

Factsheet

Opgesteld door : Marieke de Visser, Ruben Jongejan
Cases : Cor Bisschop, Jan Tigchelaar
Datum : 08-03-2018
Versie : 2
Onderwerp : KPR factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag
OI2014v4

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

Voorwoord

Deze werkwijze voor macrostabiliteit bij golfoverslag is uitgewerkt voor toepassing van het CSSM-materiaalmodel, ofwel gedraineerde of ongedraineerde sterkte bij grote rekken. De methode sluit aan op de (semi-probabilistische) veiligheidsfactoren voor het CSSM-model zoals opgenomen in OI2014 versie 4. De methode is niet afgeleid voor het Mohr-Coulomb model. (Voor de methode die aansluit op de veiligheidsfactoren uit OI2014v3 is een vergelijkbare memo gepubliceerd in juli 2016.)

Wijzigingen ten opzichte van versie 1

Deze werkwijze is in een aantal projecten toegepast, waarna is geconcludeerd dat het goed werkbaar en toepasbaar is. Ten opzichte van versie 1 van deze werkwijze zijn geen inhoudelijke aanpassingen gedaan aan de methode en de veiligheidsfactoren. De werkwijze is op een aantal punten inhoudelijk verduidelijkt door tekstuele aanpassingen en er zijn twee voorbeelden toegevoegd. Deze methode is vooralsnog niet in het ENW besproken.

De gebruiker wordt verzocht om bij de toepassing contact met het KPR te houden. We willen de resultaten namelijk gebruiken om de methodiek verder uit te werken en de schematiseringsinstructie te verbeteren. Het KPR kan ook benaderd worden voor vragen over de toepassing van deze werkwijze.

Inhoud

1	Inleiding	2
2	Interactie macrostabiliteit en golfoverslag	2
3	Werkwijze	3
4	Uitwerking werkwijze analyse macrostabiliteit met significante golfoverslag	4
4.1	Infiltratie en freatische lijn	4
4.2	Kruinhoogte	4
4.3	Rekenwaarde buitenwaterstand - overslagberekening	4
4.4	Betrouwbaarheidseis en partiële veiligheidsfactoren	5
4.5	Maatgevende glijvlakken	6
5	Resultaten en analyse	6
6	Rekenvoorbeeld en cases	7
7	Terugmelding van ervaringen	7
	Referenties	8
	Bijlage 1 Voorbeeld Case Herwijnen – WSRL	9
	Bijlage 2 Voorbeeld Case Wieringerzeewering – HHSK	17

1 Inleiding

De maximaal toelaatbare overstromingskans heeft betrekking op het optreden van een overstroming met substantiële schade of slachtoffers tot gevolg. Het betreft een eis aan de kans op overschrijding van een uiterste grenstoestand, geen eis aan de kans op het ontstaan van schade. Daarom mag bij het beoordelen van de erosiebestendigheid van het binnentalud van een dijk worden uitgegaan van een relatief groot kritiek overslagdebiet, groter dan 5 of 10 l/s/m. Dit leidde in 2015 tot vragen van beheerders en ontwerpers over de wijze waarop met dergelijke overslagdebieten moet worden omgegaan bij beoordelingen van de binnenwaartse macrostabiliteit. De freatische lijn kan door golfoverslag stijgen, hetgeen de macrostabiliteit ongunstig beïnvloedt. Daarnaast kan de weerstand van het binnentalud tegen golfoverslag afnemen als het binnentalud door macro-instabiliteit beschadigd raakt. Er is hier dus sprake van interactie tussen faalmechanismen.

De bestaande instructies omtrent het schematiseren van macrostabiliteit, zoals opgenomen in de technische rapporten, zijn ontwikkeld zonder dat daarbij expliciet de relatie met golfoverslag is gelegd. Feitelijk is bij de afleiding van veiligheidsfactoren impliciet aangenomen dat golfoverslag geen rol van betekenis speelt. De instructies zijn daarom geldig voor situaties met maximaal ca. 0,1 tot 1 l/m/s golfoverslag.

In dit memo wordt een werkwijze gepresenteerd om met de interacties tussen macrostabiliteit en golfoverslag om te gaan bij de beoordeling en het ontwerp van primaire waterkeringen. (Bij een probabilistische analyse kan dit direct meegenomen worden.) Deze methode gaat uit van het afzonderlijk beschouwen van de faalgebeurtenissen waarbij wel/geen wezenlijke golfoverslag aanwezig is. In dit memo is deze werkwijze uitgewerkt voor toepassing in de (ontwerp)praktijk.

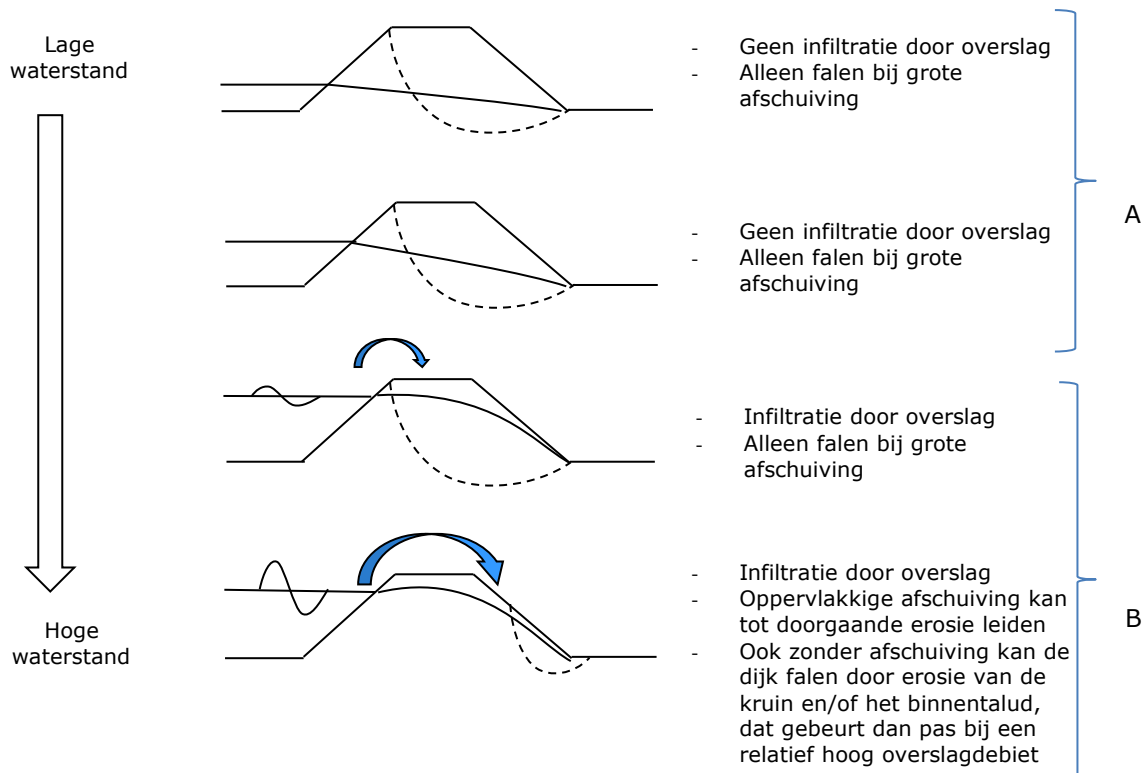
De theoretische achtergronden van de methode zijn uitgewerkt in 'Voorstel t.a.v. beoordeling macrostabiliteit incl. golfoverslag'. In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op de interactie tussen macrostabiliteit en golfoverslag. In hoofdstuk 3 tot en met 5 wordt de voorgestelde werkwijze gepresenteerd. In hoofdstuk 6 is een rekenvoorbeeld opgenomen. In hoofdstuk 7 wordt een oproep gedaan tot het terugmelden van de ervaringen met dit memo. Uitgewerkte voorbeelden van de werkwijze zijn opgenomen in de bijlages.

2 Interactie macrostabiliteit en golfoverslag

De interactie tussen macrostabiliteit en golfoverslag kan als volgt worden omschreven. Door overslag kan de freatische lijn stijgen. Hierdoor kan een (kleine) afschuiving optreden, die tot gevolg kan hebben dat de erosiebestendigheid van het binnentalud afneemt. Deze interacties tussen macrostabiliteit en golfoverslag zijn sterk afhankelijk van de belastingcondities. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 1. In de figuur is gemakshalve aangenomen dat bij een relatief hoge waterstand ook *altijd* sprake is van een relatief grote golfhoogte. Dat is niet overal het geval. Zo zijn de buitenwaterstand en de golfhoogte in het rivierengebied nauwelijks gecorreleerd. Als eenmaal sprake is van een relatief hoge buitenwaterstand, dan is de *kans* op overslag uiteraard wel altijd relatief groot.

