

Integrale benadering toegestaan golfoverslagdebiet

POV

MACRO
STABILITEIT



Auteurs:
Suzanna Zwanenburg
Paul van Steeg
Andre van Hoven

Datum: 17 december 2018

Versie: 4 (definitief)

Trefwoorden

Golfoverslag condities, golfoverslagdebiet, dijken, Ontwerpinstrumentarium, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium

Samenvatting

In Nederland zijn momenteel veel dijkversterkingsprojecten in ontwikkeling. Veelal dient daarbij ook de kruin verhoogd te worden omdat de dijk niet voldoet aan eisen gerelateerd aan de golfoverslagcondities. Het verhogen van de kruin van een dijk is vaak kostbaar en kan voor langdurige overlast zorgen voor bijvoorbeeld verkeer en omwonenden. Om die reden is het aantrekkelijk om alternatieve mogelijkheden te verkennen.

Ter ondersteuning van deze verkenning van alternatieven heeft Waterschap Rivierenland Deltares opdracht gegeven voor het uitvoeren van een consequentieanalyse met betrekking tot het verhogen van het toelaatbare golfoverslagdebiet. Deze opdracht is tot stand gekomen in het kader van de Project overstijgende Verkenning Macrostabieliteit (POV-M).

Afhankelijk van de verzameling met maatgevende condities voor golfoverslag heeft het toestaan van meer golfoverslag een geringe tot aanzienlijke invloed op de ontwerphoogte van de dijk.

Bij meer golfoverslag zal er een grotere belasting op het dijklichaam optreden. Daarom zal er met de volgende aspecten rekening gehouden moeten worden bij de afweging of het toestaan van zwaardere golfoverslagcondities haalbaar is:

- De bekleding (graszode) op de kruin en het binnentalud,
- Macrostabieliteit van het binnentalud,
- Objecten en overgangen op het binnentalud en/of de kruin,
- De begaanbaarheid van de dijk (verkeer, evacuatie, inspectie),
- Inspectiemogelijkheden van de dijk (begaanbaarheid en identificatie piping),
- Veiligheidsbeleving,
- Evenwichtssituatie van piping,
- Risico ten aanzien van grootschalige beschadigingen aan de dijk (zoals scheurvorming),
- Risico ten aanzien van graverij,
- Zonering met betrekking tot macrostabieliteit.

Op basis van een uitgevoerde semi-fictieve case lijken de lasten relatief laag te zijn en de baten (besparing kruinhoogte) mogelijk hoog. Echter, de lasten, maar vooral de baten, lijken sterk afhankelijk te zijn van de specifieke omstandigheden. Om die reden wordt aanbevolen om bij een dijkversterkingsproject de baten en lasten van het hanteren van een verhoogd toegestaan golfoverslagdebiet in kaart te brengen. Er wordt aangeraden dit op dijkvakniveau te doen en niet op dijktrajectniveau omdat de lasten en baten variabel zijn.

Het voorliggende rapport kan bij dergelijke baten-lastenanalyse als uitgangspunt worden gehanteerd.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	6
1.1. Achtergrond	6
1.2. Doel van de studie	6
1.3. Totstandkoming van dit rapport.....	7
1.4. Leeswijzer.....	7
2. Golfoverslagcondities en kruinhoogte	8
2.1. Technische achtergrond: parameterisering van golfoverslag.....	8
2.2. Ontwerp kruinhoogte en overslagcondities.....	9
2.2.1. Achtergrond ontwerp kruinhoogte met betrekking tot overslagcondities.....	9
2.2.2. Kruinhoogte en overslag gedurende de levensduur van de waterkering	9
2.3. Golfoverslagcondities in relatie tot storm gedreven en afvoer gedreven systemen.....	9
2.4. Golfoverslagcondities in relatie tot kruinhoogte	11
3. Invloed golfoverslagdebiet op ontwerp en beoordeling van de dijk.....	15
3.1. Inleiding	15
3.2. Ontwerp instrumentarium.....	16
3.3. Wettelijk beoordelingsinstrumentarium.....	18
3.4. Overzicht faalmechanismen in relatie tot golfoverslag.....	19
3.5. Verlies van secundaire functies.....	20
3.6. Overige onderwerpen waarbij het golfoverslagdebiet van invloed is.....	21
3.7. Overzicht van aandachtspunten ten aanzien van het golfoverslagdebiet.....	21
4. Uitwerking faalmechanismen	23
4.1. Inleiding, definities en afbakening	23
4.2. Macrostabieliteit binnenwaarts	24
4.2.1. WBI2017	24
4.2.2. OI2014v4.....	24
4.2.3. POVM Actuele sterkte – probabilistische rekenmethode Fragility curves	26
4.2.4. Kruinhoogte in relatie tot macrostabieliteit	30
4.2.5. Reststerkte na macro-instabiliteit (zonering van het binnentalud)	31
4.3. Stabieliteit bekleding binnentalud.....	33
4.3.1. OI2014v4.....	33
4.3.2. WBI2017	33
4.3.3. Vergelijking OI en WBI.....	36
4.4. Overige bijdragen aan faalmechanismen	36

4.4.1. Scheurvorming, graverij en andere beschadigingen	36
4.4.2. Piping	39
4.5. Samenvatting.....	40
5. Overgangen en discontinuïteiten	43
5.1. Inleiding	43
5.2. Ontwerp- en beoordelingsinstrumentaria.....	43
5.3. Beschouwing overgangen.....	44
5.3.1. Wegen.....	44
5.3.2. Op- en afritten	46
5.3.3. Rasterpalen	47
5.3.4. Trappen.....	47
5.3.5. Knik in de teen (of binnenwaartse berm)	49
5.3.6. Bomen.....	49
5.4. Aandachtspunt: schapen.....	50
5.5. Aandachtspunt: uitspoelend zand	51
5.6. Aandachtspunt: onderhoudbaarheid van de overgang	51
5.7. Samenvatting en conclusies.....	51
6. Secundaire functies van de dijk in relatie tot het golfoverslagdebiet.....	53
6.1. Inleiding	53
6.2. Begaanbaarheid van de dijk.....	54
6.2.1. Begaanbaarheid en weersomstandigheden.....	54
6.2.2. Begaanbaarheid en stabiliteit van de ondergrond.....	54
6.2.3. Begaanbaarheid en golfoverslag	54
6.3. Betrouwbaarheidseis van secundaire functies in relatie tot overstromingskansen	56
6.4. Samenvatting.....	57
7. Veranderingen in onderhoud en kwaliteitsborging bij hoger toelaatbaar golfoverslagdebiet.....	58
7.1. Beheer en onderhoud van de graszode op het binnentalud	58
7.2. Beheer en onderhoud met betrekking tot beschadigingen aan het binnentalud en de kruin.....	60
7.2.1. Dierlijke graverij.....	60
7.2.2. Menselijke graverij.....	61
7.2.3. Andere beschadigingen van niet-geotechnische aard.....	61
7.3. Samenvatting.....	62
8. Uitwerking casus: ontwerp van dijk met relatief hoog overslagdebiet.....	63
8.1. Inleiding	63
8.2. Hydraulische randvoorwaarden.....	63

8.2.1. Kruinhoogte en overslag gedurende de levensduur van de waterkering	66
8.3. Faalmechanismen dijk	66
8.3.1. Inleiding	66
8.3.2. Erosie grasbekleding – eisen aan graskwaliteit	67
8.3.3. Erosie grasbekleding: Overgangen en discontinuïteiten	68
8.3.4. Macrostabiliteit binnenwaarts.....	69
8.3.5. Microstabiliteit.....	71
8.3.6. Afschuiven (GABI)	71
8.4. Overige aandachtspunten	72
8.4.1. Beheer en onderhoud.....	72
8.4.2. Graverij en andere beschadigingen	72
8.5. Conclusies	72
9. Conclusies en aanbevelingen.....	74
9.1. Conclusies	74
9.2. Aanbevelingen	78
10. Referenties.....	80
A. Faalpadenschema.....	83
B. Geschiedenis van ontwerpen en beoordelen van dijken met betrekking tot golfoverslag	85
B.1 Golfoploophoogte	85
B.2 Van golfoploophoogte naar golfoverslagdebiet	85
B.3 Van golfoverslagdebiet naar stroomsnelheid	85
B.4 Van stroomsnelheid naar cumulatieve overbelastingsmethode.....	87
B.5 Van cum. overbelastingsmethode naar golfoverslagdebiet (WBI2017)	88
B.6 Ontwerpinstrumentarium (OI2014v4).....	90
B.7 Mogelijke verbeteringen WBI en OI	92
C. POVM Actuele sterkte - infiltratieproef.....	93
D. Voorbeeld hydraulische belastingniveaus.....	97
E. Uitwerking raamwerk functies en eisen	99
F. Rekenvoorbeeld kruinhoogtereductie bij maximaal overslagdebiet met betrekking tot begaanbaarheid van de dijk	101
F.1 Maximaal overslagvolume bij een overslagdebiet van 5 l/s/m en 10 l/s/m.....	101
F.2 Kruinhoogte bij toegankelijkheidseis van de dijk	102
G. Eisen aan de uiterste grenstoestand en bruikbaarheidsgrenstoestand bij dijken met stabiliteitsverhogende constructieve elementen	106
G.1 Inleiding.....	106
G.2 WBI2017	106

1. Inleiding

1.1. Achtergrond

In Nederland zijn momenteel veel dijkversterkingsprojecten in ontwikkeling. Veelal dient daarbij ook de kruin verhoogd te worden omdat de dijk niet voldoet aan eisen gerelateerd aan de golfoverslagcondities. Het verhogen van de kruin van een dijk is vaak kostbaar en kan voor langdurige overlast zorgen voor bijvoorbeeld verkeer en omwonenden. Om die reden is het aantrekkelijk om alternatieve mogelijkheden te verkennen zoals:

- Het beperken van de grootte van de golfcondities (golfhoogte en/of -periode).
 - Bijvoorbeeld het aanbrengen van een dam, een voorland of golf remmende vegetatie voor de dijk.
- Het beperken van de hoeveelheid golfoverslag.
 - Bijvoorbeeld het aanbrengen van een buitenberm, het verhogen van de ruwheid van het buitentalud of het aanbrengen van een kruinmuur.
- Het accepteren van meer golfoverslag over de dijk en indien nodig het aanpassen van de dijk aan deze zwaardere golfoverslagcondities.
 - Bijvoorbeeld het versterken van het binnentalud van de dijk.

Ter ondersteuning van deze verkenning van alternatieven heeft de POV-Macro stabiliteit, met Waterschap Rivierenland als penvoerder, Deltares opdracht gegeven voor het uitvoeren van een consequentanalyse met betrekking tot het verhogen van de toelaatbare golfoverslagcondities.

Er is bewust voor de term ‘golfoverslagcondities’ gekozen en niet voor de term ‘golfoverslagdebiet’. Dit omdat golfoverslagcondities op meerdere manieren kan worden uitgedrukt zoals overslagdebieten, stroomsnelheden en volumes.

De gangbare eis ten aanzien van golfoverslagcondities was een maximaal golfoverslagdebiet van gemiddeld 1 l/s/m. Wanneer ontworpen kan worden met een hoger golfoverslagdebiet, dan zou de benodigde kruinverhoging significant minder of zelfs niet nodig kunnen zijn. Bij het toestaan van een hoger golfoverslagdebiet kan bijvoorbeeld gedacht worden aan een debiet van 5 l/s/m of 10 l/s/m, zoals benoemd in het Ontwerp Instrumentarium (OI2014v4, zie [35]).

Bij zwaardere golfoverslagcondities zal er een grotere belasting op het dijklichaam optreden; er loopt immers meer water (en mogelijk met hogere snelheid) over de kruin en het binnentalud. Dit heeft mogelijk invloed op de verschillende faalmechanismen en faalpaden wat consequenties heeft voor de aanleg (zie OI2014v4 [35]), het beheer en onderhoud en de wettelijke beoordeling (WBI2017, zie [48]). Daarnaast zal meer overslag mogelijk effect hebben op de secundaire functies van de dijk. Deze consequenties worden in de onderhavige studie geanalyseerd.

1.2. Doel van de studie

Het doel van deze bureaustudie is om handvatten te bieden bij de afweging of het toestaan van zwaardere golfoverslagcondities een geschikt alternatief is voor het verhogen van een specifieke dijk of dijktraject. Allereerst geeft voorliggend rapport een overzicht van de aspecten waarmee rekening gehouden moet worden bij het ontwerp van een dijk wanneer er zwaardere golfoverslagcondities worden toegestaan en op welke aspecten zwaardere overslagcondities van invloed kunnen zijn. Deze bureaustudie is gebaseerd op het OI ([35])

en het WBI ([48]) met aanvullende informatie uit andere literatuur en recent onderzoek en gaat in op zowel rivier- als zeedijken. Vervolgens wordt ter illustratie een voorbeeldcasus uitgewerkt. Hierbij ligt de focus op het bovenriviereengebied.

1.3. Totstandkoming van dit rapport

Dit rapport is geschreven door Suzanna Zwanenburg, Paul van Steeg en Andre van Hoven van Deltares. De kwaliteitsborging is verzorgd door Mark Klein Breteler van Deltares. Dit rapport is geschreven in opdracht van de POVM.

1.4. Leeswijzer

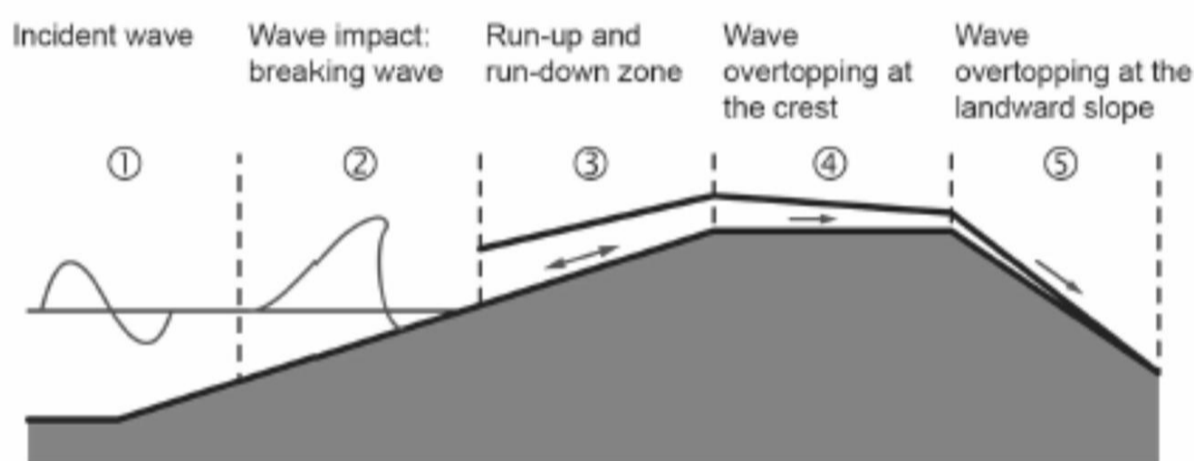
Allereerst wordt inzicht verschaft in de relatie tussen het golfoverslagdebiet en de kruinhoogte (Hoofdstuk 2). De besparing in de kruinhoogte kan immers worden gezien als de baten van het toestaan van een hoger golfoverslagdebiet. Vervolgens wordt een globaal overzicht gegeven van de overige consequenties (Hoofdstuk 3) welke verder worden toegelicht in specifieke hoofdstukken. Zo worden de verschillende faalmechanismen van de dijk uitgewerkt (Hoofdstuk 4) en is er specifieke aandacht voor de overgangen en discontinuïteiten in de bekleding (Hoofdstuk 5). Tevens is er aandacht voor de consequenties welke niet direct gekoppeld zijn aan waterveiligheid (Hoofdstuk 6) en de onderhoudsaspecten van de dijk (Hoofdstuk 7). Aan de hand van een case studie (Hoofdstuk 8) worden de genoemde aspecten geïllustreerd. Tot slot zijn de conclusies weergegeven in Hoofdstuk 9.

2. Golfverslagcondities en kruinhoogte

In dit hoofdstuk wordt allereerst een introductie gegeven over golfverslag; wat is golfverslag en welke parameters worden veelal gebruikt om golfverslag te beschrijven. Vervolgens wordt een introductie gegeven hoe de golfverslagcondities gebruikt worden bij het bepalen van de benodigde kruinhoogte van de dijk en wordt het verschil tussen golfverslag bij storm gedreven en afvoer gedreven systemen beschreven. Tenslotte geeft de laatste paragraaf een indicatie van de reductie van de benodigde kruinhoogte wanneer zwaardere golfverslagcondities kunnen worden toegestaan.

2.1. Technische achtergrond: parameterisering van golfverslag

Nadat een golf op een dijktaald breekt zal er een golftong het buitentalud oplopen en mogelijk over de dijk heen slaan. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Breken, oplopen en overslaan van een golf (Schüttrumpf, 2001)

Een enkele oplopende golftong kan worden gekarakteriseerd door het golfplooppniveau (verticaal ten opzichte van de stilwaterlijn in meters), golfneerloopniveau, de optredende snelheden (m/s) en de waterlaagdiktes (m). Indien deze oplooptong over de kruin heen slaat is er sprake van golfverslag. Golfverslag van een enkele overslaande golfplooptong kan worden uitgedrukt in het overslaande volume (per golf per strekkende meter dijk, l/m), de optredende snelheid op het binnentalud (m/s) en de laagdikte op het binnentalud (m).

In het geval van meerdere golven, golflopen en golfverslagen worden de hierboven genoemde parameters statistisch beschreven: zo heeft de golfploophoogte een bepaalde verdeling welke doorgaans wordt beschreven met een waarde welke door 2% van het totaal aantal golven wordt overschreden; $z_{2\%}$ (m). De over de kruin slaande hoeveelheid water wordt uitgedrukt in het gemiddelde golfverslagdebiet q ; dit is de gemiddelde hoeveelheid water welke er per seconde en per strekkende meter dijk over de kruin slaat (uitgedrukt in liter per seconde per meter dijk, l/s/m). Verder wordt het maximale volume water wat tijdens een stormduur per golf over de dijk heen slaat (V_{max}) uitgedrukt in liter per strekkende meter dijk, l/m. Tevens is het mogelijk om een verdeling van overslaande volumes, snelheden of laagdiktes te berekenen.

