagdebieten van respectievelijk 1 l/s/m en 10 l/s/m (tabel 11). Dit betekent dat voor waterstanden lager dan het illustratiepunt van 1 l/s/m er wordt uitgegaan van geen verzadiging door overslag, terwijl voor waterstanden hoger dan het illustratiepunt van 10 l/s/m wel wordt uitgegaan van volledige verzadiging door overslag. Tussen deze illustratiepunten wordt lineair geïnterpoleerd.

De totale faalkans wordt bepaald door de samengestelde fragility curve. De totale faalkans voor macro-instabiliteit wordt tenslotte vergeleken met de faalkanseis (tabel 1).

Een uitgebreide beschrijving van de methodiek is opgenomen in [ref. 3].

5 Analyses locatie Grote Braak HE-11A

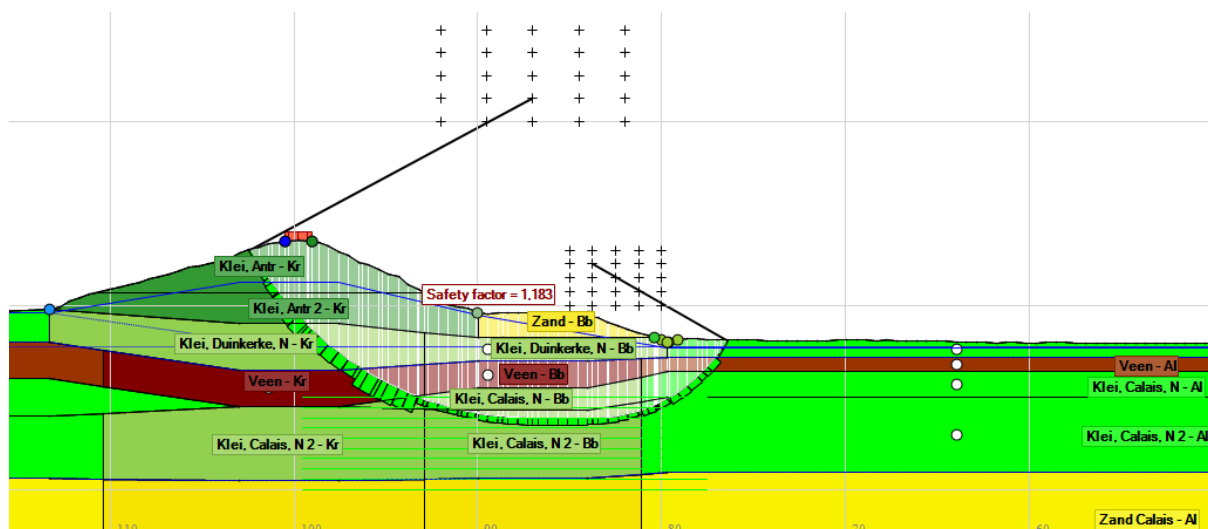
5.1 Semi-probabilistische analyses

5.1.1 Gevoeligheidsanalyses

De gevoeligheid van de stabiliteitsfactor voor de grondparameters, waterstand en verkeersbelasting is verkend. De resultaten (zowel excl. als incl. correctie met modelfactor) zijn weergegeven in tabel 12. De maatgevende glijcirkel voor variant 1 is weergegeven in figuur 5. Ook is er nog een aanvullende berekening gemaakt voor een volledig verzadigde situatie (aangenomen dat deze optreedt bij 10 l/s/m). Bij deze berekening is de kruin volledig verzadigd aangenomen en zijn de stijghoogtes gelijk aan de situatie waarbij geen volledige verzadiging optreedt.

Tabel 12 Resultaten semi-probabilistische berekeningen locatie Grote Braak

Variant	Waterstand	Grondparameters	Verkeersbelasting [kPa]	S.F. (excl. modelfactor)	S.F. (incl. modelfactor)
Basis	Peil bij norm	Karakteristieke waarden	5	1,17	1,10
1	Peil bij norm	Gemiddelde waarden	5	2,23	2,10
2	Peil bij norm	Karakteristieke waarden	0	1,19	1,12
3	Dagelijks	Karakteristieke waarden	5	1,18	1,11
4	Peil bij norm met volledige verzadiging	Karakteristieke waarden	5	1,15	1,08



Figuur 5 Maatgevende glijcirkel semi-probabilistische analyse, variant 1

Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
18 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

De vereiste veiligheidsfactor is 1,07. Voor de varianten 'basis' en '4' worden stabiliteitsfactoren berekend die ongeveer gelijk zijn aan de vereiste stabiliteitsfactor. Dit laat zien dat er een kans is dat dit dijktraject op basis van een semi-probabilistische analyse kan worden goedgekeurd. Omdat in deze analyse nog geen rekening gehouden is met schematiseringsonzekerheden kan dit oordeel niet worden gesteld.

De maatgevende glijcirkel verandert (vrijwel) niet voor alle uitgevoerde gevoeligheidsanalyses. De belangrijke conclusies die kunnen worden afgeleid van de resultaten uit tabel 1 zijn:

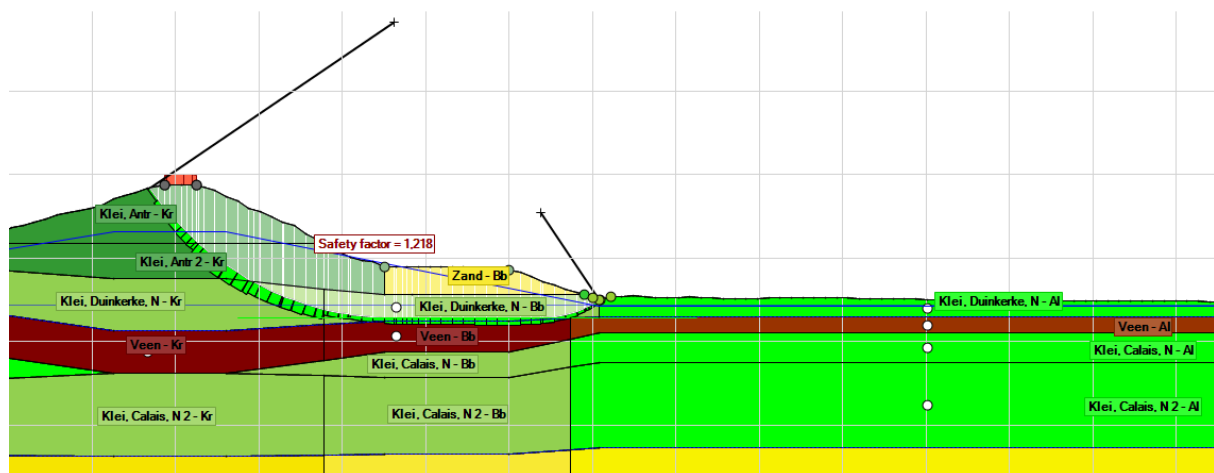
- de invloed van de waterstand en de verkeersbelasting is zeer beperkt;
- de invloed van de grondparameters op de stabiliteitsfactor is zeer groot;
- het effect van verzadiging van het dijklichaam door overslag is zeer beperkt.