Het principe van de beoordeling van macro-instabiliteit bij golfoverslag is het afzonderlijk beschouwen van de faalgebeurtenissen. Beide faalgebeurtenissen sluiten elkaar uit: er is of wèl sprake van overslag of er is geen sprake van overslag. Daarbij moeten beide faalgebeurtenissen voldoen aan een afzonderlijke eis. Dit resulteert in twee afzonderlijke verificaties met bijbehorende berekeningen, schematisaties en eisen:

- A. Een verificatie van macrostabiliteit zonder rekening te houden met significante golfoverslag en infiltratie;
- B. Een verificatie van macrostabiliteit waarbij wél rekening gehouden wordt met significante golfoverslag en infiltratie.



Figuur 1. De interacties tussen golfoverslag en macrostabiliteit.

3 Werkwijze

De beoordeling van de binnenwaartse macrostabiliteit vergt twee afzonderlijke stabiliteitsberekeningen. Het ontwerp moet volgens beide berekeningen voldoen.

A. Verificatie macrostabiliteit zonder significante golfoverslag

De huidige semi-probabilistische voorschriften voor macrostabiliteit kunnen gebruikt worden om te beoordelen of de kans op macroinstabiliteit zonder significante golfoverslag voldoende klein is:

- Er kan worden uitgegaan van de gangbare werkwijze voor macrostabiliteitsanalyses, waarbij voor het opstellen van de schematisatie de bekende schematisatie-aanwijzingen worden gevolgd;
- De ontwerpwaterstand is de waterstand met een jaarlijkse overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans;
- Er wordt geen rekening gehouden met infiltratie door golfoverslag en de waterspanningen worden geschematiseerd conform de vigerende technische rapporten.
- De beoordeling wordt uitgevoerd met de partiële veiligheidsfactoren uit het OI2014v4 (die gelijk zijn aan het WBI2017).
- Alleen falen bij grote afschuivingen is relevant, oftewel: glijvlakken die het waterkerend vermogen van de waterkering aantasten en leiden tot een overstroming. Deze gaan bijvoorbeeld door de kruin van de dijk.

Kortom, dit betreft dus de berekeningswijze zoals gebruikelijk was en is voor macrostabiliteit.

B. Verificatie macrostabiliteit met significante golfoverslag

Voor de verificatie van macrostabiliteit in geval van significante golfoverslag is een aangepast semi-probabilistisch voorschrift opgesteld. Dit wordt in het volgende hoofdstuk toegelicht. Een paar belangrijke punten hierin zijn:

- Bij de schematisatie van de freatische lijn wordt uitgegaan van infiltratie door overslag;
- De buitenwaterstand moet op een afwijkende manier worden bepaald;
- Er worden gereduceerde partiële veiligheidsfactoren aangehouden;
- Als gevolg van overslag kunnen ook kleine afschuivingen tot doorgaande erosie leiden: zowel grote als kleine berekende glijvlakken kunnen daarom maatgevend zijn.

Dit wordt toegelicht in het volgende hoofdstuk.

4 Uitwerking werkwijze analyse macrostabiliteit met significante golfoverslag

Bij de werkwijze voor het uitvoeren van macrostabiliteit met significante golfoverslag worden de gebruikelijke stappen doorlopen voor een macrostabiliteitsberekening. Op een aantal punten is de schematisatie echter afwijkend. Ook moet er een andere buitenwaterstand en gereduceerde partiële veiligheidsfactoren worden aangehouden. Deze punten worden in de volgende paragrafen toegelicht.

4.1 Infiltratie en freatische lijn

Bij het schematiseren van de freatische lijn moet rekening gehouden worden met infiltratie. Als het effect van infiltratie bij een groot overslagdebiet groot is of groot zou kunnen zijn, dan dient de freatische lijn geschematiseerd te worden behorende bij een dergelijk groot golfoverslagdebiet. Op dit moment zijn er geen algemene richtlijnen voorhanden voor het schematiseren van de freatische lijn als gevolg van golfoverslag. Dit onderwerp wordt in het kader van de doorontwikkeling van het OI2014 verder uitgezocht.

Een (zeer) conservatief vertrekpunt is om uit te gaan van volledige verzadiging van het dijklichaam, ofwel een freatische lijn die net onder de kruin en het talud van de dijk ligt. Hierdoor zijn de effectieve spanningen in de kruin relatief laag. Als eerste stap kan dit al afdoende zijn omdat bij deze verificatie met een lagere schadefactor gerekend kan worden (zoals toegelicht in paragraaf 4.4). Alleen als niet tot een oordeel 'voldoet' kan worden gekomen, is aanscherping van de schematisatie nodig.

Aanscherping kan plaatsvinden met behulp van aanwijzingen uit het OI2014v4 en het bijhorende achtergrondrapport. We bevelen aan om gevoeligheidsanalyses uit te voeren bij verschillende verzadigingsgraden (ligging freatische lijn) van het dijklichaam. Op deze manier kan de gevoeligheid voor de infiltratie in beeld gebracht te worden. De verschillende mogelijkheden kunnen eventueel ook als scenario's worden behandeld.

4.2 Kruinhoogte

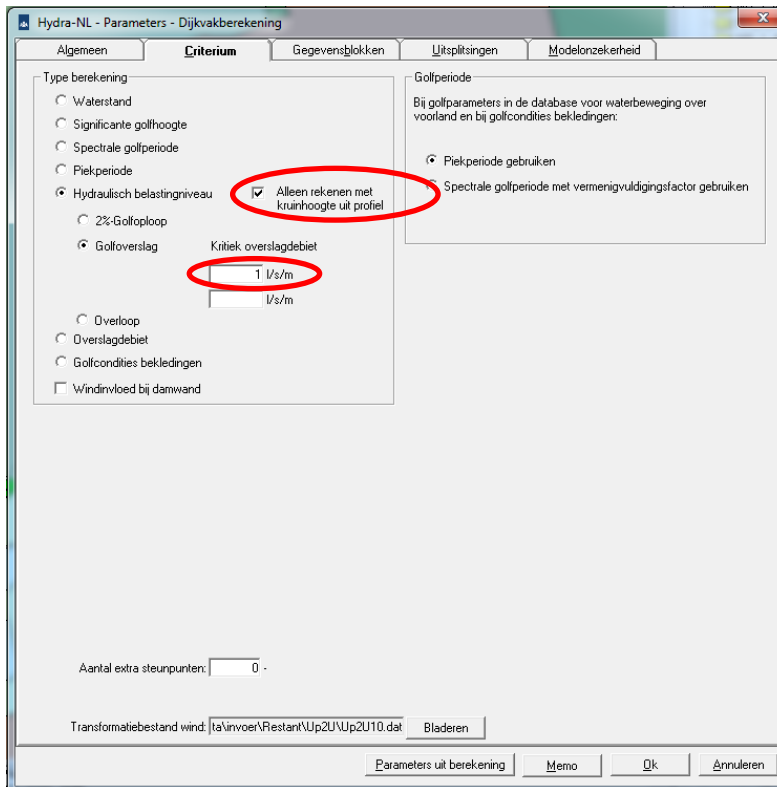
In een ontwerpverificatie moet de kruinhoogte in de schematisatie aangepast worden naar de ontwerpkruihoogte, zoals (vermoedelijk) aanwezig op de peildatum van de beoordeling. Door o.a. zettingen neemt de kans op overslag in de tijd namelijk geleidelijk toe.

4.3 Rekenwaarde buitenwaterstand - overslagberekening

De rekenwaarde van de buitenwaterstand is niet de gebruikelijke waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm, maar de ontwerpwaarde van de buitenwaterstand behorend bij een golfoverslagdebiet van 1 l/m/s. De reden voor deze keuze is dat er bij het gebruikelijke ontwerppeil geen sprake hoeft te zijn van significante overslag. Bij een dijk met veel overhoogte kan de kans op golfoverslag namelijk heel klein zijn. Het kan in bijzondere gevallen zelfs zo zijn dat de kans op golfoverslag al zo klein is dat met de effecten van overslag bij het ontwerp in het geheel geen rekening hoeft te worden gehouden.

De werkwijze is als volgt:

- Bepaal de overschrijdingskans van 1 l/s/m overslag, $P(q \geq 1 \text{ l/s/m})$. Deze kans is afhankelijk van de kruinhoogte op de peildatum. De overschrijdingskans bepaald worden door een HBN berekening (in Hydra-NL) uit te voeren met een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m en het profiel en kruinhoogte op peildatum, gebruik makend van de rekenrecepten zoals gespecificeerd in OI2014 versie 5. In aanvulling op deze recepten dient bij het selecteren van het criterium een vinkje gezet te worden bij "Alleen rekenen met kruinhoogte uit profiel", zie onderstaande figuur.



- Bepaal de bijbehorende ontwerppuntwaarde van de buitenwaterstand, gerapporteerd onder "Hoofdillustratiepunt bij hydraulisch belastingniveau". Deze kan worden opgezocht in de uitvoerbestanden van de hydra-berekening. In geval van een watersysteem met een stormvloedkering worden er twee hoofdillustratiepunten gerapporteerd, kies van deze beide illustratiepunten de hoogste buitenwaterstand. Deze buitenwaterstand dient als rekenwaarde van de buitenwaterstand in de stabiliteitsanalyse voor de situatie met golfoverslag te worden beschouwd.
- De stijghoogtes in de watervoerende zandlagen zullen naar deze buitenwaterstand aangepast moeten worden.