2.2. Ontwerp kruinhoogte en overslagcondities

2.2.1. Achtergrond ontwerp kruinhoogte met betrekking tot overslagcondities

In het verleden was de golfoploophoogte ($z_2\%$) en later het gemiddeld golfoverslagdebiet (q) de belangrijkste belastingparameter ten aanzien van het bepalen van de kruinhoogte van de dijk. Hoewel het OI2014 en het WBI2017 nog steeds gebruikmaken van de golfoverslagdebieten dient opgemerkt te worden dat de onderliggende onderbouwing van deze overslagdebieten zijn gebaseerd op een andere methode: de cumulatieve overbelastingmethode (zie Bijlage B.4 voor en toelichting op deze methode). Bij deze methode wordt per overslaande golf de optredende snelheid vergeleken met de kritieke stroomsnelheid van een bepaalde kwaliteit graszode.

Het gemiddelde golfoverslagdebiet blijft echter de meest gehanteerde belastingparameter. Zo kunnen dijken ontworpen worden op een gemiddeld golfoverslagdebiet van 1 l/s/m, 5 l/s/m of 10 l/s/m zolang de geotechnische stabiliteit, de stabiliteit van de bekleding en de functies van de dijk maar gewaarborgd blijven. Als achtergrond van de huidige ontwerp en beoordelingsmethodiek met betrekking tot de golfoverslagcondities is in Bijlage B van dit rapport een overzicht van de geschiedenis van ontwerpen en beoordelen met betrekking tot de golfoverslagcondities gegeven. Alle aspecten waarmee rekening moet worden gehouden wanneer er binnen de huidige methodiek een hoger golfoverslagdebiet wordt gekozen voor het ontwerp van de dijk wordt beschreven in Hoofdstuk 3.

2.2.2. Kruinhoogte en overslag gedurende de levensduur van de waterkering

De maatgevende overslagcondities zullen gedurende de levensduur van de waterkering veranderen; de hydraulische belastingen nemen doorgaans toe wanneer er langere zichtjaren worden gehanteerd. Verder wordt er bij het ontwerp van de dijk rekening gehouden met zetting, klink en bodemdaling. De dijk wordt hoger aangelegd zodat deze de gehele levensduur ten minste de benodigde kruinhoogte heeft behorende bij de maatgevende hydraulische belasting en toegestane overslagcondities. Zo is het goed denkbaar dat de maatgevende overslagcondities aan het einde van de levensduur bijvoorbeeld 10 l/s/m zijn terwijl deze in het begin van de levensduur beduidend lager zijn.

2.3. Golfoverslagcondities in relatie tot storm gedreven en afvoer gedreven systemen

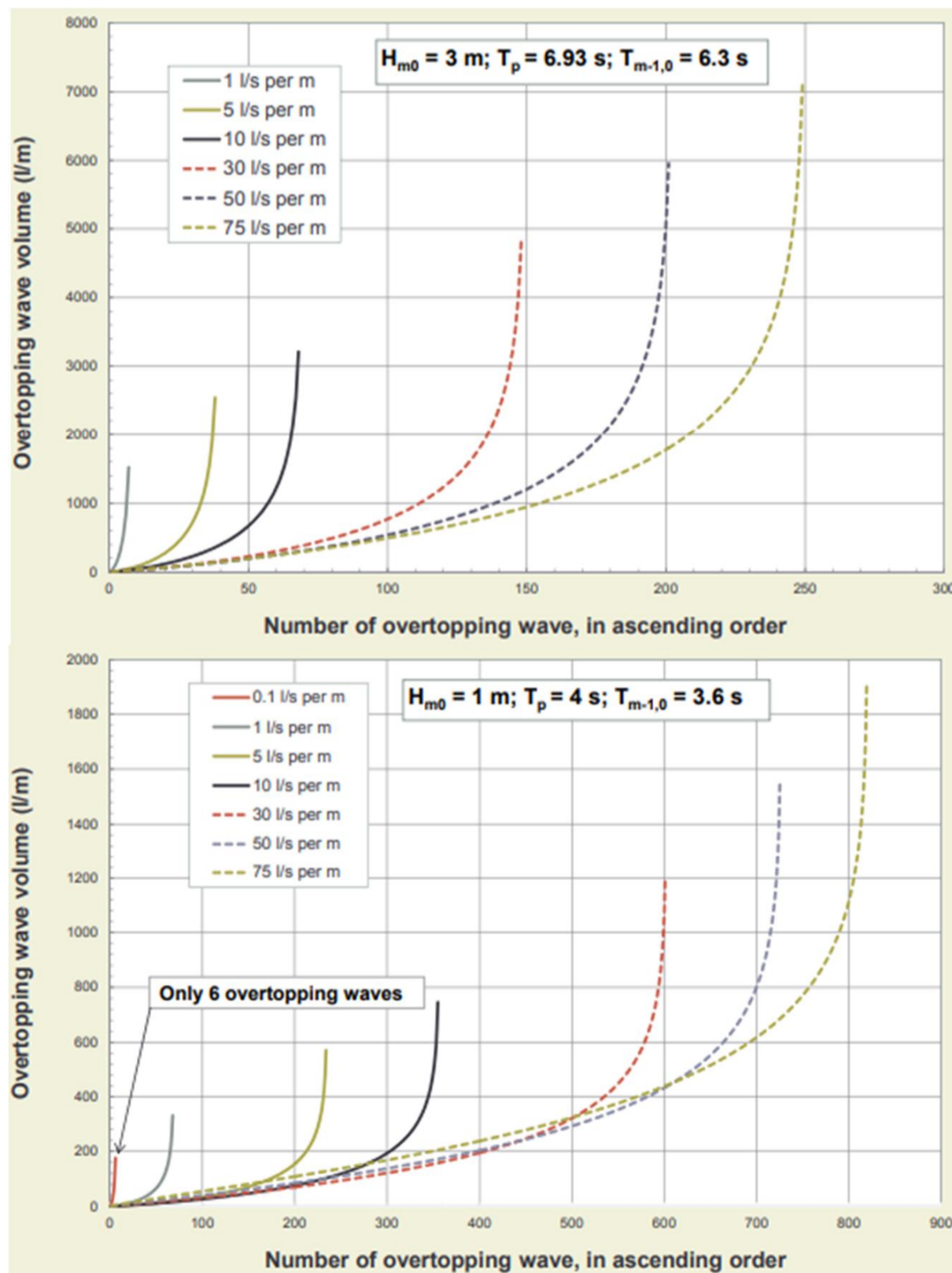
Golfoverslag is relevant voor waterkeringen langs de kust, meren en rivieren. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt in een storm gedreven systeem (zoals kust en oostzijde van IJsselmeer en Markermeer) en een afvoer gedreven systeem (zoals rivieren). De typerende condities kunnen echter vrij verschillend zijn.

Bij afvoer gedreven systemen, zoals rivierdijken, is doorgaans een relatief hoge waterstand ten opzichte van de kruin in combinatie met relatief lage golven maatgevend voor het overslagdebiet over de dijk. Onder relatief lage golven worden typisch golven van 0,25 – 1 m verstaan. Bij een hoge waterstand in combinatie met lage golven zullen veel van deze golven over de dijk heen slaan, maar zal het volume van het overslaande water per golf klein zijn. Het maximale overslagvolume van een golf (V_{max}) zal eveneens relatief klein zijn.

Bij storm gedreven systemen, zoals zeedijken, is de maatgevende waterstand doorgaans relatief laag ten opzichte van de kruin in combinatie met relatief hoge golven. Een typerende

maatgevende golfhoogte voor enigszins beschutte zeedijken is in de orde van 1 – 3 m. Voor zeedijken in diep water kunnen typerende maatgevende golfhoogtes in de orde van 3 – 4,5 m voorkomen. Bij een lage waterstand in combinatie met hoge golven zullen er relatief weinig golven over de dijk slaan, maar is het overslagvolume per golf wel relatief groot. Het maximale overslagvolume van een golf (V_{max}) zal eveneens relatief groot zijn.

Ter illustratie van dit verschil in typerende golfoverslagcondities is in figuur 2.2 een voorbeeld uit het EurOtop handboek voor golfoverslag (referentie [20]) opgenomen. In de bovenste grafiek van figuur 2.2 is te zien dat tijdens stormcondities van 1 uur met een significante golfhoogte van 1 m orde 350 golven over de dijk slaan bij een gemiddeld golfoverslagdebiet van 10 l/s/m. Het maximale overslagvolume is orde 750 l/m. In de onderste grafiek van figuur 2.2 is te zien dat er bij dezelfde stormduur en hetzelfde golfoverslagdebiet maar orde 65 golven over de dijk slaan met een significante golfhoogte van 3 m. Het maximale overslagvolume is echter wel veel groter, orde 3200 l/m.



Figuur 2.2 Aantal overslaande golven en bijbehorend overslagvolume gedurende een storm van 1 uur (Bron: EurOtop handboek voor golfoverslag [20])

Naast de overslagcondities is er doorgaans ook een verschil in waarschuwingstijd en belastingduur tussen afvoer en storm gedreven systemen. Een extreem hoge afvoer van rivieren is doorgaans een aantal dagen van tevoren te voorspellen en de belasting van de bijbehorende hoge waterstand houdt doorgaans ook in orde van dagen aan. Een extreme waterstand door stormopzet in combinatie met stormgolven is echter in de orde van uren tot een dag van tevoren te voorspellen en de belastingduur is doorgaans eveneens in de orde van uren tot een dag. Dit geeft bij afvoer gedreven systemen meer mogelijkheid tot evacuatie dan bij storm gedreven systemen.

Verder zal bij storm gedreven systemen de windkracht vaak wat groter zijn dan bij afvoer gedreven systemen (ondanks dat het bij maatgevende condities van afvoer gedreven systemen ook flink kan stormen). De windkracht beïnvloedt de begaanbaarheid, de inspecteerbaarheid en de werkbaarheid bij noodreparaties.

Tenslotte is de typische opbouw van dijken in een afvoer gedreven systeem verschillend van de typische opbouw van dijken in een storm gedreven systeem. Zeedijken zijn typisch opgebouwd uit een zandkern met een kleilaag en een zetsteen-, asfalt en/of gras bekleding. Rivierdijken bestaan vaak grotendeels uit klei met een zetsteen en/of grasbekleding. Bij zeedijken en rivierdijken kunnen daarom andere geotechnische aspecten een rol spelen in relatie tot golfoverslag.

In dit rapport zullen de consequenties van het verhogen van het golfoverslagdebiet in zijn algemeenheid behandeld worden. Niet alle genoemde aspecten zullen van toepassing zijn op een waterkering in een afvoer gedreven dan wel storm gedreven systeem. Per geval zullen de relevante aspecten geselecteerd moeten worden om vervolgens een analyse te kunnen maken van de consequenties van het verhogen van de toegestane golfoverslagcondities.

2.4. Golfoverslagcondities in relatie tot kruinhoogte

De benodigde kruinhoogte van een dijk die hoort bij bepaalde eisen ten aanzien van de golfoverslagcondities is afhankelijk van de hydraulische condities en de geometrie van de dijk. Dit hoofdstuk geeft een indruk wat het effect is van een verandering in de toelaatbare golfoverslagcondities op de benodigde kruinhoogte van een dijk. Om deze invloed van het toelaatbare overslagdebiet op de benodigde kruinhoogte te bekijken worden allereerst de kenmerkende ontwerpcondities en dijk geometrieën beschreven. Vervolgens wordt beschreven wat dit betekent voor rivierdijken en zeedijken.

De maatgevende condities voor het overslagdebiet over een dijk worden gevormd door vele combinaties van waterstanden en golfcondities (golfhoogte, golfperiode en golfinvalshoek). Wanneer een groter overslagdebiet wordt toegestaan kunnen weer andere combinaties van waterstanden en golfcondities maatgevend worden. Kenmerkende golfcondities met betrekking tot golfoverslag variëren van vrij lage golven (in combinatie met een hoge waterstand) tot vrij hoge golven (in combinatie met een lage waterstand). Daarom is er naar een reeks verschillende golfhoogten gekeken (0,25 m, 0,5 m, 1 m en 2 m) om inzicht te geven in de benodigde kruinhoogte in relatie tot het toelaatbare overslagdebiet. Verder is een golfsteilheid (gebaseerd op de piekperiode) van 2% tot 4% kenmerkend voor maatgevende condities voor golfoverslag. Tevens is er aangenomen dat de maatgevende hydraulische conditie gelijk blijft bij een andere kruinhoogte of een ander hydraulisch

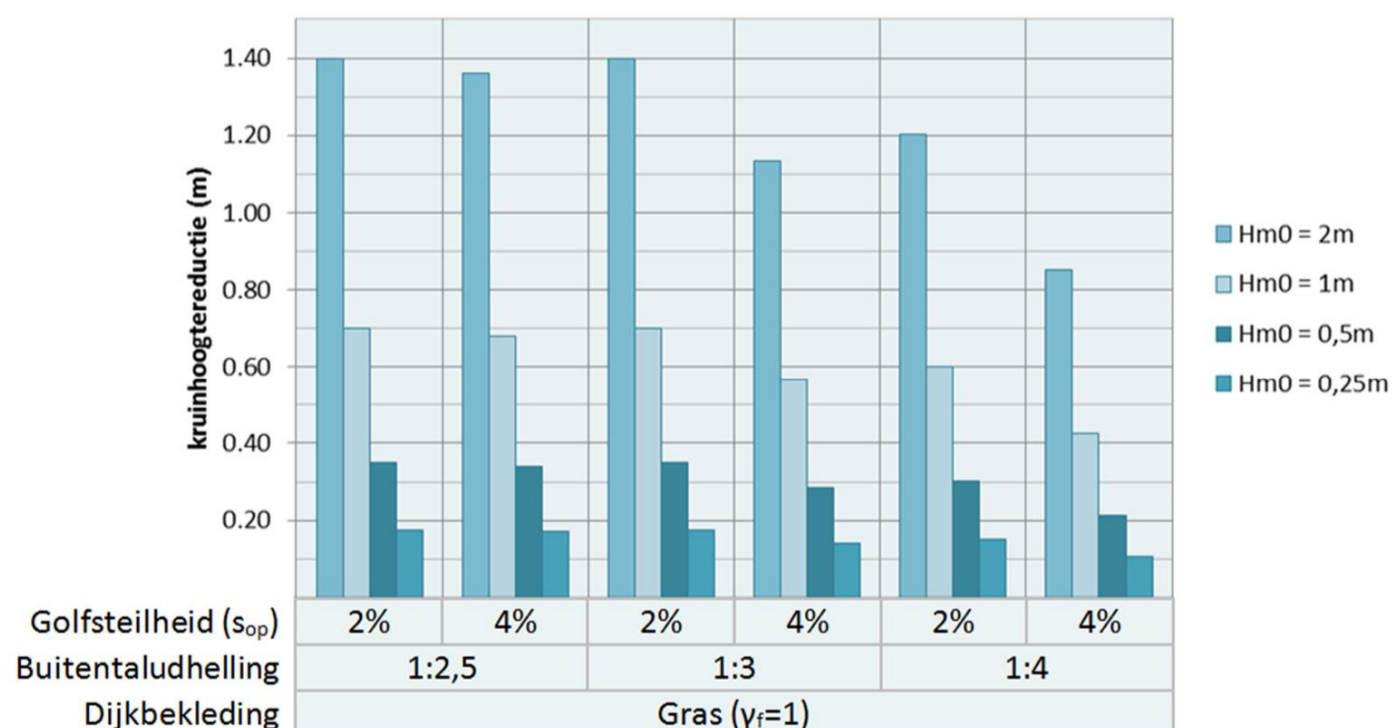
belastingsniveau (in dit geval golfoverslagdebiet). Hoewel dit in de nieuwe beoordelingsmethodiek niet het geval is (zie onder andere Rijkswaterstaat, 2017) wordt er hier vanwege de illustratieve doeleinden, voorsnog wel van uitgegaan. De verwachting is echter dat deze verschillen klein zijn.

Een kenmerkende geometrie van een dijk heeft doorgaans een taludhelling tussen 1:2,5 en 1:4. De bekleding van het buitentalud rond de maatgevende waterstand van rivierdijken is doorgaans van gras en soms van zetsteen. Dit zijn beide gladde materialen met een ruwheidsfactor in de orde van 0,9 – 1,0. Voor de vergelijking van de benodigde kruinhoogte is een grastalud genomen¹.

Voor verschillende combinaties van bovenstaande condities is de benodigde kruinhoogte ten opzichte van de waterstand bepaald wanneer er een overslagdebiet van 1 l/s/m wordt toegestaan, zoals nu veelal het geval is. Verder is de benodigde kruinhoogte bepaald voor de gevallen waar het toelaatbare overslagdebiet verhoogd is naar 5 l/s/m en 10 l/s/m. Vervolgens is bepaald wat de reductie in benodigde kruinhoogte is die behaald kan worden door het overslagdebiet van 1 l/s/m te verhogen naar respectievelijk 5 l/s/m en 10 l/s/m.

Figuur 2.3 geeft deze kruinhoogtereductie wanneer het gemiddeld overslagdebiet wordt verhoogd van 1 l/s/m naar 5 l/s/m. De kruinhoogtereductie wanneer het gemiddeld overslagdebiet wordt verhoogd van 1 l/s/m naar 10 l/s/m wordt gegeven in Figuur 2.4.