5.1.2 Maatgevende glijcirkels

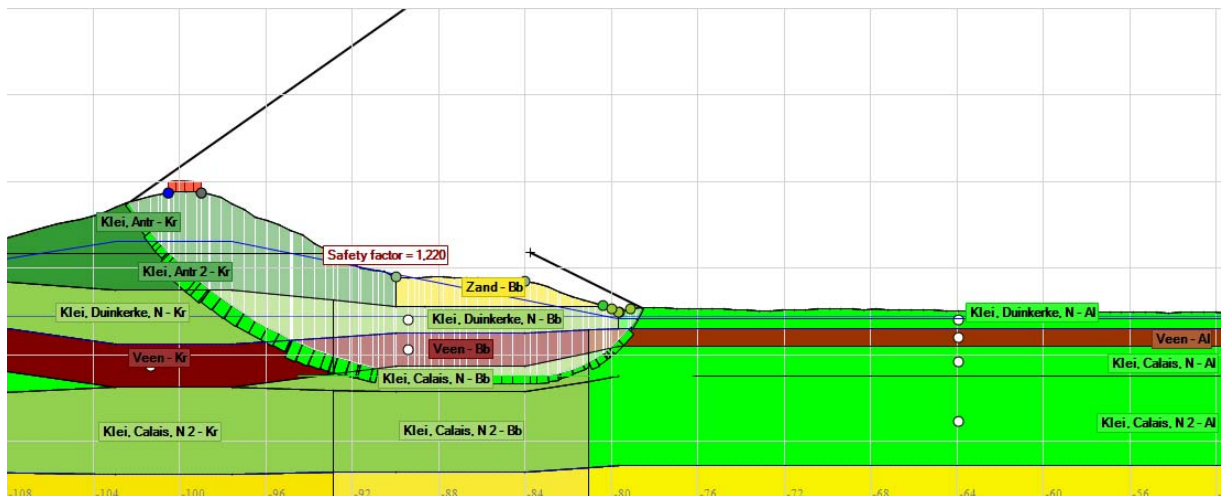
Wanneer uit een semi-probabilistische analyse volgt dat er een aantal glijcirkels zijn die een vergelijkbare stabiliteitsfactor hebben, kan niet op voorhand worden gesteld welke maatgevend zal zijn in een probabilistische analyse. Voor alle glijcirkels met een vergelijkbare semi-probabilistische stabiliteitsfactor zal dan een probabilistische analyse moeten worden uitgevoerd om te kunnen bepalen welke glijcirkel in een probabilistische analyse maatgevend is. De grootste faalkans wordt naar verwachting gevonden voor de glijcirkel door het minst aantal lagen, want voor deze situatie is de kans op ongunstige grondparameters voor alle lagen waardoor glijcirkel gaat het grootst.

Om deze mogelijk maatgevende glijcirkels te bepalen is de glijcirkel door de verschillende (klei)lagen 'gedwongen' door de 'tangent lines' van het grid alleen door de betreffende laag laten lopen. De veenlaag is niet beschouwd, omdat deze veel gunstiger grondparameters heeft dan klei en dus niet maatgevend zal zijn. De stabiliteitsfactoren die zijn gevonden in deze analyse zijn gegeven in figuur 6 t/m figuur 8.

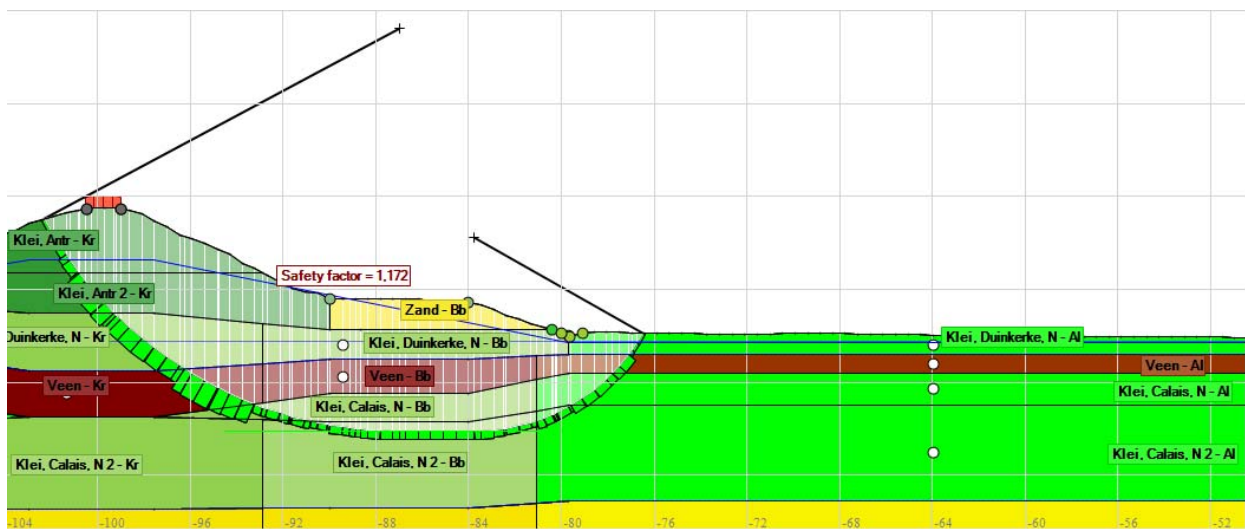
Conclusie is dat er drie mogelijke glijcirkels zijn waarvan de veiligheidsfactor in een semi-probabilistische analyse dicht bij elkaar ligt. Om te bepalen welke maatgevend is in een probabilistische analyse, wordt voor alle drie de glijcirkels een probabilistische berekening gemaakt.