Een mogelijke bron van verwarring is dat bij de verificatie van de macrostabiliteit zonder significante golfoverslag wordt gerekend met een ontwerpwaterstand waarbij in de praktijk wel degelijk sprake kan zijn van significante overslag. Desondanks moet in dergelijke gevallen worden geschematiseerd alsof er geen sprake is van significante golfoverslag. De achtergrond hiervan is dat de veiligheidsfactor ten behoeve van het semi-probabilistisch voorschrift voor verificaties van de macrostabiliteit zonder significante overslag zodanig is gekalibreerd dat deze samen met de gekozen overschrijdingskans van het ontwerppeil een dijk oplevert waarvan de faalkans -in een wereld zonder golfoverslag- voldoende klein is. (Net zoals in de WBI-kalibratiestudie moet bij verificaties van de macrostabiliteit zonder golfoverslag alleen worden gekeken naar de marginale statistiek van de buitenwaterstand en niet naar bijbehorende golfcondities.)

4.4 Betrouwbaarheidseis en partiële veiligheidsfactoren

Betrouwbaarheidseis

Bereken de faalkanseis op doorsnedeniveau. Deze faalkanseis is nodig om de schadefactor te bepalen (zie tabel 1).

1. Bepaal de faalkanseis voor macro-instabiliteit op doorsnedeniveau ($P_{eis,dsn,stbi}$) op basis van de maximaal toelaatbare overstromingskans, de faalkansruimtefactor voor macro-instabiliteit en het lengte-effect. Dit is de standaard werkwijze conform OI2014v4:

$$P_{eis,dsn,stbi} = f_{STBI} \cdot P_{max} / (1 + a \cdot L / b) \quad (1)$$

- Bereken de kans op overschrijding van 1 l/s/m voor het beschouwde dijkprofiel, $P(q \geq 1 \text{ l/s/m})$. (zie paragraaf 4.3)
- Bepaal de faalkanseis voor macro-instabiliteit gegeven significante golfoverslag door de faalkanseis uit stap 1 te delen door de overschrijdingskans uit stap 2.

$$P_{T, \text{stbi}, q} = P_{\text{eis}, \text{dsn}, \text{stbi}} / P(q \geq 1 \text{ l/s/m}) \quad (2)$$

$$\beta_{T, \text{stbi}, q} = -\Phi^{-1}(P_{T, \text{stbi}, q}) \quad (3)$$

Waarin:

$P_{\text{eis}, \text{dsn}, \text{stbi}}$	Faalkanseis voor macro-instabiliteit op doorsnedeniveau (per jaar)
P_{max}	Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)
f_{STBI}	Faalkansruimtefactor voor macro-instabiliteit, default-waarde $f_{\text{STBI}} = 0,04$
a	Fractie van de trajectlengte dat gevoelig is voor het beschouwde faalmechanisme, default-waarde in OI2014v4: $a = 0,033$
b	Lengte onafhankelijke, equivalente dijkvakken, default-waarde: $b = 50\text{m}$
L	Trajectlengte (m)
q	Overslagdebiet (l/s/m)
$P_{T, \text{stbi}, q}$	Faalkanseis voor macro-instabiliteit gegeven significante overslag op doorsnedeniveau (-)
$\beta_{T, \text{stbi}, q}$	Geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede bij significante golfoverslag (-)
$\Phi^{-1}(\cdot)$	Inverse van de standaardnormale verdelingsfunctie. In Excel: norm.s.inv(.)

NB: de faalkanseis $P_{T, \text{stbi}, q}$ uit stap 3 heeft niet langer de eenheid [per jaar]. Het is namelijk een eis aan de kans op het falen van de dijk door macro-instabiliteit in het (relatief zeldzame) geval dat er sprake is van significante golfoverslag.

Partiële veiligheidsfactoren

De beoordeling van macrostabiliteit met significante golfoverslag wordt uitgevoerd met de modelfactoren en materiaalfactoren voor macrostabiliteit uit OI2014v4. De schadefactor is echter gereduceerd. De partiële veiligheidsfactoren zijn gegeven in tabel 1.

Tabel 1. Overzicht partiële veiligheidsfactoren voor beoordelingen van de macrostabiliteit met significante overslag.

Modelfactor	
- Bishop	1,11
- LiftVan	1,06
- Spencer-Van der Meij	1,07
Materiaalfactoren	1,0
Schadefactor	$\gamma_n = 0,15 \cdot \beta_{T, \text{stbi}, q} + 0,41$
Schematiseringsfactor	De schematiseringsfactor wordt afgeleid bij de juiste schadefactor volgens de procedure uit TR Schematiseren bij Dijken.

4.5 Maatgevende glijvlakken

Bij grote overslag kunnen ook kleine, ondiepe afschuivingen tot doorgaande erosie leiden. Daarom kunnen zowel grote als kleine berekende glijvlakken maatgevend zijn. Deze moeten daarom beide worden beschouwd.

5 Resultaten en analyse

De beoordeling van de binnenwaartse macrostabiliteit volgens dit semi-probabilistisch recept behelst volgens de hier gepresenteerde verificatieprocedure twee afzonderlijke stabiliteitsberekeningen. Bij deze berekeningen horen twee verschillende sets rekenwaarden en twee verschillende schematisaties. Het ontwerp moet volgens beide berekeningen voldoen. Dit is vergelijkbaar met andere ontwerpverificaties waarin verschillende belastingcombinaties worden afgelopen.

6 Rekenvoorbeeld en cases

Stel de maximaal toelaatbare overstromingskans van een dijktraject is 1/3.000 per jaar en de trajectlengte is 34 km. In de faalkansbegroting is voor macrostabiliteit een faalkansruimte van 4% aangehouden. De faalkanseis voor macrostabiliteit op doorsnedeniveau $P_{eis,dsn,stbi}$ is dan 1/1.800.000 per jaar. De bijbehorende betrouwbaarheidsindex is 4,87.

A. Verificatie macrostabiliteit zonder significante golfoverslag

De schadefactor voor macrostabiliteit zonder significante golfoverslag is $0,15 \cdot 4,87 + 0,41 = 1,14$ (conform OI2014v4 CSSM).

Er wordt een macrostabiliteitsberekening uitgevoerd volgens de gebruikelijke werkwijze, waarbij geen rekening gehouden wordt met infiltratie door overslag. Deze berekening moet voldoen aan de veiligheidsfactoren, waaronder de schadefactor van 1,14.

B. Verificatie macrostabiliteit met significante golfoverslag

Stel de kans op overschrijding van 1 l/s/m is 1/8.500 per jaar. De faalkanseis voor macro-instabiliteit gegeven significante golfoverslag is dan $(1/1.800.000)/(1/8.500) = 1/206$. De geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede bij significante golfoverslag is $\beta_{eis,dsn,stbi,Q} = 2,59$, waarmee de schadefactor voor macrostabiliteit met significante golfoverslag 0,80 is.

De macrostabiliteitsberekening wordt uitgevoerd volgens de in dit memo opgenomen werkwijze, waarbij rekening gehouden wordt met infiltratie door overslag. De schematisatie van de freatische lijn zal hierdoor ongunstiger zijn dan bij berekening A. Echter, deze berekening moet voldoen aan de aangepaste, lagere schadefactor van 0,80.

Het ontwerp zal volgens verificaties A en B moeten voldoen.

In de bijgevoegde bijlage zijn twee cases als voorbeeld gegeven, waarbij de in dit memo opgenomen werkwijze is toegepast. Het betreft een case in het beheergebied van het hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en een case in het beheergebied van waterschap Rivierenland.

7 Terugmelding van ervaringen

In dit memo is een werkwijze gegeven om met de interacties tussen macrostabiliteit en golfoverslag om te gaan bij primaire waterkeringen. Gebruikers van dit memo wordt verzocht om contact met het KPR te houden en resultaten te delen. De resultaten worden gebruikt om de werkwijze te verbeteren. Daarom de volgende oproep: **Bij toepassing van deze werkwijze s.v.p. de resultaten delen via kpr@rws.nl zodat de methode en/of schematiseringsinstructie verbeterd kan worden.**

Referenties

R.B. Jongejan, M.M. de Visser (2017). Voorstel t.a.v. beoordeling macrostabiliteit incl. golfverslag, maart 2017.

Rijkswaterstaat (2017). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, OI2014 versie 4, januari 2017.

Rijkswaterstaat (2012). Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, 25 oktober 2012.