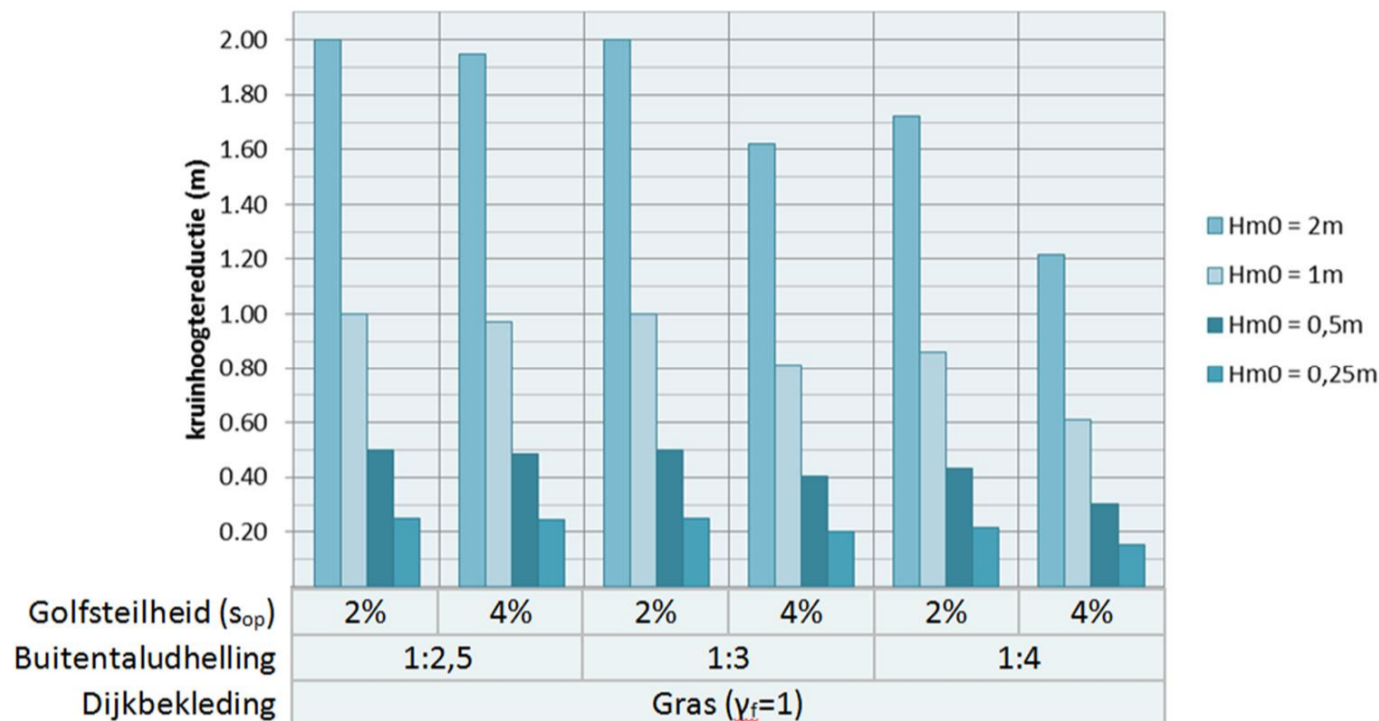
In Figuur 2.3 is te zien dat voor golfcondities met een significante golfhoogte van 0,25 m bij het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet van 1 l/s/m naar 5 l/s/m een 0,11 m tot 0,17 m lagere dijk kruin mogelijk is. Voor golfcondities met een grotere significante golfhoogte heeft het verhogen van het gemiddelde overslagdebiet meer effect op de kruinhoogte. Zo kan bij een significante golfhoogte van 2 m de kruin van een dijk 0,8 m tot 1,4 m lager zijn wanneer een gemiddeld overslagdebiet van 5 l/s/m wordt toegestaan in plaats van 1 l/s/m.



Figuur 2.3 Indicatie van reductie in benodigde kruinhoogte bij verhogen van het gemiddeld overslagdebiet van 1 l/s/m naar 5 l/s/m

¹ Gras heeft een ruwheidsfactor van orde 1 voor grotere golven; bij kleinere golven (lagere golfhoogte dan 0,75 m) gedraagt gras zich ruwer en wordt de ruwheidsfactor kleiner. Bij de voorbeeld berekeningen in dit hoofdstuk is echter voor alle golfhoogten een ruwheidsfactor van 1 aangehouden zodat de berekeningen een representatieve indicatie geven voor taluds met zowel gras als steenzettingen.

In Figuur 2.4 is te zien dat voor golfcondities met een significante golfhoogte van 0,25 m bij het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet van 1 l/s/m naar 10 l/s/m een 0,15 m tot 0,25 m lagere dijkkruijn mogelijk is. Voor golfcondities met een grotere significante golfhoogte heeft het verhogen van het gemiddelde overslagdebiet meer effect op de kruinhoogte. Zo kan bij een significante golfhoogte van 2 m de kruin van een dijk 1,2 m tot 2,0 m lager zijn wanneer een gemiddeld overslagdebiet van 10 l/s/m wordt toegestaan in plaats van 1 l/s/m.



Figuur 2.4 Indicatie van reductie in benodigde kruinhoogte bij verhogen van het gemiddeld overslagdebiet van 1 l/s/m naar 10 l/s/m

Afhankelijk van de verzameling met maatgevende condities voor golfoverslag heeft het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet een geringe tot aanzienlijke invloed op de ontwerphoogte van de dijk.

Bij rivierdijken treden doorgaans lagere golven op dan bij zeedijken. De verzameling met maatgevende combinaties van waterniveaus en golfcondities zal bij rivierdijken golfcondities bevatten met een significante golfhoogte in de orde van 0,25 – 1 m. Het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet van 1 l/s/m naar 5 l/s/m zal daarom een kruinhoogtereductie kunnen geven in de orde van 0,1 m a 0,4 m. Bij het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet van 1 l/s/m naar 10 l/s/m kan een kruinhoogtereductie verwacht worden in de orde van 0,2 m a 0,5 m.

Bij zeedijken zal de verzameling met maatgevende condities golfcondities bevatten met een significante golfhoogte in de orde van 0,5 m tot meer dan 2 m. Het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet van 1 l/s/m naar 5 l/s/m zal daarom een kruinhoogtereductie kunnen geven in de orde van 0,2 m a 0,7 m. Bij het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet van 1 l/s/m naar 10 l/s/m zal een kruinhoogtereductie verwacht kunnen worden in de orde van 0,3 m a 1 m. Het bovenstaande is samengevat in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Inschatting kruinhoogtereductie bij rivier- en zeedijken

	Typische golfhoogte	Kruinhoogtereductie bij verhogen van het overslagdebiet van 1 l/s/m naar	
		5 l/s/m	10 l/s/m
Rivierdijken	$H_s = 0.25 - 1$ m	Orde 0,1 – 0,4 m	Orde 0,2 – 0,5 m
Zeedijken	$H_s = 0.5 - 2^+$ m	Orde 0,2 – 0,7 m	Orde 0,3 – 1 m

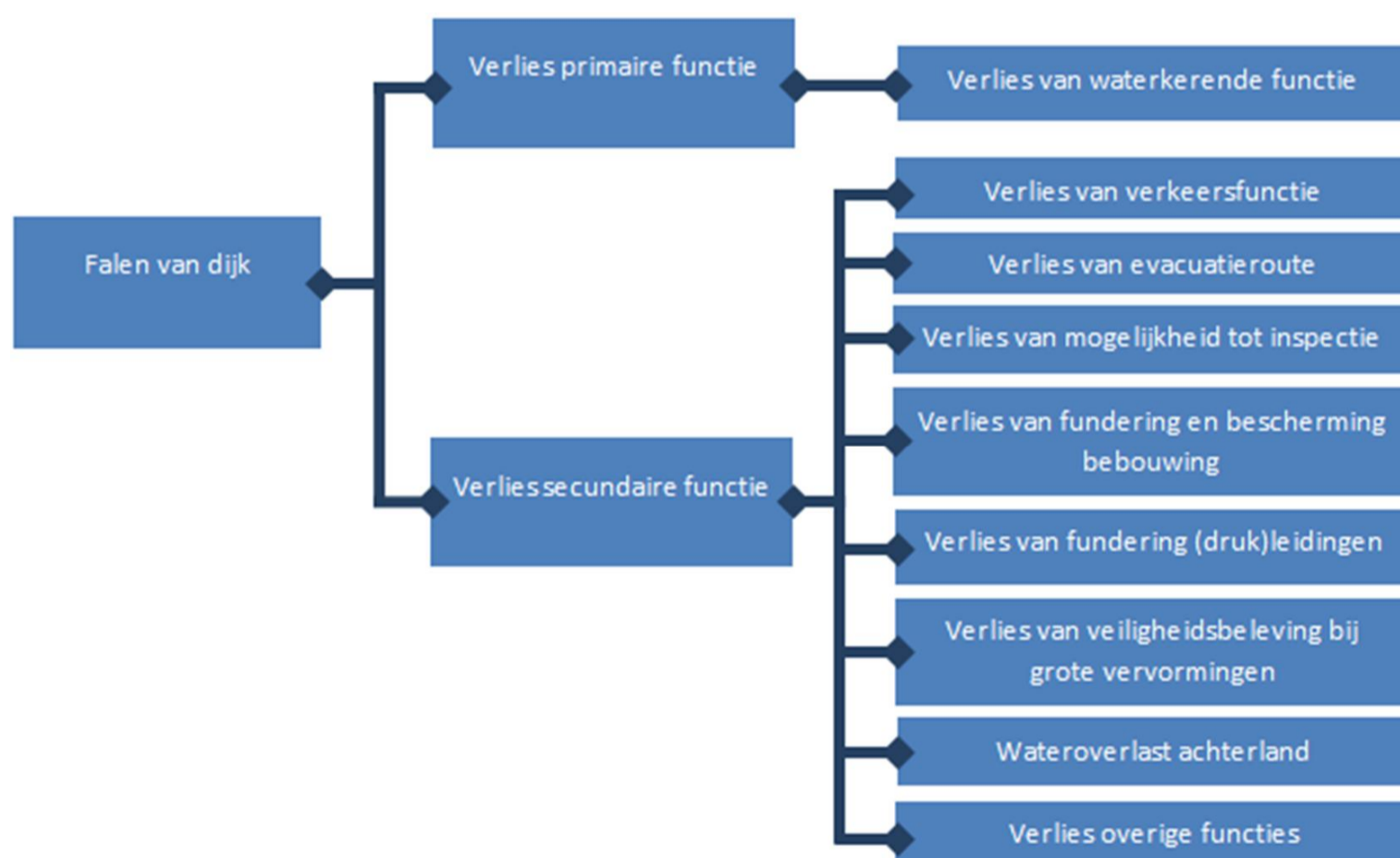
3. Invloed golfoverslagdebiet op ontwerp en beoordeling van de dijk

3.1. Inleiding

Golfoverslagcondities met een hoger golfoverslagdebiet zullen resulteren in een grotere belasting op het dijklichaam. Met deze grotere belasting dient rekening gehouden te worden bij het ontwerp van de dijk en de beoordeling van een bestaande dijk. Dit hoofdstuk geeft een globaal overzicht van de aspecten waar de golfoverslagcondities van invloed zijn. Enkele van deze aspecten worden in volgende hoofdstukken verder toegelicht.

Bij het ontwerpen van dijken in Nederland wordt doorgaans het Ontwerpinstrumentarium (referentie [35]) als uitgangspunt genomen. Daarom wordt allereerst in Paragraaf 3.2 globaal gekeken op welke ontwerpaspecten uit het Ontwerpinstrumentarium het overslagdebiet van invloed is.

Een hoger golfoverslagdebiet en daarmee grotere belasting op het dijklichaam heeft ook invloed op de verschillende faalmechanismen en faalpaden van de dijk. Daarmee wordt bedoeld dat andere faalmechanismen of sequentie van faalmechanismen maatgevend kan worden. Door een hoger overslagdebiet toe te staan kan de dijk op een ander mechanisme falen. Naast een primaire waterkerende functie heeft een dijk ook secundaire functies. Wanneer de dijk secundaire functies verliest door het verhoogde overslagdebiet kan de overslagdebietverhoging ook onaanvaardbaar zijn. Secundaire functies zijn bijvoorbeeld het bieden van een evacuateroute bij calamiteiten of de mogelijkheid tot dijkinspectie tijdens zware condities. In Figuur 3.1 is het falen van een dijk schematisch weergegeven. Hierbij wordt opgemerkt dat de term ‘falen’ hier een bredere definitie heeft dan het falen vanuit het oogpunt van de hoogwaterbescherming.



Figuur 3.1 Overzicht faalmogelijkheid dijk

In hoeverre het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet invloed heeft op de primaire waterkerende functie van de dijk is in paragraaf 3.3 aan de hand van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017 [48]) bekeken. De invloed van het verhogen van het toelaatbare overslagdebiet op de secundaire functies van de dijk is beschreven in paragraaf 3.5.

Tenslotte worden overige onderwerpen, die niet aan bod komen in het Ontwerp-instrumentarium of het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium, gegeven in paragraaf 3.6.

De in dit hoofdstuk behandelde aspecten en onderwerpen waarop het overslagdebiet van invloed is worden in de volgende hoofdstukken in detail geanalyseerd.

3.2. Ontwerp instrumentarium

In het Ontwerpinstrumentarium komt het toelaatbare overslagdebiet voor bij het bepalen van de minimaal benodigde kruinhoogte. Verder wordt bij het ontwerpen op macrostabiliteit expliciet genoemd dat er een relatie is tussen macrostabiliteit en golfoverslag.

De kruinhoogte dient dusdanig te worden bepaald dat de overschrijdingskans van het kritieke overslagdebiet kleiner is dan de faalkanseis. Het kritieke overslagdebiet is hierbij het overslagdebiet wat wordt toegestaan.

Nederlandse dijken hebben doorgaans een grasbekleding op de kruin en/of het binnentalud. Bij een grasbekleding op de kruin en/of binnentalud kan er volgens het Ontwerpinstrumentarium een kritiek overslagdebiet van 0,1 tot 10 l/s/m worden toegestaan. Hierbij worden wel hogere eisen gesteld aan de kruin en het binnentalud van de dijk naarmate een hoger kritiek overslagdebiet wordt toegestaan. De kritieke overslagdebieten en bijbehorende toepassingsvoorwaarden voor grasbekledingen op de kruin en het binnentalud zijn overgenomen uit het ontwerpinstrumentarium en opnieuw weergegeven in Tabel 3.1.

Uit Tabel 3.1 blijkt dat aan de volgende aspecten hogere eisen worden gesteld naarmate er een hoger overslagdebiet wordt toegestaan:

- De kwaliteit van de graszode (met betrekking tot erosie),
- De geotechnische stabiliteit van de bekleding van het binnentalud en de macrostabiliteit van het binnentalud,
- De taludhelling van het binnentalud,
- Er moet rekening gehouden worden met objecten en overgangen op het binnentalud en/of de kruin.

Verder geeft het Ontwerpinstrumentarium aan dat, onder bepaalde voorwaarden, er ook een groter overslagdebiet kan worden aangehouden dan 10 l/s/m. Het effect van een overslagdebiet groter dan 10 l/s/m wordt in deze studie buiten beschouwing gelaten.

Tot op heden wordt in het ontwerp op macrostabiliteit uitgegaan van overslagdebieten van 0,1 en/of 1 l/s/m. Hogere overslagdebieten tot 5 of 10 l/s/m kunnen van invloed zijn op de beoordeling en schematisatie van macrostabiliteit. Het Ontwerpinstrumentarium geeft nog geen handleiding over het efficiënt omgaan met de interactie tussen golfoverslag en macrostabiliteit, maar geeft een conservatief vertrekpunt. Optimalisatie is hierdoor doorgaans mogelijk, waarvoor op lokaal niveau door experts maatwerk kan worden geleverd. Het onderwerp macrostabiliteit wordt in voorliggend rapport verder uitgewerkt in Paragraaf 4.2.

Tabel 3.1: Overzicht rekenwaarden voor het kritieke golfoverslagdebiet zoals weergegeven in het Ontwerpinstrumentarium (referentie [35])

q_c (l/s/m)	Toepassingsvoorwaarden voor grasbekleding op kruin en binnentalud (aan alle voorwaarden moet voldaan worden)
$\leq 0,1$	<ul style="list-style-type: none"> • geen eisen
$>0,1$ ≤ 1	<ul style="list-style-type: none"> • gesloten of open zode^a op klei^b • voldoende stabiliteit^c <p>Bij 1 l/s/m gelden geen eisen aan objecten en overgangen op kruin en binnentalud.</p>
>1 ≤ 5	<ul style="list-style-type: none"> • Toepasbaar in twee mogelijke gevallen: <ul style="list-style-type: none"> – gesloten zode^a op klei^b en $H_{m0} < 4 \text{ m}^d$ of – open zode^a op klei^b en $H_{m0} < 2 \text{ m}$ • taludhelling flauwer dan 1:2,3 • voldoende stabiliteit^c <p>Bij 5 l/s/m gelden geen eisen aan objecten en overgangen op de kruin. Indien op het talud objecten groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ en/of overgangen aanwezig zijn, dan dient hier in het ontwerp rekening mee te worden gehouden.</p>
>5 ≤ 10	<ul style="list-style-type: none"> • gesloten zode^a op klei^b • taludhelling flauwer dan 1:2,3 • $H_{m0} < 4 \text{ m}^d$ • voldoende stabiliteit^c <p>Bij 10 l/s/m gelden geen eisen aan objecten en overgangen op de kruin, behalve in het bovenrivierengebied. Indien op het talud objecten groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ en/of overgangen aanwezig zijn, dan dient hier in het ontwerp rekening mee te worden gehouden. Voor het bovenrivierengebied geldt dit voor talud én kruin.</p>
<p>^a Een gesloten zode is een op het oog gesloten grasmat, zonder grote ($0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$) open plekken²</p> <p>^b Minimale gegarandeerde kleidikte van $0,4 \text{ m}$, geen eisen aan kleikwaliteit³.</p> <p>^c Controle van de geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud en de binnenwaartse macrostabiliteit. Dit kan leiden tot aanvullende eisen ten aanzien van kleilaagdikte, kleikwaliteit, het aanbrengen drainage, aanpassing van de taludhelling etc.</p> <p>^d Bij $H_{m0} > 4 \text{ m}$ dient advies over de lokaal te hanteren kritieke overslagdebieten ingewonnen te worden bij de Helpdesk Water (www.helpdeskwater.nl).</p> <p>De randvoorwaarden die aan de golfhoogte H_{m0} worden gesteld (bijvoorbeeld $H_{m0} < 2 \text{ m}$ of $H_{m0} < 4 \text{ m}$) kunnen worden afgelezen uit het illustratiepunt van de Hydra-berekening. Hierbij kan H_s gelijk worden gesteld aan H_{m0}.</p>	