Figuur 6 Stabiliteitsfactor glijcirkel 1 (maximale diepte in Klei, Duinkerke), karakteristieke waarden



Figuur 7 Stabiliteitsfactor glijcirkel 2 (maximale diepte in klei, Calais, N), karakteristieke waarden



Figuur 8 Stabiliteitsfactor glijcirkel 3 (maximale diepte in klei, Calais, N 2), karakteristieke waarden

5.2 Probabilistische stabiliteitsanalyses

Voor de drie mogelijk maatgevende glijcirkels (figuur 6 t/m figuur 8) worden probabilistische analyses uitgevoerd, waarna wordt bepaald welke glijcirkel maatgevend is.

5.2.1 Fragility curves

Geen volledige verzadiging

De resultaten van de probabilistische stabiliteitsberekeningen zijn gegeven in tabel 13.

Tabel 13 Berekende fragility curves voor de drie glijcirkels

Waterstand [m] t.o.v. NAP	Glijcirkel 1 (figuur 6)	Glijcirkel 2 (figuur 7)	Glijcirkel 3 (figuur 8)
		β [-]	β [-]

Waterstand [m] t.o.v. NAP	Glijcirkel 1 (figuur 6)	Glijcirkel 2 (figuur 7)	Glijcirkel 3 (figuur 8)
	β [-]	β [-]	β [-]
-0,4	4,68	6,5	6,64
1,0	4,65	6,43	6,59
1,7	4,64	6,4	6,54

Uit de resultaten in tabel 13 blijkt dat glijcirkel 1 maatgevend is in de probabilistische analyse. De betrouwbaarheidsindex is significant lager dan die van de andere twee glijcirkels. Dit is opvallend, aangezien de semi-probabilistische stabiliteitsfactoren slechts beperkt verschillend waren. Verklaring hiervoor is het aantal grondlagen waardoor de glijcirkel gaat. Glijcirkel 1 gaat door twee grondlagen, glijcirkels 2 en 3 door vier grondlagen. De kans dat alle vier de grondlagen relatief lage sterkte-eigenschappen hebben is kleiner dan de kans dat twee grondlagen dat hebben. Dit is in de semi-probabilistische benadering niet meegenomen. Oftewel, door hoe meer grondlagen de glijcirkel gaat, hoe groter de optimalisatie van een probabilistische berekening is.

Wat daarnaast duidelijk wordt is dat de betrouwbaarheidsindex voor de maatgevende glijcirkel slechts zeer beperkt afhankelijk is van de waterstand; de fragility curve loopt heel vlak (zie ook figuur 5). Dit bevestigt het resultaat van de semi-probabilistische gevoeligheidsanalyses.

Interpretatie en controle resultaten

Bij de berekening van de fragility curve wordt voor elke waterstand de invloedsfactoren (α^2) per stochast bepaald. De invloedsfactor per stochast geeft aan hoeveel % van de totale onzekerheid afkomstig is van deze stochast. Hoe hoger de invloedsfactor, des te meer draagt deze in verhouding bij aan de totale onzekerheid.

Tussen de verschillende waterstanden worden geen relevante verschillen waargenomen. Voor het maatgevende glijvlak geldt dat de $S_{klei, Duinkerke}$ ($\alpha^2=0,52$) en $S_{klei, antropogeen}$ ($\alpha^2=0,265$) samen ca. 80% van de totale onzekerheid vormen. De bijdrage van de onzekerheid in de grensspanningspunten aan de totale onzekerheid is maximaal in de orde grootte 5% en betreft de punten in de laag van klei antropogeen en klei Duinkerke onder de kruin en de binnenberm.

Volledige verzadiging door golfoverslag

Voor de situatie waarbij het volledige dijklichaam is verzadigd door overslag is 1 probabilistische analyse uitgevoerd voor het illustratiepunt van 10 l/s/m, waarna de fragility curve voor de situatie met volledige verzadiging door golfoverslag wordt gemodelleerd als een horizontale lijn op dit betrouwbaarheidsniveau. Dit is een kleine vereenvoudiging van de werkelijkheid, omdat de stijghoogte van het Pleistoceen in de praktijk wel lichtelijk verandert bij een verandering in buitenwaterstand. Aangezien de maatgevende glijcirkel zeer ondiep is en geen invloed ondervindt van een verandering in stijghoogte van het Pleistoceen heeft deze vereenvoudiging geen invloed op het resultaat. De betrouwbaarheidsindex voor deze situatie bedraagt: $\beta=4,3$ dat overeenkomt met een faalkans van $8,48 \cdot 10^{-5}$ per jaar. (zie figuur 9).

5.2.2 Totale faalkans binnenwaartse macrostabiliteit

Samengestelde fragility curve

Om de totale faalkans voor STBI te bepalen, wordt de 'samengestelde' fragility curve geïntegreerd over de buitenwaterstand. Een beschrijving voor het afleiden van de samengestelde fragility curve

is gegeven in hoofdstuk 4. De samengestelde fragility curve is gegeven in tabel 14 en is tevens weergegeven in figuur 9.