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

Bijlage 1 Voorbeeld Case Herwijnen – WSRL

1. Projectbeschrijving

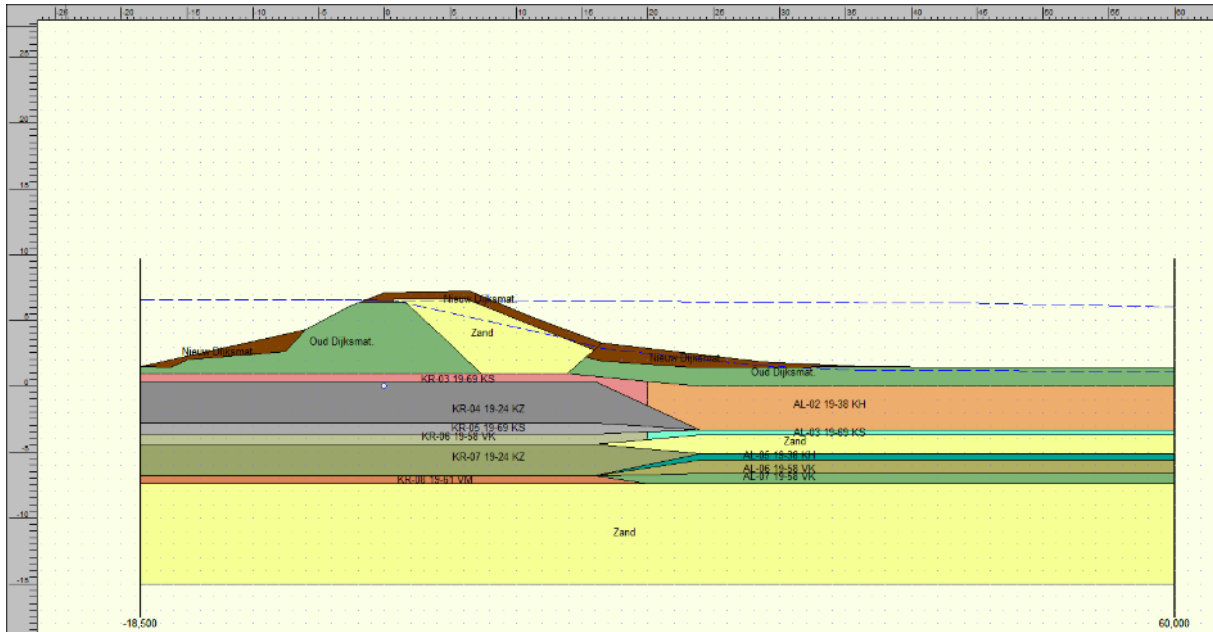
Deze case betreft een deel van de waterkering van het traject 43-6 onder beheer van het waterschap Rivierenland. Dit traject ligt aan de noordzijde van de Waal en maakt deel uit van het HWBP project Gorinchem-Waardenburg. In de verkenningsfase die is uitgevoerd door het waterschap zelf, is een nadere analyse gemaakt van een deel van het dijktraject waar de golfoverslag groter was dan 1 l/s/m in de huidige situatie, waarbij gerekend is met de maximaal toelaatbare faalkans. Hierbij is de methodiek 'Werkwijze macrostabiliteit bij golfoverslag' toegepast.



Figuur 2 Beschouwd dijkvak waarin significante golfoverslag binnen dijktraject 43-6 (rode arcering)

Het beschouwd dijkvak is gelegen tussen dijkpaal TG395 en TG402. Het dijkvak kenmerkt zich door het feit dat zich in het voorland een waterplas is gegraven. In de laatste dijkversterking is deze 'nieuwe' waterkering binnenwaarts versterkt en verhoogd door het aanbrengen van een zandaanvulling welke met een kleibekleding is afgedekt.

De bestaande kruinhoogte van de waterkering is bepaald op een niveau van NAP +7,1 m. De bij de norm (maximaal toelaatbare kans) bepaalde waterstand bedraagt NAP +6,56 m. In figuur 3 is de geometrie en de geschematiseerde grondopbouw weergegeven.



Figuur 3 Schematisatie grondopbouw ter hoogte van dijkpaal TG315.+040m

2. Normsituatie en veiligheidsfactoren

Traject 43-6 heeft een signaalwaarde van 1/30.000 per jaar en een maximaal toelaatbare overstromingskans (ondergrenswaarde) van 1/10.000 per jaar.

In de beschouwing wordt de berekende sterkte getoetst aan de eisen. Hierbij is onderscheid te maken tussen 2 faalgebeurtenissen: een situatie zonder overslag en situatie met overslag. Voor beide faalgebeurtenissen zijn afzonderlijke eisen geformuleerd [1].

Partiële veiligheidsfactoren zonder overslag

Voor de berekening van macrostabiliteit binnenwaarts spelen de volgende partiële factoren een rol: schadefactor, modelfactor, materiaalfactor en schematiseringsfactor. Voor de afleiding van de faalgebeurtenis zonder overslag gelden de vigerende handreikingen en richtlijnen. De materiaalfactoren zijn gelijk aan 1,0 en de modelfactor aan 1,06 (LiftVan). In dit voorbeeld is de schematiseringsfactor niet nader uitgewerkt en is een waarde van 1,2 aangehouden.

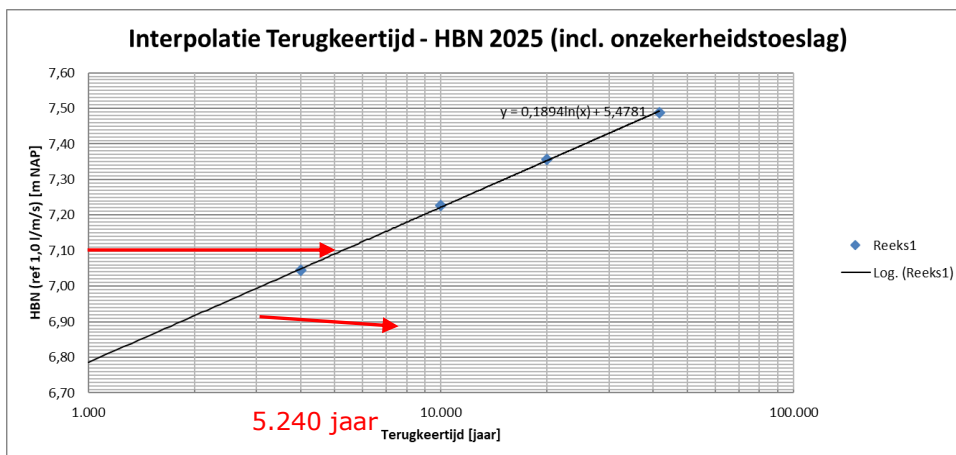
De maximaal toelaatbare overstromingskans van dit dijktraject is 1/10.000 per jaar en de trajectlengte is 46,7 kilometer. In de faalkansbegroting is voor macrostabiliteit een faalkansruimte van 4% aangehouden. De faalkanseis voor macrostabiliteit op doorsnedeniveau ($P_{eis,dsn,stbi}$) is daarmee dan $1,27 \cdot 10^{-07}$ per jaar (of te wel 1/8.000.000 per jaar). De bijbehorende betrouwbaarheidsindex is 5,16. De schadefactor voor macrostabiliteit zonder significante golfoverslag is: $0,15 \times 5,16 + 0,41 = 1,18$ [4].

Partiële veiligheidsfactoren voor de situatie 'met overslag'

Ten aanzien van de situatie met golfoverslag dient alleen de waarde van de schadefactor aangepast te worden. De overschrijdingskans van een overslagdebiet 1 l/m/s is afgeleid met behulp van Hydra-Zoet, zie figuur 9. Hierbij is op basis van de twee beschikbare databases voor de zichtjaren 2015 en 2050, voor het referentiejaar (jaar 2025) de terugkeertijd geïnterpoleerd. De bijbehorende overschrijdingsfrequentie blijkt gelijk aan ca. 1/5.240 per jaar. Hierbij is gerekend met onzekerheden (onzekerheidstoetslag = 0,3 m).