² Een nadere beschrijving van de termen 'gesloten zode' en 'open zode' is te vinden op pagina 76 van Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toets-ronde d.d. 25-10-2012 ([32])

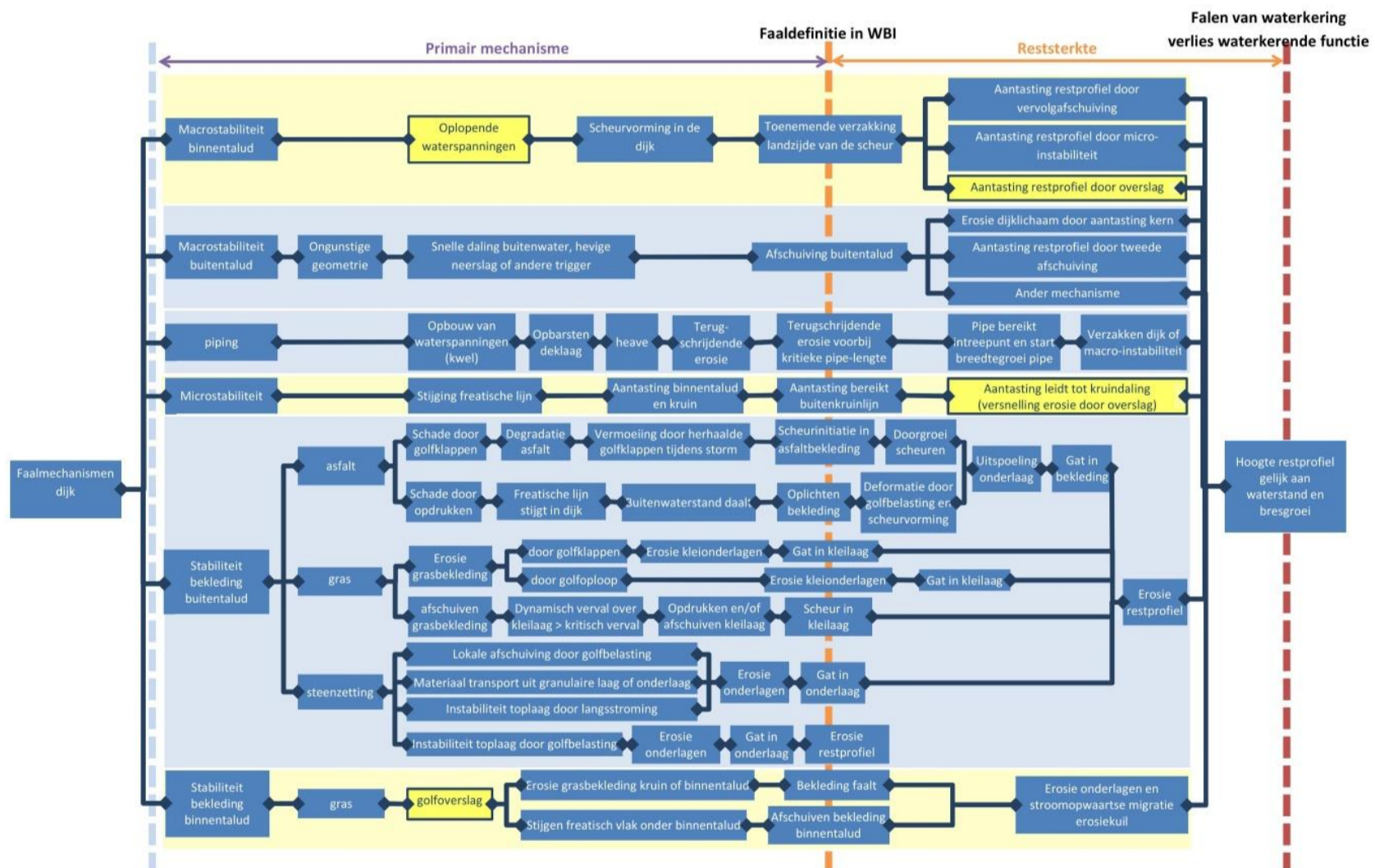
³ Tot en met een golfoverslagdebiet van 10 l/s/m worden er geen eisen gesteld aan de kleikwaliteit aangaande de erosiebestendigheid van de grasbekleding. Echter er moet ook worden voldaan aan de stabiliteitseis van de bekleding en van macrostabiliteit, waardoor er vanuit deze eis aanvullende eisen aan de kleikwaliteit kunnen worden gesteld.

3.3. Wettelijk beoordelingsinstrumentarium

De faalmechanismen waarmee in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI [48]) rekening wordt gehouden bij de beoordeling van een dijk zijn: Macrostabieliteit van het binnentalud,

- Macrostabieliteit van het buitentalud
- Piping,
- Microstabieliteit,
- Stabieliteit van de bekleding van het buitentalud,
- Stabieliteit van de bekleding van het binnentalud.

Om te bepalen welke faalmechanismen volgens het WBI 2017 beïnvloed worden door golfoverslag is in meer detail naar de faaltrajecten van deze mechanismen gekeken. Figuur 3.2 geeft een overzicht van alle opeenvolgende mechanismen die optreden bij de verschillende faalmechanismen tot het bezwijken van de dijk (referentie [9]). In Bijlage A is het schema vergroot weergegeven.



Figuur 3.2 Faalmechanismen en faalpaden van een dijk, gebaseerd op (ref. [9]).

De deelmechanismen waar golfoverslag van invloed is, zijn in het schema van Figuur 3.2 aangegeven met een geel blokje. De hieruit volgende faaltrajecten waar golfoverslag van invloed is, zijn aangegeven met een lichtgele achtergrond. Golfoverslag is volgens deze WBI aanpak van invloed bij de volgende faalmechanismen:

- macrostabieliteit binnentalud
- stabieliteit bekleding binnentalud (gras)
 - erosie grasbekleding kruin of binnentalud
 - Afschuiven bekleding binnentalud.
- Microstabieliteit (aantasting binnentalud bereikt kruin)

In de faaltrajecten van macrostabiliteit van het buitentalud, piping en de stabiliteit van het buitentalud komt geen invloed van golfoverslag voor binnen het WBI.

De hierboven genoemde faalmechanismen worden hieronder kort behandeld. Een verdere uitwerking vindt plaats in latere hoofdstukken.

3.4. Overzicht faalmechanismen in relatie tot golfoverslag

In de vorige twee paragrafen zijn de vigerende ontwerp- en beoordelingsinstrumentaria gescreend met betrekking tot de consequenties van het verhogen van het toelaatbare golfoverslagdebiet. Uit die analyse blijkt dat het verhogen van het toelaatbare golfoverslagdebiet mogelijk consequenties heeft voor mechanismen 'macrostabiliteit binnentalud', 'bekleding van het binnentalud' en 'microstabiliteit'. Deze mechanismen worden hieronder kort toegelicht. Een uitgebreidere beschrijving is weergegeven in Hoofdstuk 4.

Macrostabiliteit binnentalud

Bij Macrostabiliteit van het binnentalud speelt golfoverslag een rol in het primaire mechanisme, omdat infiltratie van golfoverslag zorgt voor oplopende waterspanningen in het dijklichaam. Bij een groter overslagdebiet zal daarom gecontroleerd moeten worden of de beoordeling in het WBI niet wijzigt ten aanzien van macrostabiliteit van het binnentalud. Ook de reststerkte die de dijk nog heeft na de faaldefinitie in WBI kan verkleind worden door een toegenomen overslagdebiet. Dit onderwerp wordt verder uitgewerkt in Paragraaf 4.2.

Bekleding van het binnentalud

Bij de stabiliteit van de bekleding van het binnentalud heeft het golfoverslagdebiet een grote invloed, aangezien overslag het drijvende proces is achter de deelprocessen erosie en afschuiving van het binnentalud. Bij een groter overslagdebiet zal er daarom gecontroleerd moeten worden of de beoordeling in het WBI niet wijzigt en of eventuele versterkingsmaatregelen van het binnentalud noodzakelijk zijn. Dit onderwerp wordt verder uitgewerkt in Paragraaf 4.3.

Microstabiliteit

Micro(in)stabiliteit kan een probleem zijn bij zanddijken met of zonder een kleibekleding. Water kan als gevolg van een hoogwater door de zandkern van de dijk dringen en bij het binnentalud zorgen voor instabiliteit op relatief kleine schaal. De instabiliteit bestaat uit het opdrukken dan wel afschuiven van de kleibekleding dan wel uitspoeling van zand door de kleibekleding, dan wel instabiliteit van zand op het talud bij zanddijken zonder kleibekleding.

In de gedetailleerde toets op microstabiliteit wordt ook gekeken naar het restprofiel bij een opgetreden instabiliteit. Als de kruinhoogte niet wordt aangetast, dan is de faalkans voldoende klein. Indien er echter golfoverslag optreedt, dat zal het restprofiel, bestaande uit zand, zeer snel kunnen eroderen en hiermee wordt geen rekening gehouden.

Daarom wordt binnen het WBI bij een golfoverslag debiet groter dan 0,1 l/s/m bij de norm verwezen naar het toetspoot voor stabiliteit van de binnenbekleding bij golfoverslag (GABI: Gras Afschuiven Bekleding Binnentalud). De formules waarmee de eerder genoemde vormen van instabiliteit worden beoordeeld zijn gelijk aan die voor microstabiliteit, echter er wordt expliciet rekening gehouden met extra wateraanbod door infiltratie door golfoverslag, maar er wordt geen rekening gehouden met reststerkte (zie [28]).

3.5. Verlies van secundaire functies

Naast de primaire functie van een dijk (voldoende veiligheid bieden tegen hoogwater) heeft een dijk veelal ook andere functies. In dit rapport worden deze de secundaire functies genoemd. Er zijn vele secundaire functie denkbaar zoals onder andere (zie ook Figuur 3.1):

- Verkeersfunctie
- Evacuatie route
- Mogelijkheid tot dijkinspectie
- Fundering en bescherming bebouwing
- Fundering (druk)leidingen
- Veiligheidsbeleving omwonenden
- Bescherming tegen geringe wateroverlast (nog geen overstroming; bescherming tegen overstroming valt onder de primaire functie)
- Overige functies

De bovenstaande lijst is niet uitputtend. Deze lijst is tot stand gekomen op basis van onder andere [14], [25], [31] en een door Sweco georganiseerde workshop d.d. 15 januari 2018.

Parallel aan het opstellen van dit rapport wordt er door Sweco een studie uitgevoerd naar de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) bij het ontwerpen van waterkeringen. Dit onderwerp is sterk gekoppeld aan wat in dit rapport wordt ingekaderd onder 'secundaire aspecten'. Om die reden wordt dit onderwerp in dit rapport alleen globaal behandeld.

Wanneer de dijk door golfoverslag niet meer veilig betreden kan worden door personen en/of voertuigen zal de dijk zijn verkeersfunctie, evacuatie route en mogelijkheid tot dijkinspectie verloren hebben. Wanneer een dijk zijn evacuatiefunctie verliest kan dit de evacuatiefractie van het achterliggende gebied beïnvloeden. De norm gaat uit van een bepaalde hoeveelheid slachtoffers, gebaseerd op een aangenomen evacuatiefractie ([19]). Zwaardere golfoverslag kan een evacuatie route onderbreken, waardoor de evacuatiefractie in theorie kleiner kan worden. Dit kan leiden tot een aangepaste norm.

Ook de fundering en bescherming van bebouwing en leidingen kunnen door golfoverslag aangetast worden. Dit zal vooral afhangen van de geotechnische stabiliteit die in voorgaande paragrafen al behandeld is.

De dijk kan ook zijn functie verliezen van het geven van een veilig gevoel aan de omwonenden door een hoog overslagdebiet of grote vervormingen (waarbij de geotechnische stabiliteit nog wel gewaarborgd is). Ook kan een hoog overslagdebiet leiden tot wateroverlast. Dat is weliswaar niet direct gevaarlijk en geeft geen grote schade, maar kan wel tot kleinere schade leiden en als onprettig worden ervaren. Momenteel zijn er nog geen normen beschikbaar voor de toelaatbare hoeveelheid wateroverlast. Mogelijk kan er een analogie met wateroverlast door regenval gezocht worden. Naar verwachting zal het onderwerp 'wateroverlast' in het rapport van Sweco verder behandeld worden ([31]).

Voor meer achtergronden van dit onderwerp wordt verwezen naar de KPR factsheet ([26]) en de studie van Sweco ([31]).

3.6. Overige onderwerpen waarbij het golfverslagdebiet van invloed is

Naast alle voorgenoemde aspecten zijn er nog aanvullende aspecten waarmee rekening dient te worden gehouden bij een verhoogd toelaatbaar overslagdebiet:

- **Identificatie van piping.**
Wanneer er water over de dijk stroomt, is het lastig om zandmeevoerende wellen te identificeren. Wanneer het overslagdebiet toeneemt, stroomt er voor een groter deel van de tijd water over de dijk. Zand meevoerende wellen, die een indicatie zijn voor piping, kunnen hierdoor mogelijk niet meer ontdekt worden.
- **Progressie van piping.**
In theorie kan het voorkomen dat het pipingproces in evenwicht komt doordat de zandmeevoerende wel zichzelf als het ware opkist; het geërodeerde zand vormt een verhoogde rand om de wel (krater) en het verval tussen de buitenwaterstand en het kraterpeil neemt voldoende af om het proces in evenwicht te brengen. Golfverslag kan er dan voor zorgen dat de rand van de zandkrater instort en het piping proces weer verder gaat. In de praktijk is het echter onwaarschijnlijk dat dit proces optreedt, omdat de wel vaak ver van de hiel van de dijk ligt waar golfverslag weinig invloed heeft. Ook ligt de wel vaak in een bermsloot waar de krater rond de wel toch al niet kan groeien door stroming in de sloot ([47]). Ook het kunstmatig in evenwicht brengen van het piping proces door middel van het opkisten met bijvoorbeeld zandzakken kan bemoeilijkt worden door golfverslag. Golfverslag kan het onwerkbaar maken voor de personen die de zandzakken plaatsen. Verder kan golfverslag de opkisting van zandzakken beschadigen.
- **Beschadigingen van het talud of de kruin van niet-geotechnische aard.**
Beschadigingen aan de dijk die niet gerelateerd zijn aan de geotechnische stabiliteit kunnen er wel voor zorgen dat geotechnisch falen sneller optreedt. Scheuren in het binnentalud zijn bijvoorbeeld een aangrijppunt voor erosie en een intrede punt voor het overslaande water waardoor sneller verweking optreedt en/of de freatische lijn sneller stijgt. Bij dit soort beschadigingen kan bijvoorbeeld gedacht worden aan dierlijke graverij en scheurvorming door verdroging.
- **Reststerkte na Macro-instabiliteit (zonering van het binnentalud).**
Bij het toetsen en ontwerpen van de dijk op macrostabiliteit wordt zonering toegepast; het onderste deel van de dijk wordt niet meegenomen en hoeft dus niet te voldoen ten aanzien van macrostabiliteit. Wanneer er een verhoogd overslagdebiet wordt toegestaan wordt ook macrostabiliteit van het onderste deel van het binnentalud relevant. Dit is verder toegelicht in Paragraaf 4.2.5.

3.7. Overzicht van aandachtspunten ten aanzien van het golfverslagdebiet

Op basis van de analyse in de bovenstaande paragrafen zijn de volgende aandachtspunten geïdentificeerd met betrekking tot een verhoogd toelaatbaar overslagdebiet (hierbij wordt tevens aangegeven in welk hoofdstuk dit verder wordt uitgewerkt):

Vanuit primaire functie (bescherming tegen hoogwater)

- Falen van de bekleding (graszode) op de kruin en het binnentalud (Hoofdstuk 4).
- Falen door verlies van macrostabiliteit (Hoofdstuk 4).
- Falen door verlies van microstabiliteit (Hoofdstuk 4)
- Evenwichtssituatie van piping (Hoofdstuk 4)
- Vervormingen welke tot scheurvorming leiden (Hoofdstuk 4)

- Reststerkte na Macro-instabiliteit (zonering van het binnentalud) (Hoofdstuk 4)
- Falen van bekleding rondom objecten en overgangen op het binnentalud en/of de kruin (Hoofdstuk 5)

Vanuit zorgplicht dijkbeheerder

- Inspectiemogelijkheden van de dijk (begaanbaarheid en identificatie piping) (Hoofdstuk 6)

Vanuit secundaire functie

- De begaanbaarheid van de dijk (verkeer, evacuatie, inspectie) (Hoofdstuk 6)

In het voorliggende hoofdstuk is geïdentificeerd wat aandachtspunten zijn bij het ontwerpen van een waterkering met een relatief hoog overslagdebiet. Deze aandachtspunten worden verder uitgewerkt in de volgende hoofdstukken.