Tabel 14 Samengestelde fragility curve locatie Grote Braak

Buitenwaterstand	Toelichting	β [-]
$h \leq \text{NAP}-0,4 \text{ m}$	Waterstanden lager of gelijk aan de dagelijkse waterstand	4,68
$\text{NAP}+0,62 \text{ m}$	Waterstand behorende bij het illustratiepunt voor een overslagdebiet van $1 \text{ l/s/m}'$, verkregen door interpolatie tussen dagelijks en MHW	4,66
$\text{NAP}+1,39 \text{ m}$	Waterstand behorende bij het illustratiepunt voor een overslagdebiet van $10 \text{ l/s/m}'$	4,30
$h > \text{NAP}+1,39 \text{ m}$	Waterstand hoger dan de waterstand behorende bij het illustratiepunt voor een overslagdebiet van $10 \text{ l/s/m}'$	4,30

Kansdichtheidsfunctie waterstand

De kansdichtheidsfunctie van de waterstand is benodigd voor het integreren van de fragility curve (verkrijgen van de totale faalkans). Deze kansverdeling is bepaald vanuit de veronderstelling dat tussen twee berekende waterstanden de kansdichtheid constant is (tabel 15, zie ook figuur 9). De meeste massa van de kansdichtheidsfunctie is aanwezig tussen de waterstanden $\text{NAP}-0,33 \text{ m}$ en $\text{NAP}+0,3 \text{ m}$. Het deel van de fragility curve tussen deze waterstanden zal het zwaarst worden meegewogen in de integratie.

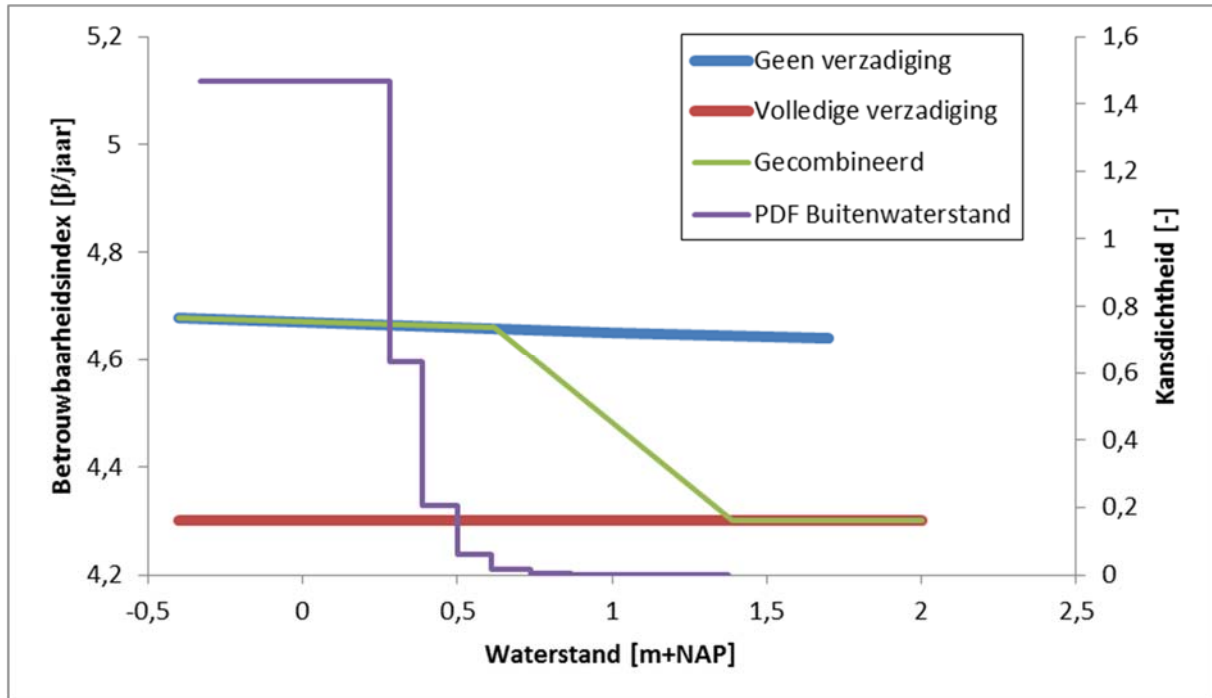
Tabel 15 Kansdichtheidsfunctie waterstand locatie Zeevang in [m] t.o.v. NAP

Ondergrens	Bovengrens	Kans van voorkomen
-0,330	0,283	0,9
0,283	0,388	0,0666
0,388	0,501	0,0233
0,501	0,610	0,00666
0,610	0,738	0,00233
0,738	0,868	0,000666
0,868	1,025	0,000233
1,025	1,186	6,66E-05
1,186	1,378	2,33E-05

Totale faalkans

De totale faalkans bedraagt $1,49 \cdot 10^{-6}$ per jaar. Dit komt overeen met een betrouwbaarheidsindex $\beta=4,67$ per jaar. Hiermee voldoet de berekende betrouwbaarheid aan de vereiste betrouwbaarheid (4,4 voor faalkansruimte 0,04 en 4,0 voor faalkansruimte 0,24).

Conclusie van de probabilistische analyse is dus dat door het uitvoeren van een probabilistische beoordeling al tot goedkeuren kan worden gekomen op doorsnedeniveau voor het mechanisme macro-stabiliteit binnenwaarts.



Figuur 9 Fragility curves maatgevende glijcirkel en kansdichtheid buitenwaterstand Grote Braak

5.3 Bewezen sterkte

Aangezien de betrouwbaarheid van de sectie met de probabilistische berekening al groter is dan de vereiste betrouwbaarheid heeft een update op basis van een overleefde situatie geen meerwaarde. De update zal leiden tot een toename van de betrouwbaarheid.

6 Analyses locatie Katwoude EA-4B

6.1 Semi-probabilistische analyses

6.1.1 Gevoeligheidsanalyses

De gevoeligheid van de stabiliteitsfactor voor de grondparameters, waterstand en verkeersbelasting is verkend. De resultaten (zowel excl. als incl. correctie met modelfactor) zijn weergegeven in tabel 16. De maatgevende glijcirkel voor de basisberekening is weergegeven in figuur 10. Ook is er nog een aanvullende berekening gemaakt voor een volledig verzadigde situatie (aangenomen dat deze optreedt bij 10 l/s/m). Bij deze berekening is de kruin volledig verzadigd aangenomen en de stijghoogtes gelijk aan de situatie waarbij geen volledige verzadiging optreedt.