De ontwerppuntwaarde van de buitenwaterstand bij deze overschrijdingsfrequentie en derhalve bij een overslagdebiet van 1 l/m/s bedraagt NAP +5,9 m. Deze waterstand is de buitenwaterstand die in de macrostabiliteitsanalyse met overslag is geschematiseerd. Ook de stijghoogte en het verloop hiervan, zijn in deze berekening op basis van deze buitenwaterstand geschematiseerd.

actuele kruinhoogte	7,1	m+NAP (uit Mstab-profiel)	
			onzekerheidstoetslag = 0,30
	referentie 2015		
Terugkeertijd	HBN (1,0l/m/s)	HBN (ref 1,0l/m/s) incl onzekerheidstoetslag	
4.000	6,664	6,96	
10.000	6,846	7,15	
20.000	6,978	7,28	
41.666	7,111	7,41	
	referentie 2050		
Terugkeertijd	HBN (1,0l/m/s)	HBN (ref 1,0l/m/s) incl onzekerheidstoetslag	
4.000	6,948	7,25	
10.000	7,127	7,43	
20.000	7,255	7,56	
41.666	7,382	7,68	
	interpolatie 2025		
Terugkeertijd	HBN (1,0l/m/s)	HBN (ref 1,0l/m/s) incl onzekerheidstoetslag	
4.000	6,75	7,05	
10.000	6,93	7,23	
20.000	7,06	7,36	
41.666	7,19	7,49	



Figuur 4 Uitvoer Hydra-Zoet (zichtjaar 2025)

De faalkans voor macro-instabiliteit gegeven significante golfoverslag is dan $(1/7.995.500)/(1/5.240) = 1/1.520$. De bijbehorende betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede ($\beta_{eis,dsn,stbi,Q}$) is gelijk aan 3,21. De schadefactor gegeven golfoverslag, is dan vervolgens gelijk aan:

$$\gamma_n = 0,15 \times \beta_{T,stbi,q} + 0,41 = 0,15 \times 3,21 + 0,41 = 0,89$$

Overzicht van de partiële veiligheidsfactoren voor beide situaties

In tabel 2 zijn de partiële factoren voor zowel de situatie zonder als met golfoverslag weergegeven.

Tabel 2 Weergave partiële factoren voor situatie met en zonder golfoverslag

Partiële factor	Zonder golfoverslag	Met golfoverslag
Materiaalfactor	1,0	1,0
Modelfactor (LiftVan)	1,06	1,06
Schadefactor	1,18 ($\beta = 5,16$)	0,89 ($\beta = 3,21$)
Schematiseringsfactor	1,20	1,20
Stabiliteitsfactor (F_{eis})	1,50	1,13

3. Schematisatie van de situatie en resultaten

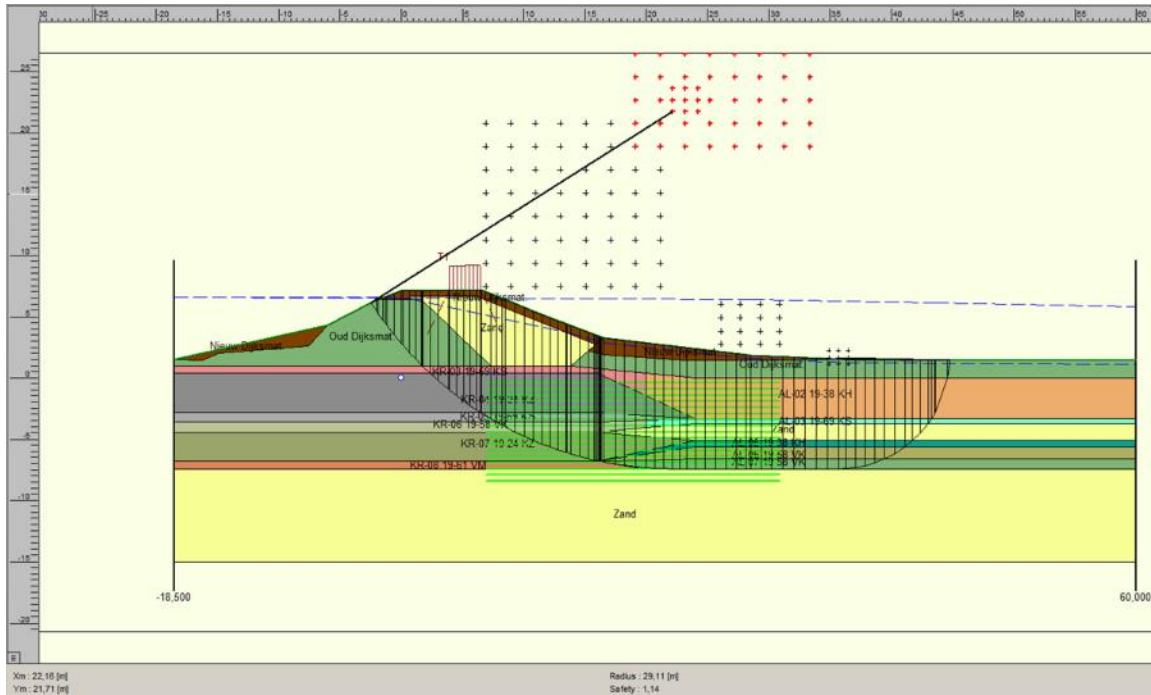
Schematisatie zonder golfoverslag

In deze uitwerking is gekozen voor de in de verkenningsfase opgestelde lokale schematisatie, welke gebaseerd is op een ter plekke uitgevoerd grondonderzoek. In de verkenningsfase is macrostabiliteit berekend met het CCSM-grondmodel en is de schuifsterkte van de ongedraineerde klei- en veenlagen bepaald op basis van de relatie met de in de kruin en het in achterland uitgevoerde sonderingen (zogenaamde DOV-methode [3]). Met deze methode is middels de module Su-measured in het programma DGeoStability de stabiliteit berekend.

Voor de schematisering van de stijghoogtes is het TR Waterspanningen bij dijken aangehouden [2]. In de beschouwing is een verkeersbelasting van 13 kPa over een breedte van 2,5 m vanaf de binnenkruinlijn meegenomen. Gevoeligheidsanalyses laten zien dat een dergelijke bovenbelasting een zeer gering effect heeft (verschil in stabiliteitsfactor tussen met en zonder belasting van circa 0,05), waardoor deze belasting voornamelijk op de waterkering is aangehouden.

De dijk bestaat uit een oude (gedeeltelijk afgegraven) kleidijk, waaraan tegen de binnenzijde middels een zandophoging met kleibekleding een dijkversterking heeft plaatsgevonden in de laatste dijkversterking halverwege de jaren negentig. Op deze manier is de oude dijk verhoogd en verbreed.

De buitenwaterstand bij de getalswaarde van de norm (maximaal toelaatbare faalkans) is uit eerdere veiligheidsanalyses overgenomen en bedraagt NAP +6,56 m. Dit betrof een beschouwing met onzekerheden en met een (onzekerheids)toeslag op de waterstand van 0,3 m (Hydra NL). Bij deze waterstand en met het TRWD bepaalde stijghoogteverloop en de aanwezige deklaagdikte kan opbarsten/opdrijven van het achterland worden uitgesloten.



Figuur 5 Resultaat stabiliteitsanalyse zonder golfoverslag (DGeoStability versie 18.1)

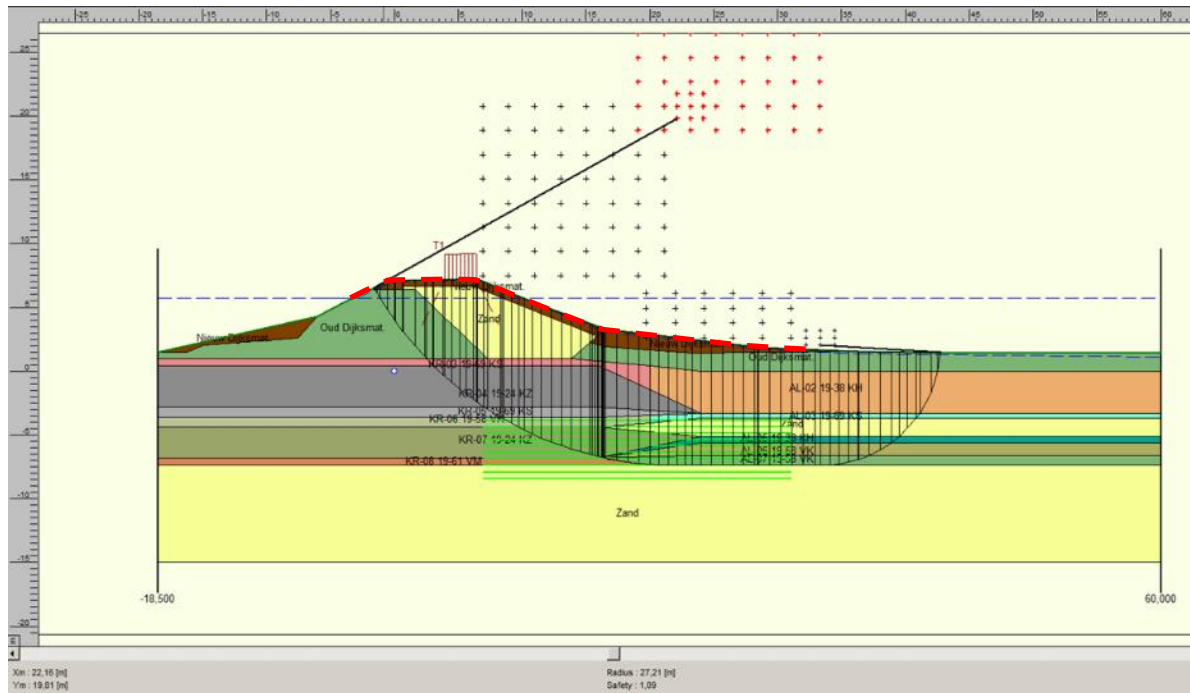
Uit het resultaat van de stabiliteitsberekening blijkt dat een diep snijdend glijvlak maatgevend is. Met dit glijvlak schuift de gehele kruin af en daarmee kan gesteld worden dat dit een zodanig grote afschuiving is, waardoor een overstroming zeer waarschijnlijk is.