4. Uitwerking faalmechanismen

In het vorige hoofdstuk is een overzicht gegeven van de geïdentificeerde aandachtspunten bij een dijk waarbij relatief veel golfoverslagdebiet wordt toegestaan. In het voorliggende hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de volgende aandachtspunten:

- Macrostabieliteit binnenwaarts (Paragraaf 4.2)
- Stabiliteit bekleding binnentalud (Paragraaf 4.3)
- Overige bijdragen van golfoverslagcondities aan faalmechanismen (Paragraaf 4.4)

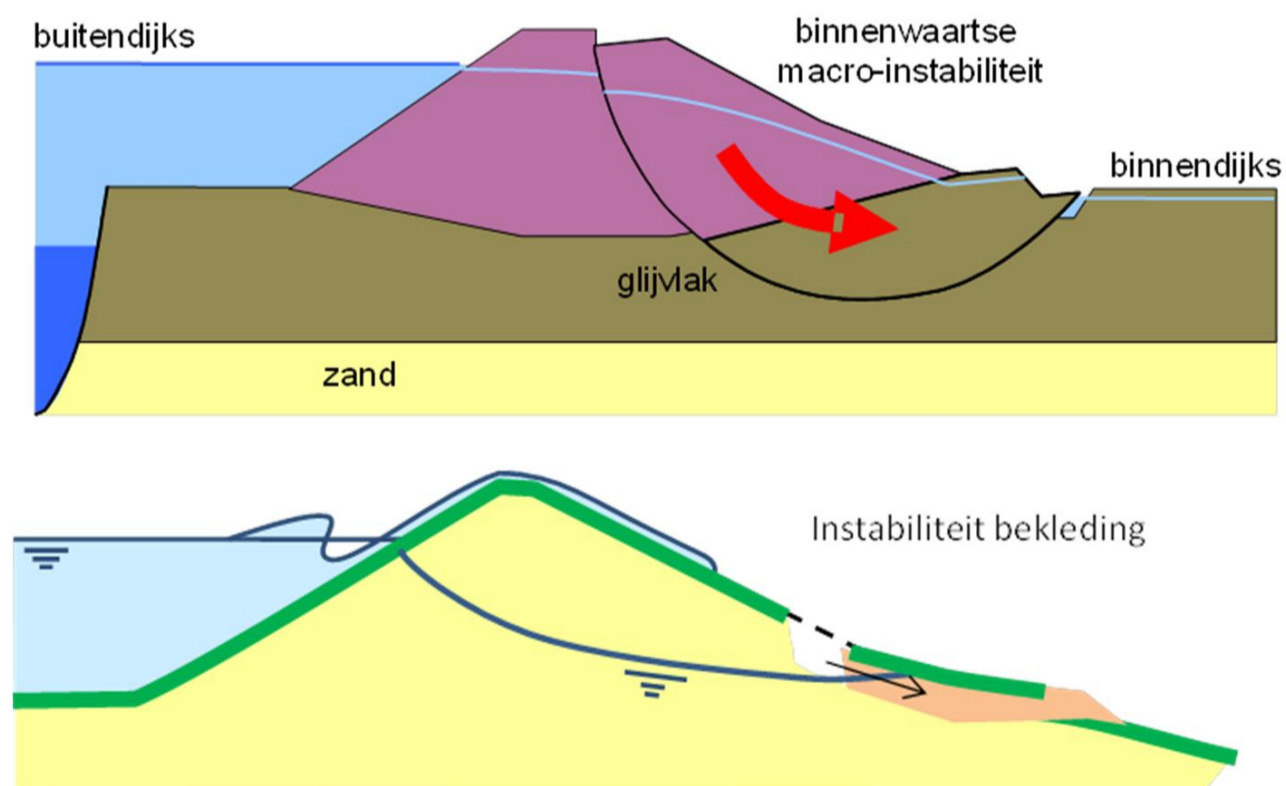
4.1. Inleiding, definities en afbakening

Golfoverslag heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van het binnentalud. De kans op afschuiven van het binnentalud neemt sterk toe indien er golfoverslag optreedt. Door golfoverslag nemen waterspanningen toe en neemt de sterkte van de grond af. Steile taluds kunnen daardoor afschuiven. Het afschuiven van het talud wordt als faaldefinitie beschouwd.

In het Ontwerpinstrumentarium (Tabel 3.1 en referentie [35]) wordt er vanuit gegaan dat bij een ontwerp golfoverslagdebiet van 0,1 l/s/m er geen significante invloed is van golfoverslag op de stabiliteit van het talud. Vanaf een overslagdebiet van 1 l/s/m en meer moet hiermee wel rekening worden gehouden.

In het WBI 2017 (Figuur 3.1 en referentie [48]) is golfoverslag van invloed op het primaire faalmechanisme bij de volgende twee geotechnische mechanismen:

- macrostabieliteit binnenwaarts en
- stabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud bij golfoverslag.



Figuur 4.1 Schematische weergave macro instabiliteit binnenwaarts (boven) en instabiliteit bekleding door afschuiving (onder)

Bij macrostabieliteit gaat het om relatief diepe glijvlakken, bij stabiliteit van de grasbekleding gaat het om relatief kleine vormen van instabiliteit. Hoewel het toetspoo GABI (Gras Afschuiven Bekleding Binnentalud) wordt genoemd worden meerdere vormen van instabiliteit

beschouwd, afhankelijk van het type dijk (kleidijk, zanddijk met of zonder kleibekleding). De instabiliteit kan een oppervlakkige afschuiving betreffen (alle dijktypes), het opdrukken van de bekleding (zanddijk met kleibekleding), het uitspoelen van zand van onder de kleibekleding (zanddijk met kleibekleding) of instabiliteit van zand op het taludoppervlak (zanddijk).

Bij het maken van stabiliteitsberekeningen is het onderscheid tussen deze mechanismen echter diffuus, omdat de maatgevende glijvlakken bij golfoverslag ondiep kunnen worden. Er is echter geen grens, of een kritische glijvlakdiepte, waarbij het ene mechanisme overgaat in het andere. In beide gevallen is de gevaarstelling echter vergelijkbaar. Een deel van de kern wordt na de afschuiving blootgesteld aan golfoverslag, waardoor het proces tussen het afschuiven (faaldefinitie, zie Bijlage A) en falen van de waterkering vergelijkbaar verloopt. Desondanks worden er binnen het WBI2017 verschillende veiligheidseisen gesteld aan de beide mechanismen.

Bij het ontwerpen (referentie [35]) wordt onderkend dat bij golfoverslag ook ondiepe glijvlakken maatgevend kunnen zijn. Deze dienen binnen het kader van het ontwerp op macrostabiliteit binnenwaarts te worden meegenomen.

In deze rapportage wordt de invloed van het ontwerp golfoverslagdebiet op macrostabiliteit binnenwaarts en de stabiliteit van de bekleding apart behandeld (respectievelijk Paragraaf 4.2 en Paragraaf 4.3). Overige aandachtspunten met betrekking tot geotechnische aspecten worden in Paragraaf 4.4 beschreven.

4.2. Macrostabiliteit binnenwaarts

Deze paragraaf bevat de samenvatting van de stand van zaken van de kennis over de interactie tussen macrostabiliteit binnenwaarts en golfoverslag. Beschreven wordt hoe hiermee wordt omgegaan in het WBI2017, vervolgens in het OI2014v4 en tenslotte worden onderzoeksresultaten genoemd, welke nog niet zijn opgenomen in deze instrumentaria, dan wel in ENW publicaties (Expertise Netwerk Waterveiligheid), maar wel van nut kunnen zijn bij het uitvoeren van een toets op maat of het leveren van een maatwerk ontwerp.

4.2.1. WBI2017

De interactie tussen macrostabiliteit binnenwaarts en golfoverslag komt in het WBI2017 summier aan bod. In de schematiseringshandleiding macrostabiliteit wordt genoemd dat het onderwerp van macrostabiliteit in combinatie met golfoverslag nog nader moet worden uitgewerkt.

De gegeven schematisering van de waterspanningen is alleen geldig indien het overslagdebiet bij de norm, P_{max} , de maximaal toelaatbare overstromingskans van het dijktraject (per jaar), kleiner of gelijk is aan 1 l/s/m. Bij een hoger overslagdebiet moet de dijk beoordeeld worden in een toets op maat, waarbij rekening wordt gehouden met de invloed van golfoverslag op de waterspanningen in de dijk.

4.2.2. OI2014v4

In het ontwerpinstrumentarium komen macrostabiliteit en golfoverslag aan bod bij zowel het ontwerp op hoogte als bij het ontwerp op macrostabiliteit.

Voor het ontwerp van de kruinhoogte wordt gewerkt met rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet. Een samenvatting van rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet met de hierbij gehanteerde voorwaarden wordt gegeven in Tabel 3.1 (pagina 3) van voorliggend rapport).

Bij een ontwerp moet bij een kritisch overslagdebiet q_c van 1 l/s/m en hoger rekening worden gehouden met de invloed van golfoverslag op de stabiliteit van het binnentalud, zowel de stabiliteit van de bekleding als de macrostabiliteit binnenwaarts. Bij een ontwerp zijn er bij een kritisch golfoverslagdebiet van 0,1 l/s/m geen voorwaarden of eisen ten aanzien van de invloed op stabiliteit van het binnentalud. De binnenwaartse macrostabiliteit dient uiteraard wel te worden gecontroleerd, echter hoeft er geen rekening te worden gehouden met de effecten van golfoverslag.

Het is bij een ontwerp van belang dat deze in de toekomst zal voldoen aan de beoordelingsmethodiek (WBI2017 [48]). Er wordt opgemerkt dat het te hanteren overslagdebiet bij ontwerpen doorgaans strenger uitpakt dan de kritische waarde binnen het WBI2017, zijnde 1 l/s/m bij de norm, zie paragraaf 4.2.1. Een dijk die wordt ontworpen op 1 l/s/m, bij de strengere doorsnede-eis voor hoogte, zal dus voldoen aan de kritische waarde uit het WBI voor toepassing van de gedetailleerde beoordeling op macrostabiliteit binnenwaarts. Voor een ontwerp met overslagdebiet van 5 of 10 l/s/m, bij de doorsnede-eis voor hoogte, is dat niet automatisch het geval en zou het kunnen dat het dijkontwerp binnen het WBI2017 in een toets op maat valt voor macrostabiliteit binnenwaarts. Uiteraard kan het ontwerp in dat geval dienen als onderbouwing van de toets op maat.

Bij het ontwerpen op macrostabiliteit wordt expliciet ingegaan op de relatie met golfoverslag, waarbij wordt opgemerkt dat de teksten in het OI2014 aangaande dit onderwerp nog een tijdelijk karakter hebben, optimalisatie doorgaans mogelijk is en dat met experts op lokaal niveau maatwerk kan worden geleverd. Er wordt verwezen naar het KPR memo over de voorlopige werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag, waarvan de laatst bekende versie van 4 april 2018 is ([26]).

Indien het ontwerpoverslagdebiet groter is dan 1 l/s/m dan wordt de invloed van golfoverslag op macrostabiliteit als volgt in rekening gebracht, aldus het KPR memo. De macrostabiliteit wordt berekend voor twee scenario's:

- a) Reguliere berekening bij een waterstand bij de norm, zonder rekening te houden met golfoverslag.
- b) Berekening met de waterstand uit het ontwerppunt bij een golfoverslagdebiet van 1 l/s/m. Het effect van golfoverslag op de waterspanningen in de dijk wordt in rekening gebracht en de partiële veiligheidsfactoren worden (naar beneden) bijgesteld conform het gegeven recept. Omdat de kans op golfoverslag klein is, mag voor dit scenario worden gewerkt met een gunstiger waarde van de schadefactor.

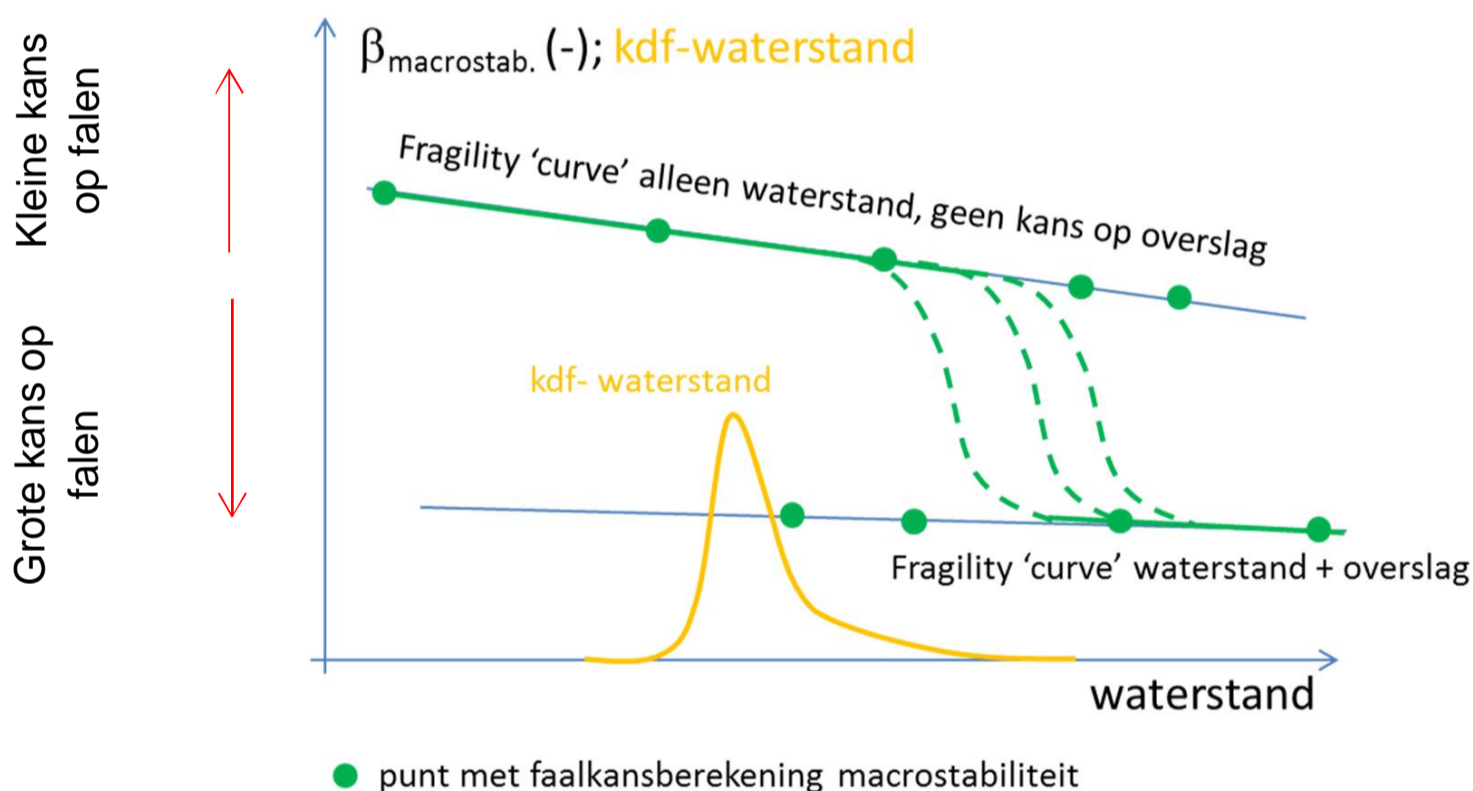
Het ontwerp moet aan beide voorwaarden voldoen.

Opgemerkt wordt dat volgens het OI2014v4 bij het ontwerp op hoogte een check moet worden uitgevoerd op zowel de stabiliteit van de bekleding als op macrostabiliteit binnenwaarts bij een golfoverslagdebiet ≥ 1 l/s/m, echter bij de uitwerking voor ontwerp op macrostabiliteit is dit bij >1 l/s/m.

4.2.3. POVM Actuele sterkte – probabilistische rekenmethode Fragility curves

Binnen de POVM (project overstijgende verkenning – macrostabiliteit) deelproject ‘Actuele sterkte’ is onderzoek gedaan naar het volledig probabilistisch berekenen van de macrostabiliteit binnenwaarts met de methode ‘fragility curves’. Het referentieproject voor de POVM Actuele Sterkte is KIJK (Krachtige IJsseldijken Krimpenerwaard, referentie [24]). Ook voor andere dijkversterkingsprojecten wordt deze methode inmiddels toegepast.

De fragility curves geven het verband tussen de kans op macro-instabiliteit en een waterstand. Bij een lage waterstand is de kans op macro-instabiliteit klein, bij een oplopende waterstand neemt de kans op instabiliteit toe. Door de fragility curves te combineren met de kansverdeling van de waterstanden (per jaar) kan de jaarlijkse faalkans worden berekend en getoetst aan de norm (Figuur 4.2). Het conservatisme van de semi probabilistische berekeningen wordt op deze manier uit de berekening gehaald. Hierbij wordt opgemerkt dat de semi probabilistische aanpak in de meeste gevallen conservatief is, echter niet altijd.



Figuur 4.2 Schematische weergave fragility curves; kans op macro-instabiliteit voor KIJK uitgedrukt in een β (-) als relatie van de buitenwaterstand, met en zonder golfoverslag. Een hogere waarde van β duidt op een kleinere kans op falen

De invloed van golfoverslag op de kans op instabiliteit van het binnentalud is relatief groot ten opzichte van alleen het effect van de waterstand. Dit is zeker het geval voor KIJK, waar geen sprake is van opdrijven of opbarsten van de deklaag, in welk geval het effect van de buitenwaterstand wat groter zal zijn. Het duiken van de β en dus het sterk toenemen van de kans op afschuiven van het binnentalud bij een toenemende waterstand als gevolg van golfoverslag, is alleen belangrijk voor de faalkans als dit gebeurt bij waterstanden met een significante kans van voorkomen. Voor de berekening van de jaarlijkse faalkans van het binnentalud worden de statistiek van waterstand en de fragility curve namelijk gecombineerd.

Voor het toepassen van de methode fragility curves is de volgende aanvullende kennis nodig ten opzichte van gangbare stabiliteitsberekeningen zonder golfoverslag:

- 1 Het effect van golfoverslag op de stabiliteit, ofwel hoeveel neemt de faalkans toe bij golfoverslag.
- 2 De kans op golfoverslag gegeven een bepaalde waterstand.

Dit wordt in onderstaande paragrafen nader uitgelegd.