Tabel 16 Resultaten semi-probabilistische berekeningen locatie Katwoude

Variatie	Waterstand	Grondparameters	Verkeers- belasting [kPa]	S.F. (excl. modelfactor)	S.F. (incl. modelfactor)
Basis	peil bij norm	Karakteristieke waarden	5	1,35	1,27
1	peil bij norm	Gemiddelde waarden	5	2,60	2,45
2	peil bij norm	Karakteristieke waarden	0	1,48	1,39
3	dagelijks	Karakteristieke waarden	5	1,45	1,36
4	peil bij norm met volledige verzadiging	Karakteristieke waarden	5	1,32	1,24

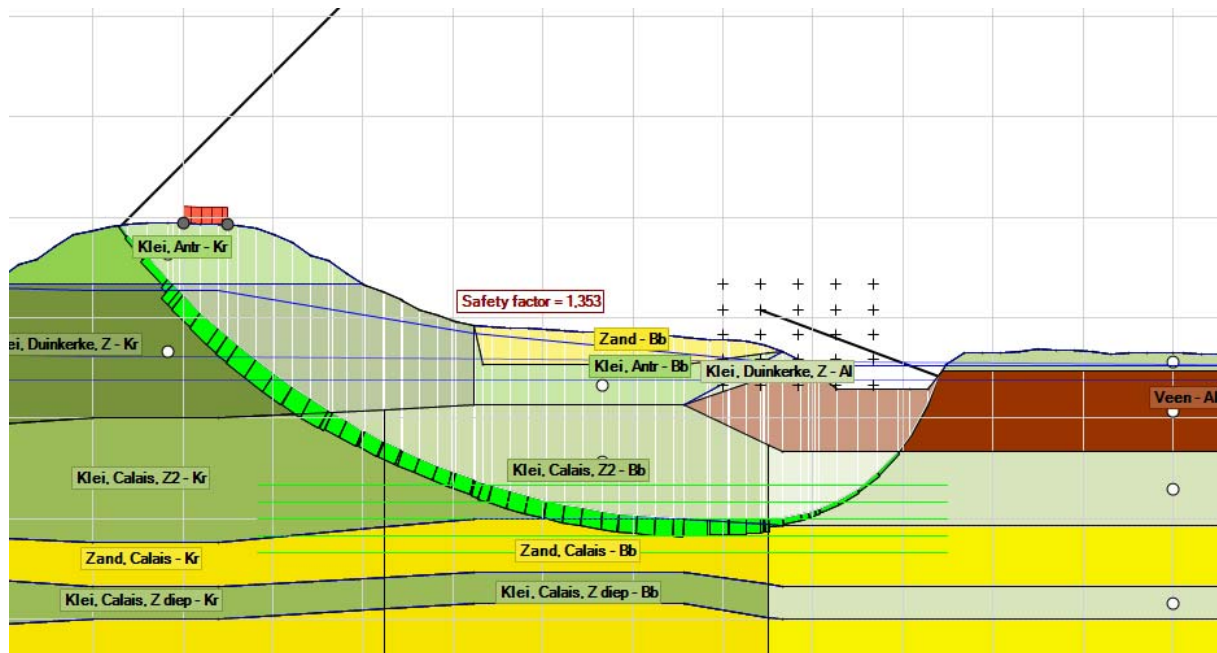
Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de invloed van de waterstand en de verkeersbelasting op de stabiliteitsfactor significant is (ca. 10% verandering in stabiliteitsfactor). Het effect van de mate van verzadiging op de stabiliteitsfactor is zeer beperkt. Het effect van de stap van gemiddelde waarden naar karakteristieke waarden van de grondparameters is opvallend groot en belangrijk. Het grote verschil tussen de resultaten met gemiddelde en karakteristieke waarden van de grondparameters geeft aan dat de meerwaarde van een probabilistische analyse potentieel groot is.

6.1.2 Maatgevende glijcirkels

De glijcirkel van de basisvariant is weergegeven in figuur 10. Alternatieve glijcirkels (een ondiepe door het klei antropogeen in de binnenberm, een diepe door klei Calais Z diep) hebben een significant hogere stabiliteitsfactor (zie tabel 17) Het verschil in stabiliteitsfactor is dermate groot dat is aangenomen dat deze glijcirkel ook de maatgevende glijcirkel is in een probabilistische analyse.

Tabel 17 Bepaling maatgevende glijcirkel locatie Katwoude

Variatie	Waterstand	Grondparameters	Verkeersbelasting [kPa]	Glijvlak	S.F.
Basis	peil bij norm	Karakteristiek	5	keuze	1,35
1	peil bij norm	Karakteristiek	5	ondiep	1,70
2	peil bij norm	Karakteristiek	5	diep	2,06



Figuur 10 Maatgevende glijcirkel semi-probabilistische analyse Katwoude

6.2 Probabilistische stabiliteitsanalyses

6.2.1 Fragility curve

Geen volledige verzadiging

De resultaten van de probabilistische stabiliteitsberekeningen zijn gegeven in tabel 18.

Tabel 18 Fragility curve voor de situatie zonder verzadiging door golfoverslag

Waterstand [m] t.o.v. NAP	β [-]
-0,4	4,92
1,0	4,71
1,7	4,64

Uit tabel 18 blijkt dat de betrouwbaarheidsindex slechts beperkt afhankelijk is van de buitenwaterstand; de fragility curve loopt relatief vlak. Dit bevestigt de bevindingen uit de semi-probabilistische gevoeligheidsanalyses.

Interpretatie en controle resultaten

Bij de berekening van de fragility curve wordt voor elke waterstand de invloedsfactoren (α^2) per stochast bepaald. De invloedsfactor per stochast geeft aan hoeveel % van de totale onzekerheid

afkomstig is van deze stochast. Hoe hoger de invloedsfactor, des te meer draagt deze in verhouding bij aan de totale onzekerheid.

Tussen de verschillende waterstanden worden geen relevante verschillen waargenomen. Voor het maatgevende glijvlak geldt dat de $S_{klei, Calais, z2}$ ($\alpha^2=0,80-0,85$) en $S_{klei, Duinkerke, z}$ ($\alpha^2=0,05-0,10$) samen ca. 90% van de totale onzekerheid vormen. De bijdrage van de onzekerheid in de grensspanningspunten aan de totale onzekerheid is maximaal in de orde grootte 5% en betreft de punten in de laag van klei Calais en klei Duinkerke onder de berm.