Met een berekende stabiliteitsfactor van 1,14 wordt niet aan de vereiste veiligheid van 1,50 voldaan. Opgemerkt wordt dat ook bij een eventuele reductie van de schematiseringsfactor (tot de laagste mogelijke waarde van 1,0 en daarmee een eis van 1,25) niet aan de eis zal worden voldaan.

Schematisatie met golfoverslag

De schematisatie van de situatie met overslag wijkt af door een andere schadefactor en de grootte van de belasting (buitenwaterstand, stijghoogtes ondergrond en ligging freatische lijn). In de situatie met overslag is de buitenwaterstand bij de ontwerppunt met een overslag van 1 l/s/m benodigd. Dit is een waterstand van NAP +5,9 m. De freatische lijn is een aantal centimeters onder het maaiveldniveau van buitentalud, kruin en binnentalud geschematiseerd, zoals middels de gestreepte rode lijn in figuur 6 is aangegeven. Er wordt dus uitgegaan van een geheel verzadigd talud als gevolg van infiltratie door golfoverslag.

Als gevolg van overslag kunnen ook kleine afschuivingen tot doorgaande erosie leiden: zowel grote als kleine berekende glijvlakken kunnen daarom maatgevend zijn.



Figuur 6 Resultaat stabiliteitsanalyse met golfoverslag (DGeoStability versie 18.1)

Uit het resultaat van de stabiliteitsberekening blijkt in eerste instantie eveneens dat een diep snijdend glijvlak maatgevend is. Er is een stabiliteitsfactor van 1,09 berekend. Met dit glijvlak schuift de gehele kruin af.

Met een berekende stabiliteitsfactor van 1,09 wordt niet aan de vereiste veiligheid van 1,13 voldaan. Opgemerkt wordt dat bij een eventuele reductie van de schematiseringsfactor wel aan de eis zal worden voldaan. (Bij een schematiseringsfactor van 1,0 is de vereiste veiligheid 0,94.)

Ondiep snijdende glijvlakken

Uit een aanvullende analyse naar de ligging van het glijvlak (o.a. door het vergroten van het zoekgebied - gridpunten) blijkt dat voor de situatie met golfoverslag een ondiep snijdend glijvlak een lagere stabiliteitsfactor geeft. In figuur 7 is dit glijvlak weergegeven (situatie 1). Bij dit glijvlak schuift een groot gedeelte van de kruin en daarmee de tijdens de laatste dijkversterking aangebrachte verbetering af. Om meer zeker te zijn van de ligging van het maatgevende glijvlak is ook een berekening gemaakt met de rekenmethode Spencer. Met de rekenmethode Spencer wordt ongeveer dezelfde stabiliteitsfactor (0,72) berekend (situatie 2).

Eveneens is in deze figuur het ondiep snijdend glijvlak voor de situatie zonder golfoverslag weergegeven (situatie 3). Dit is met het model Spencer berekend. Deze blijkt met een veiligheid van 1,29 inderdaad veiliger te zijn dan het diep snijdend glijvlak, zoals in figuur 5 is gepresenteerd, waarmee dit niet het maatgevende glijvlak voor de situatie zonder golfoverslag betreft.

Situatie	Stabiliteit		
	[-]		
1. Ondiep snijdend glijvlak met overslag -LiftVan	0,75		
2. Ondiep snijdend glijvlak met overslag - Spencer	0,72		
3. Ondiep snijdend glijvlak zonder golfoverslag	1,29		

Figuur 7 Resultaat stabiliteitsanalyse met en zonder golfoverslag – ondiep snijdend glijvlak (DGeoStability versie 18.1)

Uit deze resultaten blijkt dat de ondiep snijdende glijvlakken voor de situatie met als zonder golfoverslag niet voldoen aan de hiervoor gestelde eisen (ook niet bij reductie van de schematiseringsfactor).

Opgemerkt wordt dat er soms discussie ontstaat over de vraag of ondiepe glijvlakken wel kunnen leiden tot een falen van de waterkering met een overstroming tot gevolg. Het KPR gaat er voor deze schematisatie vanuit dat ondiepe glijvlakken in een situatie met overslag kunnen leiden tot een overstroming. Vermoedelijk komt een groot gedeelte van het zandige kernmateriaal aan de oppervlakte te liggen. Omdat het overslagdebiet gedurende een langere periode zal aanhouden (dijkvak bevindt zich in overgangsgebied tussen boven en benedenrivierengebied) zal het erosiegevoelige zandige kernmateriaal snel eroderen.

Referenties

- [1] KPR notitie 'Voorlopige werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag.
- [2] TR Waterspanningen bij Dijken, TAW, 1 september 2004.
- [3] WBI 2017 Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, 1 december 2016.
- [4] RWS Handreiking ontwerp met overstromingskansen, versie 4, februari 2017
- [5] TR Grondmechanisch Schematiseren bij dijken, ENW, oktober 2012.

Bijlage 2 Voorbeeld Case Wieringerzeewering – HHSK

1. Projectbeschrijving

Deze case betreft een deel van de waterkering van het traject 12-1 onder beheer van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). Dit traject, een zeedijk, maakt onderdeel uit van het HWBP project Wieringer Zeewering. Uit eerdere veiligheidsanalyses is gebleken dat, uitgaande van vrij conservatieve uitgangspunten, op enkele delen van dit dijktraject een overslagdebiet van meer dan 1 l/s/m kon optreden (2,9 km). Deze delen waren ook afgekeurd op STBI. Uit recente beschouwingen met Hydra-NL bleek dat dit op de peildatum (2015) niet meer het geval is, maar op langere termijn wel. Om binnen de zichtduur van het ontwerp (jaar 2070) de robuustheid van de huidige dijk te beoordelen is besloten om ter voorbereiding van de verkenningsfase voor deze trajecten toch uit te gaan van een overslagdebiet van meer dan 1 l/s/m en de methodiek 'Werkwijze macrostabiliteit bij golfoverslag' toe te passen. Tegelijkertijd zijn ook nieuwe inzichten ten aanzien van het gedrag van keileem verwerkt in de analyse.



Figuur 8 locaties met significante golfoverslag (groen) binnen dijktraject 12-1 (rood).

De te beschouwen trajecten bestaan uit 2 delen en zijn gelegen tussen dijkpaal 19.1-20.9 (traject 1) en 22.3-23.4 (traject 2). Deze case beschrijft alleen traject 1.

2. Normsituatie en veiligheidsfactoren

Traject 12-1 heeft een signaalwaarde van 1/1.000 per jaar en een maximaal toelaatbare overstromingskans (ondergrenswaarde) van 1/1.000 per jaar. Voor de meeste trajecten in Nederland verschilt de signaalwaarde één normklasse van de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dat is bij traject 12-1 dus niet het geval.

In de beschouwing wordt de berekende sterkte getoetst aan de eisen. Hierbij is onderscheid te maken in 2 faalgebeurtenissen: een situatie zonder overslag en een situatie met overslag. Voor beide faalgebeurtenissen zijn afzonderlijke eisen geformuleerd [1].

Partiële veiligheidsfactoren zonder overslag

Voor de berekening van macrostabiliteit spelen de volgende partiële factoren een rol: schadefactor, modelfactor, materiaalfactor en schematiseringsfactor. Voor de afleiding van de faalgebeurtenis zonder overslag gelden de vigerende handreikingen en richtlijnen. De materiaalfactoren zijn gelijk aan 1,0 en de modelfactor aan 1,06 (LiftVan) [4]. Voor de schematiseringsfactor is in eerste instantie 1,3 aangehouden. Op de schematiseringsfactor wordt hieronder verder ingegaan.

De maximaal toelaatbare overstromingskans van dit dijktraject is 1/1.000 per jaar en de trajectlengte is 11.7km. In de faalkansbegroting is voor macrostabiliteit de standaard faalkansruimte van 4% aangehouden. Dit leidt tot een faalkanseis voor macrostabiliteit op doorsnedeniveau ($P_{eis,dsn,stbi}$) van 1/218.050 per jaar[3].

De bijbehorende betrouwbaarheidsindex is 4,44. De schadefactor voor macrostabiliteit, bij toepassing CSSM model, zonder significante golfoverslag is $0,15 \times 4,44 + 0,41 = 1,08$ [4].