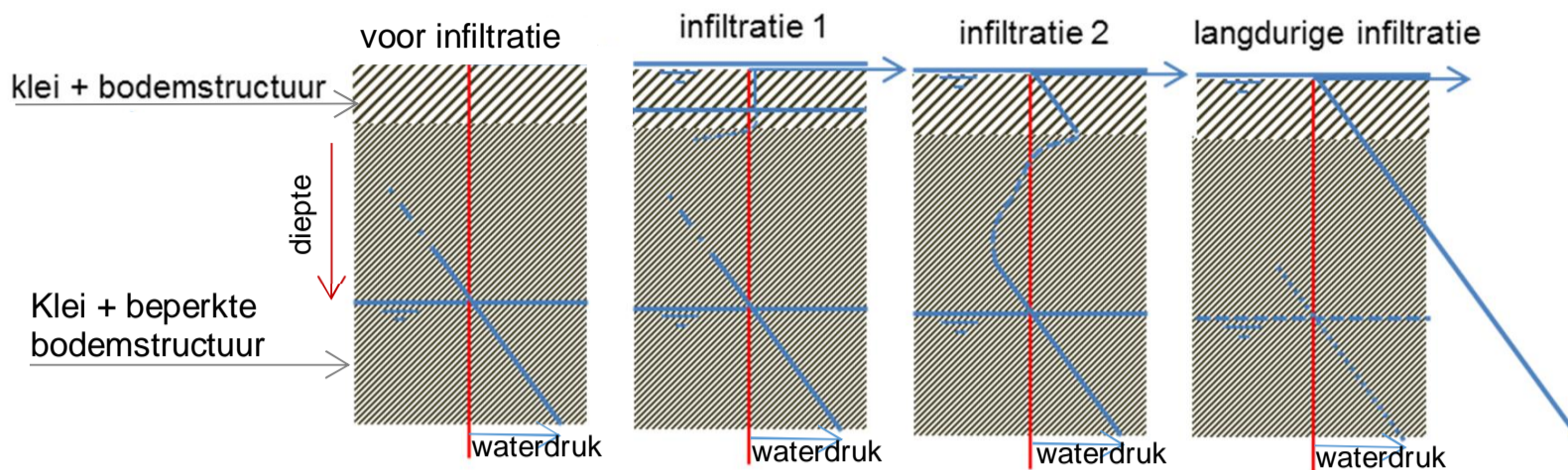
Invloed infiltratie door golfoverslag op de waterspanningen in de dijk

Door infiltratie bij golfoverslag nemen waterspanningen in de dijk extra snel toe, potentieel veel sneller dan door alleen een hoge buitenwaterstand, waardoor de kans op afschuiven snel groter wordt. Het proces waardoor de waterspanningen snel toenemen door golfoverslag is hieronder beschreven.

Het maakt voor infiltratie veel uit of het gaat om een kleidijk of om een zanddijk met of zonder een kleibekleding. Voor de beschrijving van infiltratie bij zanddijken wordt verwezen naar [15] en [16]. Onderstaand wordt ingegaan op infiltratie bij kleidijken, naar aanleiding van een infiltratieproef uitgevoerd in het kader van het POVM project Actuele Sterkte (zie [7] en Bijlage C).

Een gangbare kleidijk heeft een relatief ondoorlatende kleikern en een relatief doorlatende klei aan het oppervlak. Deze opbouw ontstaat door natuurlijke bodemstructuurvormende processen, zoals droogte en vernatting door neerslag, vorst, graverij door wormen, insecten en grotere dieren, werking van wortels en schimmels. Tot een diepte van 1 à 1,5 m is er sprake van een ontwikkelde bodemstructuur, waarbij de toplaag van circa 30 cm relatief rul en doorlatend is en met toenemende diepte de aggregaten groter worden en beter op elkaar aansluiten. De doorlatendheid en het aantal macroporiën neemt af met de diepte onder het maaiveld.

Indien er als gevolg van golfoverslag water over de dijk loopt dan zal dit relatief snel infiltreren in de rulle toplaag, maar veel langzamer in de onderliggende dichtere en minder doorlatende klei. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 4.3. Met gangbare stromingsparameters voor klei met en zonder bodemstructuur is berekend dat de eerste twee stappen in deze figuur relatief snel verlopen, maar dat het bereiken van het laatste beeld ('volle dijk') normaal gesproken veel langer duurt dan een stormduur of golfoverslaggebeurtenis in Nederlandse omstandigheden.



Figuur 4.3 Infiltratie in kleidijk met gangbare opbouw van bodemstructuur. (Waterdruk over de hoogte in de dijk voor 4 fasen van infiltratie)

Naast de opbouw van de dijk is de infiltratiesnelheid ook afhankelijk van de golfoverslag condities. De tijd dat er water over het binnentalud stroomt, is hierin de primaire parameter die de infiltratiesnelheid bepaalt. Zo zal bij een gelijk gemiddeld overslagdebiet de dijk sneller infiltreren wanneer er vaak kleine overslagvolumes optreden dan wanneer er enkele grote overslagvolumes optreden (zie [33]) met lange tussenpozen. In [32] en [33] worden enkele rekenvoorbeelden gegeven waarbij het infiltratieproces in een kleidijk en een zanddijk sterk vereenvoudigd worden berekend. Met meer geavanceerde rekentechnieken en modellen en met veld en laboratoriumproeven om de benodigde parameters te bepalen kan hier nauwkeuriger aan worden gerekend (zie [16] voor suggesties).

Echter, in de praktijk wordt bij gebrek aan kennis vaak uit gegaan van een 'volle dijk' vanaf een golfoverslagdebiet groter dan 1 l/s/m, zoals in de rechter afbeelding van Figuur 4.3. Dit betekent een freatisch vlak op of vlak onder het maaiveld van de dijk. In Figuur 4.2 wordt de hoge faalkans bij dit scenario geïllustreerd door de lage fragility curve (lage Beta = hoge faalkans).

Een hulpmiddel bij de eerste inschatting van de waterspanningen in de dijk als gevolg van golfoverslag wordt gegeven in de handleiding toetsen grasbekledingen en de schematiseringshandleiding grasbekledingen (referentie [32] en [33]). Verder zijn er diverse grondwaterstromingsmodellen in software verwerkt waarmee de gevolgen van infiltratie op de waterspanningen in de dijk kunnen worden berekend. Voorbeelden zijn D-Geo Flow, SEEP/W en de grondwaterstromingsmodule in PLAXIS. In de praktijk wordt deze software nog niet veel gebruikt, waarschijnlijk door onbekendheid met de modellen en de te hanteren parameters en daarnaast het voorhanden zijn van eenvoudige en robuust veronderstelde schematiseringen in technische rapporten van ENW en in het WBI2017.

Invloed infiltratie door golfoverslag in combinatie met heterogeniteit van het binnentalud

In 2017 is er een infiltratieproef uitgevoerd langs de Hollandse IJssel, zie Bijlage C. Uit de proef bleek de grote invloed van heterogeniteit van de grondopbouw onder het binnentalud op de stabiliteit van de bekleding. De belangrijkste resultaten van de proef zijn hieronder samengevat.

De hypothese bij het onderzoek was dat de schematisering van een freatisch vlak op het maaiveld ('volle dijk' zoals beschreven in voorgaande paragraaf) die in de praktijk vaak wordt toegepast bij een golfoverslagdebiet groter dan 1 l/s/m in een stabiliteitsanalyse conservatief

is en door middel van onderzoek kwantitatief kan worden aangescherpt. De hypothese kon echter niet goed getest worden, omdat er een instabiliteit optrad (Figuur 4.4) welke niet het gevolg was van hoge waterspanningen in de kern van de dijk, maar door een afwijkende grondopbouw van een kleilaag op een zandinsluiting.



Figuur 4.4 Instabiliteit bij infiltratieproef langs de Hollandse IJssel

Dit soort instabiliteit kan ontstaan wanneer er, in plaats van een volledige kleidijk, onder een (stevige) kleilaag 'klei met zandvoorkomens' en/of een 'zandlens' aanwezig is. Het zand heeft geen cohesie en de schuifsterkte neemt af als het zand wordt verzadigd met water en de waterdruk hierin oploopt. Als de toplaag zeer doorlatend is en er onder het zand weer een kleikern aanwezig is kan het zand snel verzadigd raken en kan er ook snel een instabiliteit ontstaan. Dit mechanisme treedt overigens niet op bij een volledige zanddijk met een kleibekleding (hier treedt instabiliteit van de bekleding op volgens Figuur 4.1).

Hieruit blijkt dat heterogeniteit van het binnentalud een grote invloed kan hebben op de stabiliteit van het binnentalud. Vooral bij dijken die hoofdzakelijk opgebouwd zijn uit klei vormt een relatief kleine insluiting van zand een aanzienlijke afname van de stabiliteit van het binnentalud. Het is daarom zeer belangrijk om te weten hoe de dijk exact is opgebouwd.

Om te kunnen beoordelen of een groter golfoverslagdebiet kan worden toegestaan is het van belang dat het volgende bekend is:

- Detail documentatie van de opbouw van de dijk. Hierbij is ook de opbouw van eventuele reparaties na schade of een dijkdoorbraak van groot belang.
- De doorlatendheid van de toplaag.

Wanneer het niet bekend is of er zandinsluitingen in het binnentalud aanwezig zijn is het erg lastig om met gangbaar onderzoek uit te sluiten dat er zandinsluitingen in de dijk aanwezig zijn. De kans dat dit soort gevoelige plekken worden gemist bij een gangbaar onderzoek is zeer groot. Hoe deze zandvoorkomens wel opgespoord kunnen worden is van wezenlijk belang bij de bepaling van de grote van versterkingen en of een dijktraject wel of niet versterkt moet worden wanneer er golfoverslag groter dan 0,1 l/s/m wordt toegestaan. Hiervoor lijkt de EM survey techniek of radar geschikt. Naar aanleiding van het grondonderzoek voor de tweede infiltratieproef lijkt radar de meest geschikte techniek. Beide

technieken zijn echter voor deze specifieke toepassing nog niet volledig ontwikkeld, gekalibreerd en op een toegankelijke manier beschikbaar.

Verder zou er nog onderzocht moeten worden of het mogelijk is dergelijke taluds met zandinsluitingen met een geringe ingreep bestand te maken tegen golfoverslag.

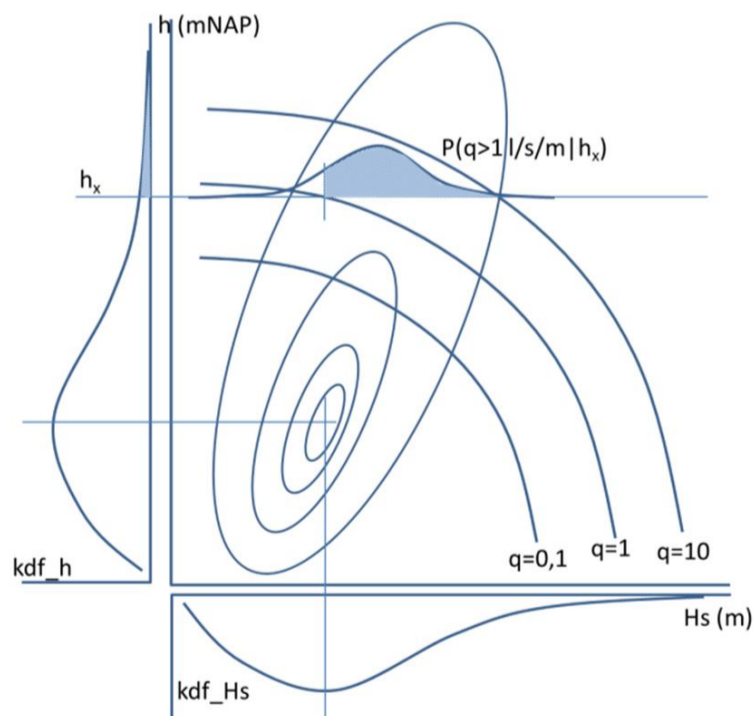
Schuifsterkte van de kleikern boven het freatisch vlak

Een ander punt van aandacht is de schuifsterkte van de kleikern boven het gemiddelde freatisch vlak en de klei met bodemstructuur. De vraag is in hoeverre deze grond zich gedraineerd dan wel ongedraineerd gedraagt. Hierover is nog geen consensus. Binnen KIJK (referentie [24]) is gekozen voor een gedraineerde modellering, met c' en ϕ' . Bij de berekening van de stabiliteit van de Markermeerdijken is de schuifsterkte ongedraineerd gemodelleerd. Dit is maatwerk per project.

Relatie waterstand en kans op golfoverslag

Voor het maken van een fragility curve welke rekening houdt met golfoverslag, moet de relatie tussen de waterstand en de kans op golfoverslag bekend zijn of geschat worden. Dit bepaalt het verloop tussen de fragility curve zonder golfoverslag, en de fragility curve met golfoverslag, zoals geïllustreerd door de stippellijnen in Figuur 4.2. De relatie tussen de waterstand en de kans op een bepaald golfoverslagdebiet kan nog niet met de standaard versie van Hydra-NL bepaald worden (Figuur 4.5). Voor het project KIJK (referentie [24]) is een aangepaste versie van Hydra-NL opgeleverd waarmee deze kans voor de Hollandse IJssel kon worden benaderd.

Voor het project KIJK (referentie [24]) is de methode fragility curves succesvol toegepast. Elementen uit de methode zijn nog niet uitontwikkeld.



Figuur 4.5 Schematische weergave van de kans op golfoverslag (bv 1 l/s/m) gegeven een waterstand

4.2.4. Kruinhoogte in relatie tot macrostabiliteit

Verder moet opgemerkt worden dat de kruinhoogte eveneens invloed heeft op de stabiliteit van het talud en dat hoe hoger de dijk, des te lager de stabiliteitsfactor en des te hoger de faalkans. Bij KIJK bleek dit een significante factor. Een ontwerp met een hogere waarde van

het kritisch overslagdebiet, dus een lagere ontwerpkuinhoogte, leidt in dat opzicht tot een kleinere opgave ten aanzien van macrostabiliteit. Er is dus niet enkel een negatieve invloed op de stabiliteit van het binnentalud indien wordt uitgegaan van een hoger ontwerpoverslagdebiet. Welk effect doorslaggevend is hangt af van specifieke lokale omstandigheden.

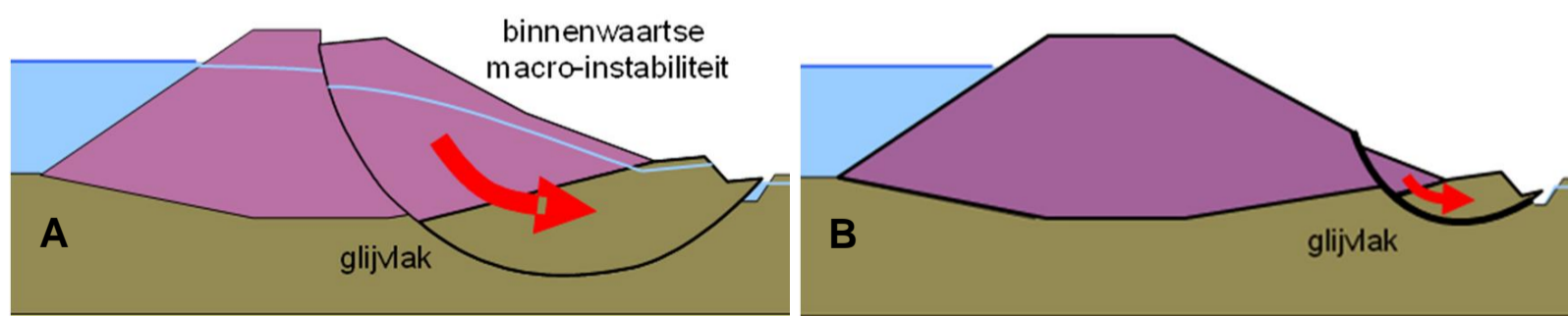
4.2.5. Reststerkte na macro-instabiliteit (zonering van het binnentalud)

Bij het toetsen en ontwerpen van de dijk op macrostabiliteit wordt zonering toegepast; De kritische glijvlakken die worden beoordeeld bij macrostabiliteit binnenwaarts worden beoordeeld op het risico op een doorbraak. Kleine glijvlakken, bijvoorbeeld een instabiele slootkant, of een instabiliteit aan de onderkant van het talud worden minder streng beoordeeld dan glijvlakken die door de bovenste helft van het talud of de kruin van de dijk gaan. Bij de kleine glijvlakken wordt ervan uitgegaan dat er reststerkte aanwezig is.

In de beoordeling volgens WBI2017 wordt dit meegenomen door zonering toe te passen. De gebruiker moet in Ringtoets aangeven in welk zoekgebied het intredepunt van een relevant schuifvlak kan liggen. Op deze manier wordt het onderste deel van het binnentalud van de dijk niet meegenomen en dit deel hoeft dus niet te voldoen ten aanzien van macrostabiliteit, omdat een afschuiving onderaan het binnentalud normaal gesproken niet als een bedreiging van de waterveiligheid wordt gezien.

Indien er echter sprake is van golfoverslag, dan komt de kern van de dijk bloot te liggen en zal er minder reststerkte zijn dan waarvan kan worden uitgegaan zonder golfoverslag. Hiermee wordt in het WBI2017 (verwijzing naar een toets op maat) en in het OI2014v4, via een verwijzing naar het KPR memo, rekening gehouden. Wanneer zwaardere golfoverslagcondities worden toegestaan wordt macrostabiliteit van het onderste deel van het binnentalud dus wel relevant.

Ter illustratie geeft Figuur 4.6 een voorbeeld van macro-instabiliteit met het intredepunt in de kruin (A) en onderaan het binnentalud (B). Onafhankelijk van de golfoverslagcondities zal de kering gefaald zijn bij de instabiliteit van Figuur 4.6 volgens de faaldefinitie in het WBI. Echter, volgens de faaldefinitie van het WBI is de kering nog niet gefaald in het geval van de kleine afschuiving onderaan het binnentalud (Figuur 4.6B) wanneer er geen of nauwelijks golfoverslag optreedt. Daarom kan bij de toetsing van de dijk dit deel buiten beschouwing worden gelaten. Wanneer er echter wel noemenswaardige golfoverslag optreedt, is deze afschuiving een aangrijpingspunt voor erosie. In dit geval kan deze afschuiving aan de onderkant van het binnentalud (indirect) wel leiden tot falen van de dijk. Bij golfoverslag kan het zijn dat afschuivingen in het onderste deel van het binnentalud wel meegenomen moeten worden bij de beoordeling van de dijk.



Figuur 4.6 Illustratie van macro-instabiliteit met het intredepunt in de kruin (A) en onderaan het binnentalud (B).

In het kader van het WBI2017 is een onderzoeksrapport opgesteld naar de reststerkte bij een afschuiving in combinatie met golfoverslag (referentie [4]). Er is met een kliff-erosiemodel gekeken in hoeverre een golfoverslagdebiet van 1 l/s/m of 10 l/s/m de dijk na een afschuiving nog reststerkte heeft. Het onderzoek is een aanzet geweest, echter er is onvoldoende validatie en modelontwikkeling geweest om deze reststerkte kwantitatief in rekening te brengen. Voorbeelden van dijken die na een instabiliteit en golfoverslag toch hun kruinhoogte behielden zijn weergegeven in Figuur 4.7 en Figuur 4.8.