Volledige verzadiging door golfoverslag

Bij locatie Grote Braak is de fragility curve berekend met een vereenvoudiging van de werkelijkheid door de fragility curve voor een volledig verzadigd dijklichaam te schematiseren als een horizontale lijn (verandering in stijghoogte Pleistoceen met verandering van de buitenwaterstand wordt genegeerd). Voor deze locatie is deze verandering wel verdisconteerd. Het verloop van de fragility curve laat echter zien dat de versimpeling gerechtvaardigd is: de verandering in betrouwbaarheidsniveau als gevolg van deze waterstand is niet heel groot.

Tabel 19 Fragility curve voor de situatie met volledige verzadiging door golfoverslag

Waterstand [m] t.o.v. NAP	β [-]
-0,4	4,82
1,0	4,60
1,7	4,52

6.2.2 Totale faalkans binnenwaartse macrostabiliteit

Samengestelde fragility curve

Om de totale faalkans voor STBI te bepalen, wordt de 'samengestelde' fragility curve geïntegreerd over de buitenwaterstand. Een beschrijving voor het afleiden van de samengestelde fragility curve is gegeven in hoofdstuk 4. De samengestelde fragility curve is gegeven in tabel 20 en is tevens weergegeven in figuur 11. De samengestelde fragility curve voor de maatgevende glijcirkel wordt:

Tabel 20 Samengestelde fragility curve locatie Katwoude

Buitenwaterstand	Toelichting	β [-]
NAP-0,40 m	Dagelijkse waterstand	4,92
NAP+0,57 m	Waterstand behorende bij het illustratiepunt voor een overslagdebiet van 1 l/s/m'	4,77
NAP+0,93 m	Waterstand behorende bij het illustratiepunt voor een overslagdebiet van 10 l/s/m'	4,61
NAP+1,0 m	Waterstand bij de norm	4,60
NAP+1,7 m	Extreme waterstand	4,52

Kansdichtheidsfunctie waterstand

De kansdichtheidsfunctie van de waterstand is benodigd voor het integreren van de fragility curve (verkrijgen van de totale faalkans). Deze kansverdeling is bepaald vanuit de veronderstelling dat tussen twee berekende waterstanden de kansdichtheid constant is (tabel 21, zie ook figuur 11). De meeste massa van de kansdichtheidsfunctie is aanwezig tussen de waterstanden NAP-0,33 m en

NAP+0,32 m. Het deel van de fragility curve tussen deze waterstanden zal het zwaarst worden meegewogen in de integratie.

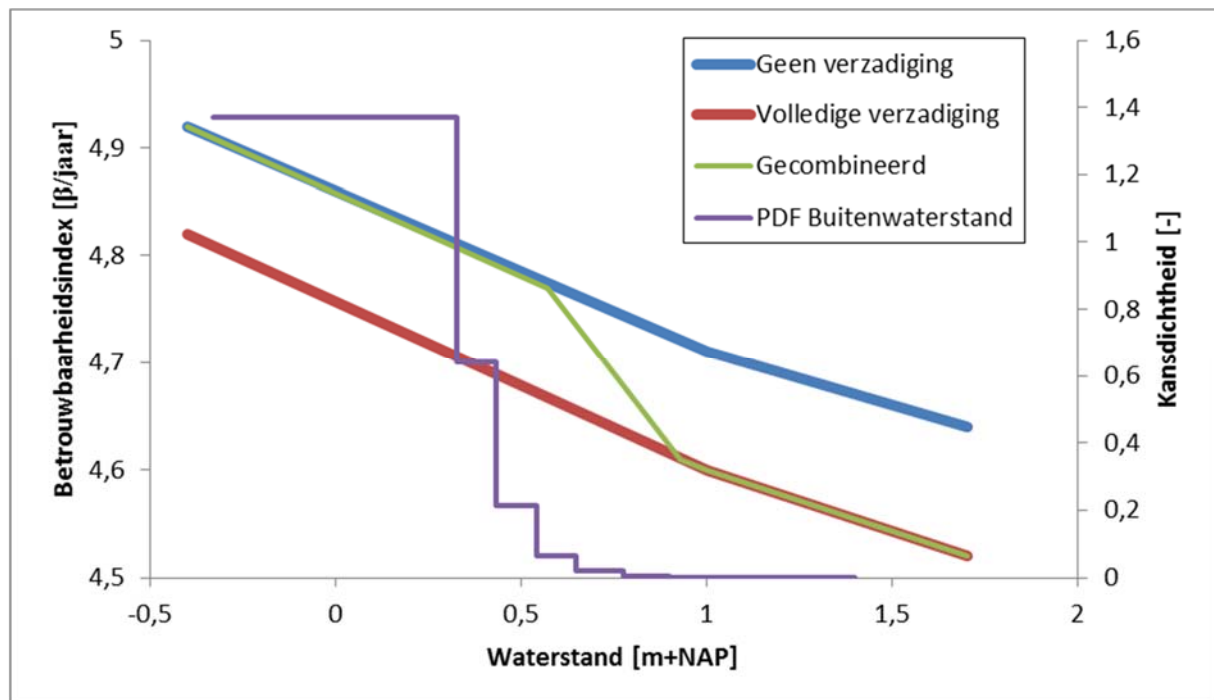
Tabel 21 Kansdichtheidsfunctie waterstand locatie Katwoude in [m] t.o.v. NAP

Ondergrens	Bovengrens	Kans van voorkomen
-0,330	0,327	0,9
0,327	0,431	0,0666
0,431	0,541	0,0233
0,541	0,647	0,00666
0,647	0,774	0,00233
0,774	0,901	0,000666
0,901	1,054	0,000233
1,054	1,212	6,66E-05
1,212	1,400	2,33E-05

Totale faalkans

De totale faalkans bedraagt $6,20 \cdot 10^{-7}$ per jaar. Dit komt overeen met een betrouwbaarheidsindex $\beta=4,85$ per jaar. Hiermee voldoet de berekende betrouwbaarheid aan de vereiste betrouwbaarheid (4,6 voor faalkansruimte 0,04 en 4,2 voor faalkansruimte 0,24).

Conclusie van de probabilistische analyse is dus dat door het uitvoeren van een probabilistische beoordeling al tot goedkeuren kan worden gekomen op doorsnedeniveau voor het mechanisme macro-stabiliteit binnenwaarts.