Partiële veiligheidsfactoren met overslag

Ten aanzien van overslag wordt alleen de waarde van de schadefactor aangepast [1]. De kans op overschrijding van een overslagdebiet 1 l/s/m is afgeleid met behulp van Hydra-NL. In Hydra-NL wordt een HBN berekening gemaakt voor een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m en de geometrie van de waterkering. Van belang bij de berekening is dat een keuze moet worden gemaakt in de te hanteren database en statistiek. Dit zogenaamde rekenrecept is in deze case gebaseerd op het WBI. Waarbij een berekening is uitgevoerd van de kans op tenminste 1 l/s/m overslag bij de aanwezige kruinhoogte (zie ook onderstaande uitvoer). Uit de uitvoer is het HBN bij een overslagdebiet van 1 l/s/m te herleiden. De bijbehorende overschrijdingsfrequentie is gelijk aan 1/73.640 per jaar. Zie Figuur 9. Uit de figuur is ook het illustratie punt af te lezen. Dit punt geeft de combinatie van waterstand, golven en windrichting met de grootste bijdrage aan het HBN (meest rechtse kolom). Dit punt is nodig om de waterstand bij overslag te bepalen.

Illustratiepunten bij overslagdebiet 1.00 (l/s/m) en terugkeertijd 73640 (jaar)

Locatie = WZ_1_12-1_gk_00024 (126006,548230)
 Berekeningstype = Overslagdebiet-berekening bij aanwezige dijkhoogte van 9.43 (m+NAP)
 Overslagdebiet = 1.00 (l/s/m)
 Terugkeertijd = 73640 (jaar)
 Overschrijdingsfrequentie = 1.36E-05 (per jaar)

r	zeews. m+NAP	windsn. m/s	h,teen m+NAP	Hm0,teen m	Tm-1,0,t s	golfr graden	bijdrage ov. freq (%)
30.0	9.22	7.5	9.22	0.87	1.92	13.5	0.0
60.0	9.37	7.7	9.37	0.25	2.19	44.3	0.0
90.0	9.37	8.0	9.37	0.26	2.27	63.0	0.0
120.0	9.37	7.5	9.37	0.24	2.13	87.9	0.0
150.0	9.37	7.0	9.37	0.32	1.04	175.5	0.0
180.0	9.24	8.9	9.24	0.40	1.32	202.5	0.0
210.0	8.98	9.8	8.98	0.59	1.33	230.4	0.0
240.0	7.06	43.5	7.06	2.63	4.41	252.7	0.0
270.0	6.38	43.3	6.38	2.51	4.91	274.6	5.5
300.0	6.11	41.4	6.11	2.60	5.21	301.8	35.6
330.0	6.17	39.8	6.17	2.76	5.29	326.0	58.7
360.0	6.38	42.1	6.38	2.68	5.88	333.1	0.2
som							100.0

Figuur 9 uitvoer Hydra-NL

De faalkanseis voor STBI gegeven significante golfoverslag is dan $(1/218.050)/(1/73.640) = 1/3$. De bijbehorende betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede ($\beta_{eis,dsn,stbi,Q}$) is gelijk aan 0,42. De schadefactor is dan gelijk aan:

$$\gamma_n = 0,15 \times \beta_{T,stbi,q} + 0,41 = 0,15 \times 0,42 + 0,41 = 0,47$$

3. Schematisatie van de situatie

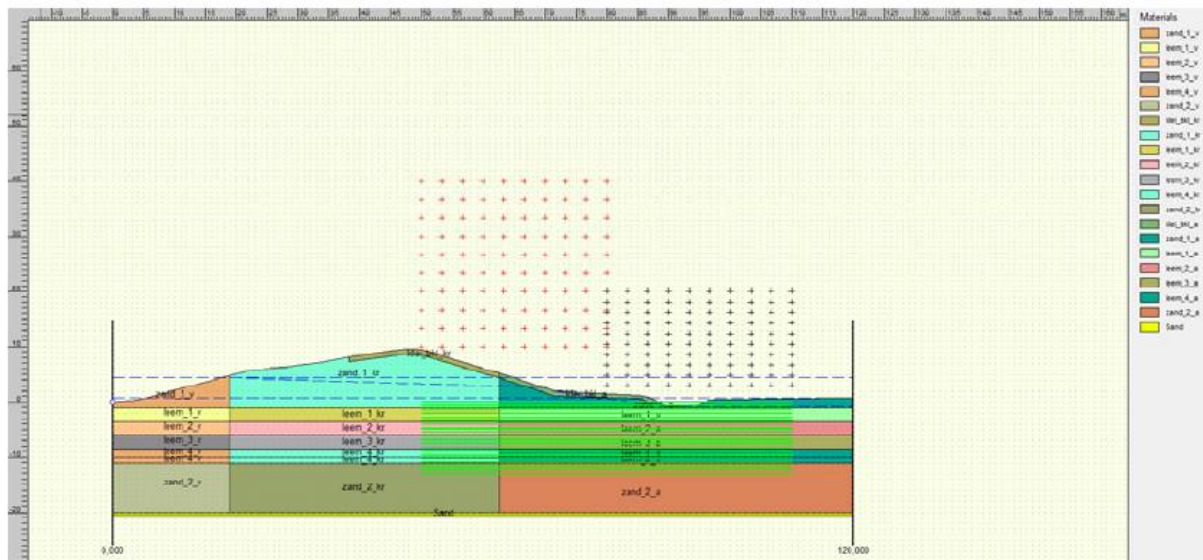
Schematisatie zonder golfoverslag

In deze uitwerking is de waterkering in een aantal dwarsdoorsnedes geschematiseerd. Op basis van een analyse van de geometrie van de waterkering in het traject is een maatgevende geometrie gekozen op grond van taludhellingen, aanwezigheid en ligging teensloten en berm. De schematisatie van de ligging van de grondlagen is gebaseerd op een eerdere analyse, het WTI-SOS en beschikbaar aanvullend grond- en laboratoriumonderzoek. De sterkte van grond is afgeleid van een beschikbare proevenverzameling van HHNK in combinatie met defaultwaarden uit de schematiseringshandleiding macrostabiliteit [3]. De mate van overconsolidatie van de ondergrond is gebaseerd op defaultwaarden [3]. Aansluitend op de laatste inzichten in het gedrag van kleileem is het keileem gedraineerd geschematiseerd [7]. Voor het volumiek gewicht van het grondwater is uitgegaan van zout water: $10,23 \text{ kN/m}^3$. Voor de schematisering van de stijghoogtes is het TR waterspanningen bij dijken aangehouden [2]. In de beschouwing is geen

verkeersbelasting meegenomen op kruin/binnenberm, conform de schematiseringshandleiding macrostabiliteit [3].

De dijk heeft een zandkern, voorzien van een dunne kleibekleding op een deel van het buitentalud, kruin en binnentalud. De (buiten) bekleding is open.

De buitenwaterstand bij de getalswaarde van de norm (maximaal toelaatbare faalkans) is uit eerdere veiligheidsanalyses overgenomen en bedraagt NAP+4,44m. Dit betrof een beschouwing waarbij de onzekerheden middels een toeslag op de buitenwaterstand van 0,4m zijn verwerkt.



Figuur 10 schematisatie deeltraject 1 in D-Geostability

Schematisatie met golfoverslag

De schematisatie van de situatie met overslag wijkt af door een andere schadefactor en de grootte van de belasting (buitenwaterstand, stijghoogtes ondergrond en ligging freatische lijn)[1].

Conform de methodiek [1] is in de situatie met overslag is de buitenwaterstand bij het ontwerppunt bij een overslag van 1 l/s/m benodigd. Dit leidt tot een buitenwaterstand van NAP+6,17m. Zie Figuur 9.

Als gevolg van overslag kunnen ook kleine afschuivingen tot doorgaande erosie leiden: zowel grote als kleine berekende glijvlakken kunnen daarom maatgevend zijn. Feitelijk is dit een andere invulling van de faaldefinitie zoals bij STBI zonder golfoverslag [3].

Schematiseringonzekerheden

Bij het bepalen van de schematiseringonzekerheden is de methode uit het TR grondmechanisch schematiseren [6] aangehouden. Grootste onzekerheden in dit traject betreffen de ligging van de freatische lijn en de geometrie. De betreffende trajecten kennen een grote variatie in de geometrie door bijvoorbeeld de aanwezigheid van een berm en of teensloot. Idealiter wordt een lang dijktraject met grote variaties in de geometrie opgedeeld in kleinere vakken. Dit zorgt voor grote reductie van schematiseringonzekerheden. Omdat in dit project met een beperkt aantal doorsnedes een beeld verkregen diende te worden is er voor gekozen om ten aanzien van de geometrie een conservatieve insteek te kiezen. In de basisschematisatie is daarom gekozen voor een profiel met een steil talud, smalle kruin, afwezigheid van een berm en de aanwezigheid van een teensloot. De invloed van de freatische lijn op de stabiliteit is nader uitgewerkt in 3 scenario's. Het basisscenario voor de situatie zonder overslag is geschematiseerd aan de hand van TRWD [7]. Gezien het profiel en de zandige samenstelling van de dijk ligt een lagere ligging van de freatische lijn voor de hand. Daarom zijn ook scenario's ontwikkeld met een lagere ligging van de freatische lijn. Deze scenario's geven een hogere stabiliteitsfactor.