Figuur 4.7 Reststerkte na oppervlakkig afschuiven door golfoverslag gevolgd door erosie van de dijkkern, zonder doorbraak (Zeeuwse dijken na de stormvloed van 1953).



Figuur 4.8 Afschuifproef Bergambacht waar na afloop van de afschuiving is gekeken in hoeverre het afgeschoven binnentalud nog bestand was tegen erosie door overloop.

4.3. Stabiliteit bekleding binnentalud

Deze paragraaf bevat de samenvatting van de stand van zaken van de kennis over de interactie tussen de stabiliteit van de bekleding op het binnentalud en golfoverslag. Beschreven wordt hoe hiermee wordt omgegaan in het WBI2017 (referentie [48]) en in het OI2014v4 (referentie [35]). Hierbij is er van uit gegaan dat het binnentalud een grasbekleding heeft, zoals doorgaans het geval is bij Nederlandse dijken.

4.3.1. OI2014v4

De stabiliteit van de bekleding op het binnentalud in combinatie met golfoverslag komt aan bod bij het ontwerp van de hoogte, overeenkomstig zoals beschreven voor macrostabiliteit (paragraaf 4.2.2) en Tabel 3.1. Vanaf een golfoverslagdebiet ≥ 1 l/s/m moet de geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud worden gecontroleerd, wat kan leiden tot aanvullende eisen ten aanzien van kleilaagdikte, kleikwaliteit, taludhelling, toepassing van drainage en dergelijke. De achterliggende methodiek van deze tabel is beschreven in Bijlage B.6.

Bij een zandkern met een kleibekleding wordt een minimale gegarandeerde kleilaagdikte van 0,4 m genoemd, maar vanuit de functie van het voorkomen van doorgaande graverij tot in de zandkern wordt 0,8 m aanbevolen. Hierbij blijft gelden dat de geotechnische stabiliteit van de kleilaag moet worden gecontroleerd.

Een nadere invulling van de controle op stabiliteit, welke stabiliteitsmodellen en schematisering van waterspanningen als gevolg van golfoverslag, wordt verder niet in detail behandeld in het OI2014. Hiervoor kan worden teruggegrepen op de schematiseringshandleiding voor grasbekledingen uit het WBI2017, dan wel het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.

Opgemerkt wordt dat het effect van de keuze voor een lagere kruin met een hoger ontwerp kritisch overslagdebiet voor kleidijken leidt tot benodigde maatregelen als het toepassen van een stevige plastische klei, met een relatief hoge cohesie (zie voetnoot Tabel 3.1), dan wel een flauwer talud. Voor kleidijken geldt echter dat het boven een bepaald overslagdebiet nauwelijks meer uitmaakt hoeveel de overslag nog toeneemt. Indien de bekleding stabiel is volgens het Edelman Joustra criterium (Bijlage D van de Schematiseringshandleiding Grasbekleding) dan maakt het niet uit of er 1, 5 of 10 l/s/m water over de dijk stroomt.

Voor zanddijken met een kleibekleding geldt dit in mindere mate, maar ook hierbij zal vanaf een bepaald overslagdebiet, afhankelijk van specifieke lokale omstandigheden, het niet meer uitmaken hoeveel meer overslag over de dijk stroomt. Als de maximale infiltratiecapaciteit van het talud is bereikt dan zal het meerdere simpelweg afstromen over het talud.

4.3.2. WBI2017

In Bijlage B.4 en Bijlage B.5 staat de beoordeling van grasbekledingen in het WBI in het algemeen beschreven. De beoordeling van grasbekledingen op het binnentalud, waarbij de golfoverslagcondities relevant zijn, is hieronder in detail beschreven.

In het Wettelijk beoordelingsinstrumentarium is een stabiliteitsmodel, de zogenoemde cumulatieve overbelastingsmethode, geïmplementeerd welke dient te worden gehanteerd in de huidige beoordelingsronde (2017 - 2023). Bij de cumulatieve overbelastingsmethode wordt per overslaande (of olopende) golf de frontsnelheid rekenkundig bepaald. Wanneer

het kwadraat van deze snelheid (U^2) groter is dan een kritische snelheid in het kwadraat (U_c^2), dan wordt de grasbekleding overbelast. Alle overbelastingsgevallen in een storm worden bij elkaar opgeteld. Indien de overbelasting een kritische waarde (D) overschrijdt, dan wordt verondersteld dat de grasbekleding faalt. Het model is als volgt in formulevorm:

$$\sum_{i=1}^N (U_i^2 - U_c^2) = D$$

Waarbij

N = aantal golffronten dat het te toetsen punt passeert met $U > U_c$ (-)

U_i = frontnelheid van de i -de golf in de beschouwde tijdspanne op het te toetsen punt
(m/s)

U_c = kritische frontnelheid (m/s)

D = cumulatieve overbelasting (m^2/s^2)

De kritische stroomsnelheid U_c (de feitelijke sterkteparameter) is afhankelijk van de graskwaliteit. Deze kan nog met een coëfficiënt gecorrigeerd worden indien er sprake is van een overgang welke de zode onderbreekt. De optredende stroomsnelheid U_i (de feitelijke belastingsparameter) kan nog gecorrigeerd worden door gebruik te maken van een versnellingsfactor (in het geval van een relatief lang en steil binnentalud) of een andere factor welke de invloed van een overgang op de stroomsnelheid incorporeert.

De cumulatieve overbelastingsparameter D geeft de mate van schade weer. Zo is een waarde van $D = 7000 m^2/s^2$ de rekenkundige waarde welke hoort bij 'bezwijken van de grasmat'.

Voor het binnentalud (belasting in de golfoverslagzone) wordt er bij het WBI (2017) echter niet direct gebruik gemaakt van de cumulatieve overbelastingsmethode, maar een methode toegepast die gebaseerd is op de cumulatieve overbelastingsmethode. Deze methode is hieronder beschreven.

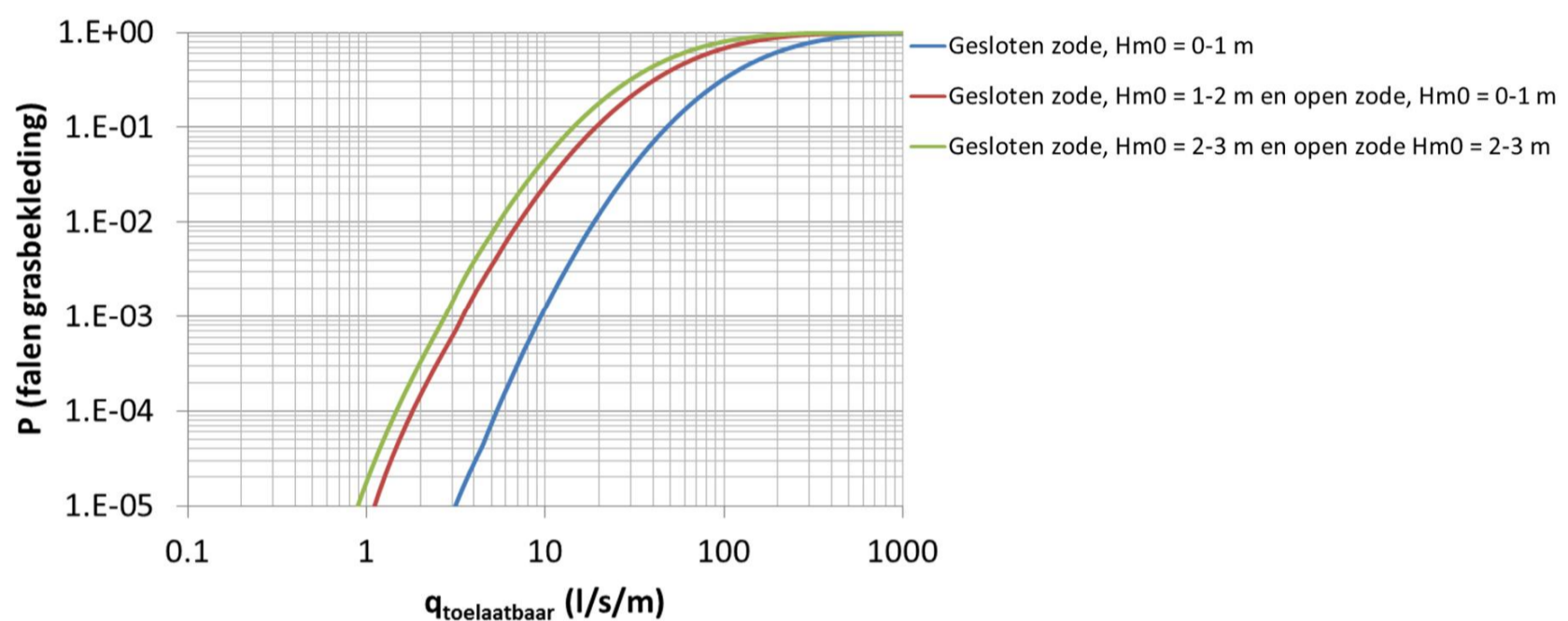
Allereerst dient de gebruiker (bij een gedetailleerde toets) een golfhoogteklasse en de graskwaliteit te bepalen. Op basis daarvan wordt de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet bepaald. De kansverdeling van het kritisch overslagdebiet is een lognormale verdeling met de waarden zoals weergegeven in Tabel 4.1 (μ is de verwachtingswaarde en σ is de standaard afwijking van het natuurlijk logaritme van het kritieke overslagdebiet). Dit kritisch overslagdebiet bepaalt als het ware de sterkte van de bekleding.

De beoordeling vindt plaats door de hydraulische belasting (kansverdeling optredende overslagdebiet) te combineren met de sterkte (kansverdeling van het kritische overslagdebiet zoals gegeven in Tabel 4.1) en hieruit een faalkans uit te rekenen die wordt vergeleken met de norm.

Tabel 4.1 Parameters van de lognormale verdeling voor het kritieke overslagdebiet bij verschillende golfhoogteklassen en zodekwaliteit ([33])

Golfhoogteklasse	Gesloten zode		Open zode	
	μ	σ	μ	σ
0-1 m	225	250	100	120
1-2 m	100	120	70	80
2-3 m	70	80	40	50

Het bovenstaande is inzichtelijk gemaakt door de lognormale verdelingen te plotten. Deze plots zijn weergegeven in Figuur 4.9.



Figuur 4.9 Grafische weergaven van de kans op falen van de grasbekleding als functie van het optredende golfoverslagdebiet, golfhoogte en graskwaliteit. Deze grafiek geeft als het ware de 'sterkte' van de grasbekleding weer

Voorbeeld 'sterkte' van de grasbekleding conform WBI2017:

Het binnentalud is bekleed met een gesloten zode. De externe belasting bestaat uit een significante golfhoogte tussen 0 en 1 m. De blauwe lijn in Figuur 4.9 is van toepassing. In de tabel valt af te lezen dat de parameters μ en σ gelijk zijn aan respectievelijk 225 l/s/m en 250 l/s/m. Op basis van de bovenstaande figuur kan worden afgelezen dat, gegeven een overslagdebiet van 100 l/s/m, de kans op falen van de grasbekleding gelijk is aan 0,3 (30%). Bij 10 l/s/m is deze kans gelijk aan ($10^{-3} = 0,1\%$) en bij 1 l/s/m is deze kans (veel) kleiner dan 10^{-5} .

Deze methodiek is onderbouwd met een tweetal studies (referentie [8] en [13]). In deze studies zijn probabilistische sommen uitgevoerd op basis van de cumulatieve overbelastingmethode, vervolgens is er een vertaalslag gemaakt naar overslagdebieten en is aangetoond dat de hierboven gegeven verdeling van het kritisch overslagdebiet gebruikt kunnen worden ten behoeve van het WBI2017. Deze WBI2017 aanpak mag overigens alleen worden toegepast indien wordt voldaan aan de volgende toepassingsvoorwaarden (referentie [28]):

- Graskwaliteit is een open zode of een gesloten zode
- $H_{m0} \leq 3$ m. De golfhoogte wordt bepaald door het uitvoeren van een HBN berekening bij 0,1 l/s/m gegeven de doorsnede eis voor het faalmechanisme GEKB.
- Taludhelling flauwer dan 1V:4H of kleilaagdikte $\geq 0,4$ m.

4.3.3. Vergelijking OI en WBI

De geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud moet conform het WBI2017 gedetailleerd worden beoordeeld als het overslagdebiet groter is dan 0,1 l/s/m bij de norm trajectkans. Dit is een aanzienlijk hogere kans (minder streng) dan de doorsnede-eis voor gras erosie kruin en binnentalud welke bij het ontwerp kritisch overslagdebiet in het OI2014 wordt gebruikt. Het is duidelijk dat de kruinhoogte bij een ontwerp overslagdebiet van 0,1 l/s/m hoger zal zijn dan het hydraulische belastingniveau bij 0,1 l/s/m bij de norm, waardoor de geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud conform het WBI2017 geen probleem zal zijn als gekozen wordt voor een ontwerp kruinhoogte bij 0,1 l/s/m.

Hoe dit uitpakt voor ontwerp overslagdebieten van 1, 5 of 10 l/s/m zal afhankelijk zijn van specifiek lokale omstandigheden. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat het hydraulisch belastingniveau van 0,1 l/s/m bij de norm lager ligt dan de ontwerp kruinhoogte bij een kritisch overslagdebiet van 1, 5 en of 10 l/s/m. In dat geval zal conform het WBI2017 de stabiliteit van de bekleding geen significante faalkans hebben, terwijl in het OI2014 wel een controle op de stabiliteit noodzakelijk is (zie Paragraaf 4.2.2 en Paragraaf 4.3.1). Een voorbeeldberekening hiervan is gegeven in Bijlage D.

Verder heeft men bij het WBI2017 en OI2014v4 de mogelijkheid om af te wijken van de aanbevolen paden. Het ontbreekt nog echter aan goede richtlijnen hoe dit gedaan dient te worden. Binnen het WBI heeft de gebruiker de mogelijkheid om te kiezen voor andere waarden van de verdeling van het kritieke golfoverslagdebiet (in de beoordelingssoftware Ringtoets zijn dit parameters welke de gebruiker vrij kan kiezen). Dergelijke gewijzigde waarden zouden onderbouwd dienen te worden door gebruikmaking van de cumulatieve overbelastingsmethode. De bevindingen in [13] geven hiervoor een eerste goede aanzet.

Idealiter zou er niet meer gerekend hoeven te worden in termen van het overslagdebiet maar zou er direct gerekend kunnen worden met de cumulatieve overbelastingsmethode (welke is gebruikt als onderbouwing van het rekenen met golfoverslagdebieten), zoals ook bij golfoploop het geval is.

4.4. Overige bijdragen aan faalmechanismen

Naast de behandelde interactie van golfoverslag met de geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud en macrostabiliteit binnenwaarts heeft golfoverslag ook een effect op falen door andere geotechnische mechanismen welke niet in het Ontwerpinstrumentarium of het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium zijn beschreven maar wel aandacht verdienen. Deze zijn hieronder nader beschreven.

4.4.1. Scheurvorming, graverij en andere beschadigingen

Beschadigingen aan het talud of de kruin van de dijk, zoals scheuren, kunnen ook ontstaan door andere mechanismen dan de geotechnische mechanismen genoemd in Figuur 3.1. Bij dit soort beschadigingen kan bijvoorbeeld gedacht worden aan scheurvorming door verdroging of beschadigingen door dierlijke graverij.

Wanneer er nagenoeg geen golfoverslag over de dijk optreedt, hoeven deze beschadigingen geen probleem te zijn. Wanneer er zware golfoverslagcondities optreden, kan een beschadiging zoals een scheur een zwakke plek zijn met betrekking tot erosie van het binnentalud. Verder kunnen beschadigingen ook een intredepunt zijn voor het overslaande water. Doordat het overslaande water de dijk gemakkelijker binnen kan dringen zal er sneller verweking optreden en/of zal de freatische lijn in de dijk sneller stijgen. Hierdoor kan er sneller macro-instabiliteit of instabiliteit van de bekleding optreden. Verder geeft snelle infiltratie in combinatie met zandinsluitingen een groot risico (zie Paragraaf 4.2.3.2).

Voor zanddijken met een kleibekleding geeft het Ontwerp Instrumentarium ([35]) de volgende aanbeveling:

Dikte kleilaag

Bij een zanddijk met een kleibekleding heeft de kleibekleding verschillende functies. Voor de toepassing van de rekenwaarden van het kritieke overslagdebiet van 1-10 l/s/m uit tabel 5 moet sprake zijn van een minimale gegarandeerde dikte van 0,4 m. Vanuit de substraatfunctie voor het gras en vooral het voorkomen of in de hand houden van graafgangen van konijnen, ratten, muizen en mollen tot in de zandkern zal een grotere dikte moeten worden aangelegd: 0,8 m. Ook vanwege de stabiliteit van de bekleding bij golfoverslag kan het nodig zijn om een dikkere laag aan te leggen. Hiervoor wordt verwezen naar de vigerende leidraden. Tot slot wordt opgemerkt dat een dikkere kleilaag een gunstige invloed heeft op het infiltratiedebiet in de dijk en hiermee op de binnenwaartse macrostabiliteit.

Graverij

De graafgangen van muizen bevinden zich in de bovenste (ongeveer) 15 cm van het talud (referentie [39]). Ter illustratie is een voorbeeld van muizengangen weergegeven in Figuur 4.10. Ook de gangen van mollen en woelratten bevinden zich voornamelijk in deze bovenste laag met ook wat diepere gangen en holtes (0,25 - 0,4 m) zoals nest- en voorraadruimtes (referentie [34]). Konijnengangen kunnen voorkomen bij te dunne kleilagen, of bij plaatselijke afwezigheid van voldoende klei, op zanddijken (referentie [34]). Het aanleggen van een kleilaag van 0,8 m op het binnentalud zal het risico ten aanzien van graverij door deze dieren bij golfoverslag aanzienlijk verminderen.