Figuur 11 Fragility curves maatgevende glijcirkel en kansdichtheid buitenwaterstand Katwoude

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I



Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
27 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

6.3 Bewezen sterkte

Aangezien de betrouwbaarheid van de sectie met de probabilistische berekening al groter is dan de vereiste betrouwbaarheid heeft een update op basis van een overleefde situatie geen meerwaarde. De update zal leiden tot een toename van de betrouwbaarheid.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Voor twee trajecten (Grote Braak en Katwoude) zijn probabilistische analyses uitgevoerd op doorsnedeniveau. De vereiste betrouwbaarheid is 4,4 voor Grote Braak en 4,6 voor Katwoude.

Uit de semi-probabilistische som volgt dat de onzekerheid in de grondparameters een dominante rol speelt bij het bepalen van de veiligheid van de doorsneden. De invloed van de waterstand en de verzadiging van het dijklichaam op de veiligheidsfactor is zeer beperkt, waardoor verwacht mag worden dat de fragility curve heel vlak loopt. Met de semi-probabilistische analyse zijn tevens de maatgevende glijcirkels voor de probabilistische analyses bepaald. De maatgevende glijcirkels doorsnijden vooral de kleilagen, wat aangeeft dat de kleilagen dominant zijn voor de faalkans.

Voor beide doorsneden wordt in de probabilistische analyse een relatief vlakke fragility curve gevonden, zowel voor de situatie met als zonder volledige verzadiging. De dominante bijdrage in de totale onzekerheid wordt geleverd door de ongedraineerde schuifsterkte ratio S van de kleilagen (orde grootte 80%). De kennisonzekerheid in de parameter S is relatief eenvoudig reduceerbaar door het uitvoeren van meer proeven, waardoor de faalkans met een relatief geringe inspanning omlaag gebracht kan worden. Meer proeven betekent namelijk een betere kennis van de waarde van de parameter.

Door integratie over de buitenwaterstand is de totale faalkans voor STBI bepaald. Voor Grote Braak wordt een betrouwbaarheid van 4,67 per jaar berekend, voor Katwoude 4,85. Wanneer dit wordt vergeleken met de eis betekent dit dat op doorsnedeniveau aan de vereiste betrouwbaarheid en dus faalkans wordt voldaan. Omdat op doorsnedeniveau aan de veiligheidseis wordt voldaan, is de stap naar bewezen sterkte niet meer benodigd om tot goedkeuren te kunnen komen. Deze stap is dus verder niet beschouwd in deze verkennende studie.

Er dient echter wel met de nodige voorzichtigheid te worden omgegaan met het mogelijk goedkeuren op doorsnedeniveau. Er is namelijk slechts gerekend met 1 scenario. Dit is onvoldoende om het effect van schematiseringsonzekerheden voldoende te hebben beschouwd. Ook is er qua doorvertaling nog onvoldoende gekeken naar de aanvullend in rekening te brengen variaties in de parameters.

7.2 Aanbevelingen

Gumbel-verdeling

Voor de integratie van de fragility curve is er voor beide locaties een kansverdeling van de waterstand bepaald uit de Hydra-NL output. Tussen twee berekende waterstanden is de kansdichtheid constant verondersteld. Dit is een grote vereenvoudiging van de werkelijke kansverdeling. Een betere benadering kan worden verkregen door een Gumbel (extreme waarden) kansverdeling te fitten aan de waterstanden uit Hydra-NL. Het effect is verkend voor de locatie Grote Braak en blijkt verwaarloosbare invloed te hebben. Dit kan worden verklaard omdat de fragility curves 'vlak' lopen (afhankelijkheid van de waterstand gering). Zou deze afhankelijkheid

groter zijn dan zou het effect van het versimpelen van de kansverdeling van de waterstand ook groter zijn.

Uitbreiden Hydra-software

Het verloop tussen de twee fragility curves (verzadigd en niet-verzadigd) is geïnterpoleerd tussen de waterstand behorende bij het illustratiepunt van 1 l/s/m overslag en 10 l/s/m overslag. Het is juister het verloop te bepalen met de functie $p(q > q_{\text{significant}} | h)$. Dit is voor het watersysteem Markermeer momenteel niet mogelijk met Hydra-NL.

Locatie specifieke S

De schuifsterkteratio, S , die is aangenomen is momenteel afkomstig uit [ref. 3]. De S blijkt de grootste invloedscoëfficiënt te hebben. Voor het definitief ontwerp van de Markermeerdijken is reeds een locatie specifieke S afgeleid. Aanbevolen wordt deze te gebruiken.

Onvoorziene onzekerheden

Een belangrijk nieuw uitgangspunt uit de Handreiking Faalkansanalyse (blz. 19) is dat "imponderabilia" worden gecompenseerd door het WBI faalkansbudget "onvoorzien". Aanbevolen wordt om na te gaan, of dit ook voor de (ontwerp)situatie bij de Markermeerdijk een gedragen aanpak is en of dit faalkansbudget niet al voor andere zaken is gebruikt.

Maatgevende glijvlakken

Bij het bepalen van het maatgevende glijvlak is in dit rapport de aanpak gehanteerd dat mogelijk maatgevende glijcirkels uit de semi-probabilistische analyses worden 'vastgezet'. Met andere woorden, er is impliciet aangenomen dat dit glijvlak ook in de probabilistische analyse mogelijk maatgevend blijft. Dit hoeft echter niet zo te zijn. Dit laat de analyse voor 'Grote Braak' goed zien: de glijcirkel die in de semi-probabilistische analyse een vergelijkbare veiligheidsfactor had als twee alternatieve cirkels, blijkt in de probabilistische analyse ineens een veel lager betrouwbaarheidsniveau te geven (orde grootte 2,0 verschil in beta). Dit geeft aanleiding om nog eens kritisch na te denken of ook werkelijk de maatgevende cirkels beschouwd zijn en er niet toevallig glijcirkels zijn die in een probabilistische analyse (vanuit het niets) maatgevend worden. Dit is het nadeel van het 'vastzetten' van het semi-probabilistische glijvlak. Het alternatief, berekenen met een 'vrij glijvlak', heeft als nadelen een lange rekentijd en geen zekerheid dat de oplossing ook werkelijk convergeert.