De conservatieve keuzes in profiel en grondopbouw hebben geleid tot een zeer conservatieve schematisering. Dit betekent dat het aanhouden van een schematiseringsfactor van 1,3 te hoog is bij een toepassing van partiële veiligheidsfactoren (semi-probabilistisch). Bij de uitwerking is daarom gekozen voor een uitwerking in faalkansen per schematisatie (scenario) en een kans op

voorkomen van een schematisatie in plaats van een schematiseringsfactor. Dit is ook conform TRGS [6].

Schematisatie maatgevend glijvlak

Tot slot wordt opgemerkt dat ook de keuze van de ligging van het maatgevende glijvlak van belang is. In de situatie zonder golfoverslag dient het maatgevende glijvlak te leiden tot een overstroming. Dit betekent dat oppervlakkige afschuivingen niet van belang zijn voor het veiligheidsvraagstuk. Doorgaans steken maatgevende glijvlakken daardoor in de kruin in. In deze case is aangesloten bij de schematiseringshandleiding macrostabiliteit ofwel een insteek boven het niveau van halverwege het binnentalud.

Voor de situatie met golfoverslag moeten kleine ondiepe glijvlakken wel meegenomen worden omdat hierdoor de bekleding aan de binnenzijde zo beschadigd kan raken dat doorgaande erosie tot een overstroming leidt. In D-Geo Stability zijn geen beperkingen aan de insteek van het glijvlak opgelegd.

Gebruikte modellen en software

Alle gedraineerde en ongedraineerde parameters van de verschillende grondlagen zijn afgeleid voor het Critical State Soil Model (CSSM). Voor het glijvlakmodel is gekozen voor het LiftVan model (modelfactor 1,06) in D-Geo Stability versie 16.2. De berekeningen zijn gedraineerd uitgevoerd (met c, φ' benadering met $c=0$ kPa) omdat alleen zand en kleilemlagen aanwezig waren.

4. Resultaten

Faalgebeurtenis zonder golfoverslag

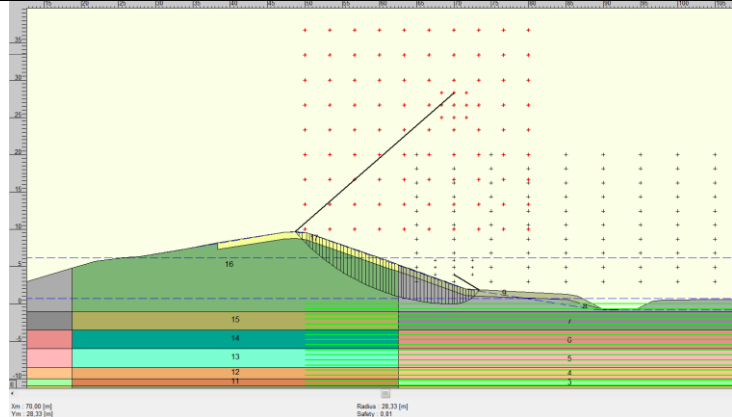
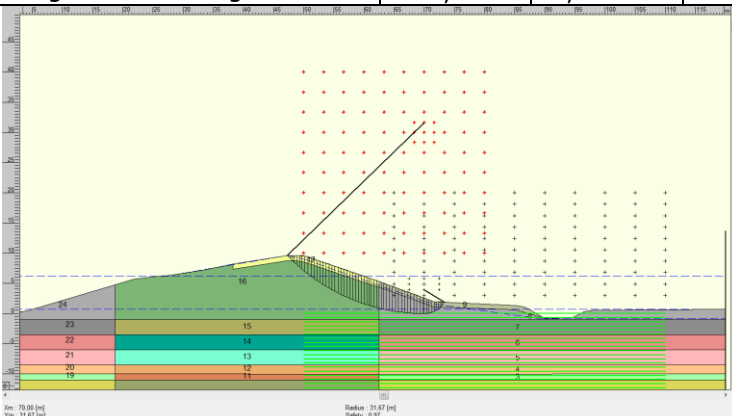
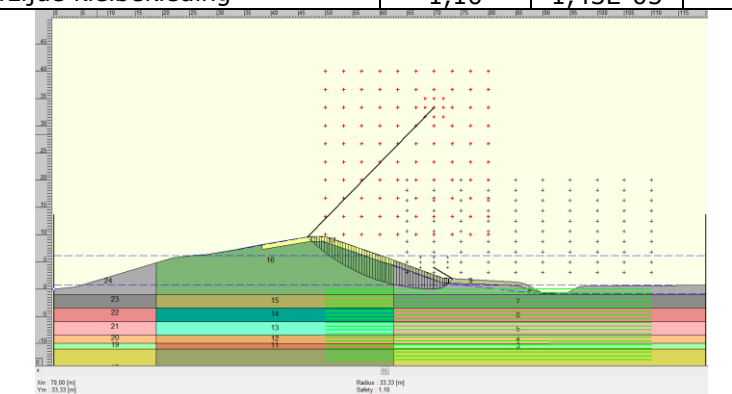
Voor deze situatie zijn 3 scenario's ontwikkeld waarbij de ligging van de freatische lijn (FL) als variabele gekozen is: (1) de basissom met een schematisatie conform TRWD (uittrede van FL op $0,25xH$), (2) een schematisatie waarbij de freatische lijn bij de teen de onderkant van de kleilaag volgt en een schematisatie waarin de freatische lijn nog lager ligt (3). De kansen op de scenario's zijn geschat op basis van expert judgement. De faalkans is bepaald volgens formule 5.4 van OI2014v4. De resultaten zijn gegeven in Tabel 3.

Faalgebeurtenis	Stabiliteit	Faalkans	Kans op scenario
[-]	[-]		[-]
1. Basissom (TRWD)	1,42	2,87E-10	0,10
2. FL onderzijde kleibekleding	1,52	4,35E-12	0,50
3. FL lineair	1,78	1,32E-17	0,40

Tabel 3 scenario's situatie zonder golfoverslag

Faalgebeurtenis met golfoverslag

Voor deze situatie zijn 3 scenario's ontwikkeld waarbij de ligging van de freatische lijn bepalend is: (1) de basissom met een volledig verzadigde dijk, (2) een scenario waarbij de freatische lijn halverwege de dikte van de bekleding ligt en (3) een scenario waarbij de freatische lijn aan de onderzijde van de kleilaag ligt. Bij de berekening van de faalkansen is rekening gehouden met de nieuwe schadefactor. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.

Faalgebeurtenis	Stabiliteit	Faalkans	Kans op scenario
[-]	[-]	[-]	[-]
1. Basissom (volledig verzadigd)	0,81	9,11E-03	0,10
			
2. FL halverwege kleibekleding	0,98	3,02E-04	0,20
			
3. FL onderzijde kleibekleding	1,10	1,43E-05	0,70
			

Tabel 4 scenario's situatie met golfoverslag

De kans op het optreden van beide faalgebeurtenissen is bepaald uit het combineren van de kans op verschillende (ondergrond)scenario's en de faalkans per scenario aan de hand van de rekenmethodiek uit bijlage B van het TR GS [6]. In Tabel 5 is het resultaat weergegeven samen met de eis waaraan de faalgebeurtenis moet worden getoetst. Deze toelaatbare faalkansen zijn te berekenen uit de β 's en de inverse van de standaardnormale verdeling [1]. Uit vergelijking volgt dat aan beide eisen wordt voldaan.

Faalgebeurtenis	P_f	$P_{\text{toelaatbaar}}$	Oordeel
Zonder overslag	$2,87 \times 10^{-10}$ p.jaar	$4,59 \times 10^{-6}$ p. jaar	Voldoet
Met overslag	$9,11 \times 10^{-3}$	$3,38 \times 10^{-1}$	Voldoet

Tabel 5 vergelijking faalkansen met en zonder overslag

Hieruit volgt voor deze case dat de beschouwde doorsnede voldoet aan de eis. Omdat de schematisatie conservatief gekozen is, zal naar verwachting de berekende faalkans nog lager kunnen uitkomen door de schematisatie van de geometrie te optimaliseren en het opdelen in dijkvakken mee te nemen.

Het is goed denkbaar dat in voorkomende gevallen de uitkomst gevoeliger is voor de variatie van de ligging van de freatische lijn dan in deze case met deze stevige grondslag. In dat geval kunnen geohydrologische berekeningen en/of metingen zinvol zijn.

Referenties

- [1] KPR notitie 'Werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag.
- [2] TR Waterspanningen bij Dijken, TAW, 1 september 2004.
- [3] WBI 2017 Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, 1 december 2016.
- [4] RWS Handreiking ontwerp met overstromingskansen, versie 4, februari 2017.
- [5] Actualisatie Veiligheidsopgave Wieringer Zeewering, HKV-lijn-in-water, PR 3141.30 Augustus 2017.
- [6] TR Grondmechanisch Schematiseren bij dijken, ENW, oktober 2012.
- [7] Resultaten Schuifsterkte Keileem Wieringen v2, Deltares, december 2016.