De vermoedelijke oorzaak voor het grote verschil in betrouwbaarheidsindex is het aantal lagen waardoor het glijvlak loopt. Hoe lager deze is, des te groter de kans op ongunstige parameters voor elke grondlaag en dus des te hoger de faalkans.

Een belangrijke stap om de onzekerheid met betrekking tot het vaststellen van het maatgevende glijvlak is het maken van een berekening met pseudo-karakteristieke waarden. Deze module, welke is ingebouwd in elke standaardversie van D-GeoStability neemt de spreiding van grondparameters mee bij het bepalen van het maatgevende glijvlak. Door de berekening met pseudo-karakteristieke waarden te vergelijken met het resultaat van de probabilistische analyse kan de onzekerheid over het maatgevende glijvlak worden verkleind.

Deze pseudo-karakteristieke waarden aanpak is in het verleden voor de Markermeerdijken ook al beschouwd en dit bleek significante (positieve) verschillen in stabiliteitsfactoren tot gevolg te

Alliantie Markermeerdijken

Probabilistische analyses en bewezen sterkte fase I



Pagina	Revisiedatum	Documentnummer
30 van 32	10-7-2018	AMMD-005498

hebben ten opzichte van de conventionele semi-probabilistische stabiliteitsberekeningen. Er wordt aanbevolen om met deze module een aantal berekeningen te maken en dit te vergelijken met probabilistische analyses, zodat voor de toekomst wellicht al op een snellere wijze een inschatting van de toegevoegde waarde van grondparameters kan worden verkregen.

8 Reflectie aanbevelingen RUPP oefensessies december 2016

Tenslotte wordt er nog kort gereflecteerd op de ervaringen en aanbevelingen die zijn gemaakt bij de probabilistische en bewezen sterkte analyses bij Warder (dijkvak 23, sectie 9B, dijkpaal 52.90) van december 2016. In het kader hiervan worden de belangrijkste aanbevelingen uit het memo "Evaluatie RUPP oefensessies december 2016" behandeld. In deze memo worden 5 voorwaarden gesteld waaronder een RUPP-analyse kans van slagen heeft. Voor elk van deze vijf voorwaarden wordt kort beschreven wat de ervaringen van de sessie uit 2016 en de huidige sessie zijn:

Het moet werken in een productieomgeving

2016: Rekening probabilistische berekeningen is lang en gebruik van de software vergt begeleiding. Daarnaast vergt het wiskundige vaardigheden, die niet iedere dijkadviseur heeft. Software moet nog worden verbeterd (bugs eruit halen).

2017: de software is zienderogen verbeterd. Door ervaring met probabilistisch rekenen van beide adviseurs waren er geen problemen qua wiskundige vaardigheden. De rekestijd was, mede door het toepassen van het 'vastgezette' glijvlak vrij beperkt.

De resultaten zijn acceptabel

2016: Hier wordt opgemerkt dat probabilistisch rekenen zorgt voor optimalisatie met betrekking tot voorziene onzekerheden, maar dat dientengevolge er minder marge is voor onvoorziene onzekerheden en fouten. Daarnaast wordt aangekaart dat dat er door deze aanpak verschillende veiligheidsniveaus binnen een dijktraject kunnen worden gehanteerd (semi-probabilistisch naast probabilistisch).

2017: er is nog geen duidelijke marge gedefinieerd met betrekking tot de marge die moet worden behouden op de onvoorziene onzekerheden. Geen marge voor verschillende schematiseringsonzekerheden. Benadering met meerdere scenario's, maar dit is in deze studie ook niet toegepast. Over de inbedding van de probabilistische aanpak binnen de semi-probabilistische aanpak is geen kennis beschikbaar gekomen. Dit punt staat nog steeds open.

Het levert iets op ten opzichte van de huidige semi-probabilistische aanpak

2016: De conclusie voor Warder was dat probabilistisch rekenen iets opleverde en dat faalkans updating mogelijk iets zou kunnen opleveren (nog niet aangetoond).

2017: de conclusie is door dit onderzoek niet gewijzigd: er is een indicatie verkregen door de probabilistische analyse dat mogelijk tot goedkeuren op dwarsprofielniveau kan worden gekomen. Bewezen sterkte is door het positieve resultaat van de semi-probabilistische analyses niet verder verkend.

Het is toepasbaar

2016: als aandachtspunten wordt de doorvertaling van doorsnede-niveau naar trajectniveau benoemd en de vraag of werkelijk het maatgevende glijvlak wordt gevonden.

2017: de doorvertaling van doorsnedeniveau naar trajectniveau is niet expliciet behandeld in dit onderzoek, dit is in 2017 door Deltares onderzocht. Op korte termijn wordt een rapport vrijgegeven die dit punt behandelt. De vraag of in de probabilistische analyse werkelijk het maatgevende glijvlak wordt gevonden is ook een van de belangrijkste discussiepunten in dit rapport (zie hoofdstuk 7).

De uitgangspunten in de analyse kunnen worden verantwoord

2016: hier wordt gesteld dat bij de afleiding van de uitgangspunten niet is geanticipeerd op het uitvoeren van een probabilistische beschouwing.

2017: het afleiden van de uitgangspunten is nog steeds niet volledig gericht op het uitvoeren van een semi-probabilistische analyse. De onzekerheid in grondparameters is statistisch goed onderbouwd. Het niet probabilistisch meenemen van zaken als:

- schematiseringsonzekerheid;
- waterspanningen gegeven een waterstand
- vrije glijvlakanalyse
- kans op overslag gegeven een waterstand
- correlaties van parameterwaarden van verschillende grondlagen

zorgt voor nog veel deterministische (conservatieve) aannames in een probabilistische som.

Tot slot wordt in het memo gesteld dat er meer duidelijkheid dient te komen met betrekking tot de schematisatie bij grote golfoverslag. In dit onderzoek wordt dezelfde conclusie gevonden als in de memo: de stabiliteit van de verzadigde talud vergelijkbaar met de stabiliteit van een onverzadigd talud. Dit kan echter worden verklaard vanuit het model, maar strookt niet met de praktijk. Hier is verder onderzoek benodigd.