Figuur 4.10 Graverij door muizen. Bron: [39]

Graverij van grotere dieren, zoals bevers (voornamelijk buitentalud), muskusratten, dassen en vossen, zal nog steeds een aanzienlijk risico vormen wanneer er een kleilaag van 0,8 m is aangelegd. Deze dieren kunnen gangen graven die tot diep in de kern van de dijk gaan en daarmee door de beschermende kleilaag heen. Dit moet altijd worden voorkomen of verholpen, indien er sprake is van (aanzienlijke) golfoverslag (referentie [34]). Graafwerkende voorzieningen aanbrenge in het binnentalud zouden een optie kunnen zijn om het risico van graverij door grotere dieren te verminderen. Hier zijn echter momenteel nog geen ontwerpuitgangspunten voor gedefinieerd. Dit wordt opgepakt door de werkgroep Preventie maatregelen dierlijke graverij. (referentie [51]).

Begin juli 2018 zal op een dijk langs de Hollandse IJssel een infiltratieproef worden uitgevoerd in het kader van de POV Macrostabieliteit. Het doel hiervan is om het effect van infiltratie gedurende circa 10 uur op de waterspanningen in de kern van de dijk te onderzoeken. Volgens de beheerder zijn er in dit stukje dijk veel muizengangen en mogelijk kan er iets over het effect hiervan worden geleerd bij een gering overloopdebiet van één à enkele liters per strekkende meter dijk. Opgemerkt wordt dat dit geen onderzoeksdoel van de proef is, het zou dus gaan om 'bijvangst'.

Bij hoogwater zullen de uiterwaarden onderlopen. Dit betekent dat (land) dieren die zich in de uiterwaarden begeven zich waarschijnlijk naar de winterdijk (en daarachter) zullen verplaatsen ([47]). Het valt dus te verwachten dat in die periode er meer graverij plaats zal vinden. Het verdient dus de aanbeveling om bij ondergelopen uiterwaarden extra goed op te letten of graverij plaats heeft gevonden en om dit zo snel mogelijk te herstellen.

Gebaseerd op het bovenstaande zullen er strengere eisen aan reparaties van beschadigingen gesteld moeten worden naarmate er zwaardere golfoverslagcondities worden toegestaan. Zoals beschreven in het beheer en onderhoudsplan van Waterschap Rivierenland (referentie [51]) zullen graverijen direct hersteld moeten worden.

Vervormingen van stabiliteitsverhogende constructieve elementen

Stabiliteitsverhogende constructies zijn bijvoorbeeld diepwanden en damwanden. Deze constructies worden toegepast wanneer de binnenwaartse macrostabiliteit onvoldoende is en er bijvoorbeeld weinig ruimte is voor oplossingen in grond. De constructies bevinden zich vaak in de binnenteen of binnenkruin van de dijk om hier de kruin dan wel de kruin en het binnentalud te ondersteunen. De hoogte van de dijk wordt in dit geval niet door de constructie verzorgd, maar door het grondlichaam. Indien hiervan sprake is en er wordt ontworpen met een hoger overslagdebiet dan dient hiermee rekening te worden gehouden. Dit wordt hier summier toegelicht en valt verder buiten het kader van dit rapport.

De overslag zelf zal geen invloed hebben op vervormingen maar eventuele vervorming kunnen wel effect hebben op de overslagdebieten (bijvoorbeeld kruindaling). Daarnaast kunnen beschadigingen door vervormingen een aangrijppunt of een inlaatpunt zijn voor water. Inhoudelijk is dit verder toegelicht in Bijlage G.

4.4.2. Piping

Golfoverslag heeft geen invloed op het primaire mechanisme piping zelf; het ontstaan van een zand meevoerende wel staat los van golfoverslag. Echter, als deze zand meevoerende wel eenmaal is ontstaan, kan golfoverslag wel invloed hebben over het verdere verloop van het pipingproces. Wanneer er veel water over de dijk stroomt, zal het lastig worden om een zand meevoerende wel te detecteren tijdens inspecties. Hierdoor is het mogelijk dat er niet tijdig maatregelen getroffen kunnen worden, zoals het opkisten van de wel met zandzakken.

Het opkisten van een wel met zandzakken brengt het pipingproces in evenwicht door het peil in de zand meevoerende wel te verhogen en daarmee het verval over het pipingkanaal te verlagen. Grote golfoverslagvolumes zouden de opkisting van zandzakken echter kunnen beschadigen, waardoor het pipingproces weer doorgaat. Ook kan golfoverslag het onwerkbaar maken voor personen die de zandzakken plaatsen.

Naast het opkisten met zandzakken kan het pipingproces in theorie ook in evenwicht komen doordat de zand meevoerende wel zichzelf opkist. Het meegevoerde zand zorgt er voor dat de rand van de zandkrater steeds iets verhoogt waardoor het kan voorkomen dat het verval over het pipingkanaal voldoende afneemt om het pipingproces in evenwicht te brengen. Wanneer er golfoverslag over de dijk plaatsvindt, kan dit er voor zorgen dat de zandkrater instort en het pipingproces weer verder gaat. In de praktijk is het echter onwaarschijnlijk dat dit proces optreedt, omdat de wel vaak ver van de hiel van de dijk ligt waar golfoverslag weinig invloed heeft. Ook ligt de wel vaak in een bermsloot waar de wel zichzelf toch al niet kan opkisten door stroming in de sloot ([47]).

Anderzijds kan golfoverslag ook een positief effect hebben op het pipingproces. Wanneer de zand meevoerende wellen zich in een sloot of andere waterpartij bevindt, kan golfoverslag er voor zorgen dat het binnendijs slootpeil toeneemt en het verval over het pipingkanaal voldoende afneemt om het pipingproces in evenwicht te brengen.

Wanneer overwogen wordt om zwaardere overslagcondities toe te staan bij dijken die gevoelig zijn voor piping, dient te worden meegenomen of bovenstaande effecten kunnen optreden. Het is afhankelijk van de lokale omstandigheden in hoeverre deze overwegingen relevant zijn en binnen een ontwerp moeten worden meegewogen.

4.5. Samenvatting

De invloed van de keuze van het kritisch overslagdebiet op het ontwerp en de beoordeling van de geotechnische stabiliteit van het binnentalud en de bekleding zijn hieronder samengevat.

Relatie golfoverslagdebiet en bekleding (graszode) op de kruin en het binnentalud

Afschuiving binnentalud

In het Ontwerpinstrumentarium wordt benoemd dat voor kleidijken waarvan de bekleding stabiel is volgens het Edelman Joustra criterium het niet uit maakt of er 1, 5 of 10 l/s/m water over de dijk stroomt. Voor zanddijken met een kleibekleding geldt dit in mindere mate, maar ook hierbij zal vanaf een bepaald overslagdebiet het niet meer uitmaken hoeveel meer overslag over de dijk stroomt. Bij deze dijken wordt een minimale gegarandeerde kleilaagdikte van 0,4 m genoemd, maar vanuit de functie van het voorkomen van doorgaande graverij tot in de zandkern wordt 0,8 m aanbevolen.

Graserosie kruin en binnentalud

Voor het binnentalud (belasting in de golfoverslagzone) wordt er bij het WBI ([48]) gebruik gemaakt van een methode die gebaseerd is op de cumulatieve overbelastingsmethode. De beoordeling vindt plaats door de hydraulische belasting (kansverdeling optredende overslagdebiet) te combineren met de sterkte (kansverdeling van het kritische overslagdebiet, gebaseerd op de cumulatieve overbelastingsmethode) en hieruit een faalkans uit te rekenen die wordt vergeleken met de norm. De voorwaarden voor het toepassen van deze methode zijn:

- Graskwaliteit is een open zode of een gesloten zode
- $H_{m0} \leq 3$ m. De golfhoogte wordt bepaald door het uitvoeren van een HBN berekening bij 0,1 l/s/m gegeven de doorsnede eis voor het faalmechanisme GEKB.
- Taludhelling flauwer dan 1V:4H of kleilaagdikte $\geq 0,4$ m.

Verder heeft men bij het WBI2017 en OI2014v4 de mogelijkheid om af te wijken van de aanbevolen paden. Idealiter zou er niet meer gerekend hoeven te worden in termen van het overslagdebiet maar zou er direct gerekend kunnen worden met de cumulatieve overbelastingsmethode. Het is onduidelijk in welke gevallen dit wel en niet mogelijk is. Hiervoor is het nodig om verschillende cases of voorbeelden te beschouwen. Speciale aandacht dient besteedt te worden aan overgangen en discontinuïteiten. Deze worden separaat behandeld in Hoofdstuk 5.

Relatie golfoverslag en macrostabiliteit

In het ontwerpinstrumentarium wordt een voorlopige werkwijze gegeven voor het in rekening brengen van een zwaarder golfoverslagdebiet dan 1 l/s/m bij macrostabiliteit. Deze semi probabilistische methode is in de meeste gevallen conservatief, echter er zijn ook gevallen waarbij de methode niet conservatief is. In het Wettelijk beoordelingsinstrumentarium wordt bij een zwaarder golfoverslagdebiet dan 1 l/s/m doorverwezen naar een toets op maat waarbij rekening gehouden moet worden met de invloed van golfoverslag op de waterspanningen in de dijk.

Een toets op maat kan gedaan worden met de probabilistische rekenmethode met fragility curves. Voor het toepassen van deze methode is de volgende aanvullende informatie nodig: het effect van golfoverslag op de stabiliteit (infiltratiesnelheid, verandering freatische lijn, effect van verandering freatische lijn op stabiliteit) en de kansverdeling van verschillende overslagcondities.

Uit recent onderzoek is gebleken dat heterogeniteit van het binnentalud een grote invloed kan hebben op de stabiliteit van het binnentalud. Vooral bij dijken die hoofdzakelijk opgebouwd zijn uit klei vormt een relatief kleine insluiting van zand een aanzienlijke afname van de stabiliteit van het binnentalud. Het is daarom zeer belangrijk om te weten hoe de dijk exact is opgebouwd om de afweging te kunnen maken of er wel/niet zwaardere golfoverslagcondities kunnen worden toegestaan. De opbouw van de dijk en de doorlatendheid van de toplaag moeten goed gedocumenteerd zijn, aangezien er momenteel nog geen techniek beschikbaar is die bijvoorbeeld zandinsluitingen voldoende goed kan opsporen. Verder zou er nog onderzocht moeten worden of het mogelijk is dergelijke taluds met zandinsluitingen met een geringe ingreep bestand te maken tegen golfoverslag.

Bij de beoordeling van de stabiliteit ten aanzien van Macrostabieliteit binnenwaarts wordt het risico op een doorbraak meegenomen bij bepaalde glijvlakken. Kleine glijvlakken, bijvoorbeeld een instabiele slootkant, worden minder streng beoordeeld dan glijvlakken die door de bovenste helft van het talud of de kruin van de dijk gaan. Bij de kleine glijvlakken wordt ervan uitgegaan dat er reststerkte aanwezig is. Indien er echter sprake is van golfoverslag, dan komt de kern van de dijk bloot te liggen en zal er minder reststerkte zijn dan waarvan kan worden uitgegaan zonder golfoverslag. Dit dient gecontroleerd te worden als er zwaardere golfoverslagcondities worden toegestaan.

Verder moet opgemerkt worden dat de dijkhoogte eveneens invloed heeft op de stabiliteit van het talud en dat hoe hoger de dijk, des te lager de stabiliteitsfactor en des te hoger de faalkans. Een ontwerp met een hogere waarde van het kritisch overslagdebiet, dus een lagere ontwerpkuinhoogte, heeft in dat opzicht een positief effect en leidt tot een kleinere opgave ten aanzien van macrostabieliteit.

Welke van de bovengenoemde effecten optreedt en doorslaggevend is hangt af van specifieke lokale omstandigheden en zal per locatie bekeken moeten worden. Ook hiervoor kan het beschouwen van enkele casussen uitkomst bieden.

Golfoverslag en beschadigingen van niet-geotechnische aard (graverij, verdroging en vervorming)

Beschadigingen (zoals scheurvorming door verdroging en dierlijke graverij) kunnen zwakke plekken vormen met betrekking tot erosie en infiltratie versnellen (waardoor instabiliteit sneller kan optreden). Daarom zullen er strengere eisen aan reparaties van beschadigingen gesteld moeten worden naarmate er zwaardere golfoverslagcondities worden toegestaan.

Verder geeft het OI aan dat voor een zanddijk met een kleibekleding waar een kritiek overslagdebiet van 1-10 l/s/m wordt toegepast sprake moet zijn van een minimale gegarandeerde dikte van 0,4 m (Tabel 3.1). Echter, vanuit de substraatfunctie voor het gras en vooral het voorkomen of in de hand houden van graafgangen van konijnen, ratten, muizen en mollen tot in de zandkern zal een grotere dikte moeten worden aangelegd: 0,8 m. Graverij van grotere dieren, zoals bevers, muskusratten, dassen en vossen, zal nog steeds

een aanzienlijk risico vormen wanneer er een kleilaag van 0,8 m is aangelegd. Zoals beschreven in het beheer en onderhoudsplan van Waterschap Rivierenland (referentie [51]) zullen graverijen direct hersteld moeten worden.

Relatie golfoverslag en piping

Wanneer overwogen wordt om zwaardere overslagcondities toe te staan bij dijken die gevoelig zijn voor piping, dient te worden nagegaan of het opkisten van zandmeevoerende wellen nog wel mogelijk is (veiligheid personen en stabiliteit opkisting). Golfoverslag kan ook een positief effect hebben aangaande piping doordat het slootpeil binnendijs verhoogd wordt. Het is afhankelijk van de lokale omstandigheden in hoeverre deze effecten optreden. Er wordt hierbij opgemerkt dat de dijk echter zodanig ontworpen dient te worden dat deze het water moet kunnen keren zonder dat ingrepen, zoals het opkisten van wellen, noodzakelijk zijn. Strikt genomen is piping dus geen belemmering om hogere overslagdebieten toe te laten.

5. Overgangen en discontinuïteiten

5.1. Inleiding

Er zijn vele soorten overgangen en objecten denkbaar. In Deltares (2014, [5]) is een schematisch overzicht gegeven van de verschillende typen denkbare overgangen in grasbekledingen. Hierbij is onderscheid gemaakt in:

- Type belasting (stroming als gevolg van golfoverslag of impact als gevolg van golfklap),
- Oriëntatie van de overgang (horizontaal zoals bijvoorbeeld een berm of verticaal zoals bijvoorbeeld een trap),
- Het wel of niet aanwezig zijn van een knik,
- Het wel of niet aanwezig zijn van een hoogteverschil of een ruwheidsverschil.

Uit de genoemde analyse blijkt dat door het combineren van de bovenstaande opties er in theorie 26 soorten overgangen zijn. Hiervan worden zestien typen als relevant gezien (de overige tien typen overgangen blijken in de praktijk niet of nauwelijks voor te komen). Aangezien dit een vrij groot aantal is, is in overleg met de opdrachtgever ([53]) besloten om in voorliggende analyse de focus te leggen op de volgende soorten overgangen en objecten:

- Wegen
- Op- en afritten
- Rasterpalen
- Trappen
- Knik in de teen
- Bomen

5.2. Ontwerp- en beoordelingsinstrumentaria

In het Ontwerpinstrumentarium (OI2014, [35]) wordt relatief weinig aandacht geschonken aan overgangen. Met betrekking tot het overslagdebiet wordt in het OI2014 een overzichtstabel (zie Tabel 3.1 in voorliggend rapport) weergegeven waarin tevens aandacht aan overgangen is besteedt. In Deltares (2017, [11]) is de bovenstaande tabel samengevat voor het ontwerpen van overgangen. Die samenvattende tabel is opnieuw weergegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1: samenvatting van tabel 5 van het OI2014 met betrekking tot overgangen (overgenomen uit [11])

q (l/s/m)		bovenrivierengebied	overig
$0 \leq q \leq 1$	Kruin en binnentalud	geen eisen	
$1 < q \leq 5$	kruin	geen eisen	
	binnentalud	beperkingen ¹	
5 – 10	kruin	beperkingen ¹	geen eisen
	binnentalud	beperkingen ¹	

1) "...dan dient hier in het ontwerp rekening mee te worden gehouden", zie Tabel 3.1.

In het OI2014 wordt uitgegaan van een 'nette' overgang bij de in de tabel afgegeven waarden. Hier wordt in het OI2014 het volgende over gemeld (quote):

"Bijzondere aandacht is vereist bij objecten en overgangen. In tabel 5 (red: in voorliggend rapport Tabel 3.1) is steeds uitgegaan van een 'nette' overgang. Dat wil zeggen dat tot aan het object of overgang een graszode aanwezig is en dat deze vergelijkbaar is met de graszode elders op het

talud. Door in het ontwerp voldoende aandacht te besteden aan objecten en overgangen kan worden voorkomen dat lokaal zwakke plekken ontstaan. Verschillende manieren kunnen dit voorkomen:

- a. Het treffen van een maatregel bij een overgang of object, waardoor falen van het gras daar niet optreedt, of het falen van de grasbekleding niet leidt tot doorgaande erosie leidend tot een doorbraak. Hierbij kan worden gedacht aan het aanbrengen van dikke erosiebestendige klei rondom een overgang of object of het toepassen van een geotextiel.
- b. Het vermijden van overgangen en objecten groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$, en/of het verplaatsen van overgangen en objecten naar een minder kwetsbare plaats (binnendijks of op de kruin).
- c. Het lokaal hanteren van een lagere rekenwaarde van het kritisch overslagdebiet bij de bepaling van de vereiste kruinhoogte.

Bij het ontwerp moet tevens rekening worden gehouden met de mogelijkheden van beheer en onderhoud.”

Op basis van de bovenstaande analyse kan worden geconcludeerd dat er bij golfoverslag van meer dan 1 l/s/m er in het geval van objecten (groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}$) of overgangen op het binnentalud maatwerk nodig is met betrekking tot het ontwerp van deze objecten of overgangen. Het OI2014 suggereert hier drie principe oplossingen:

- 1 Fysieke maatregel (versterking overgang),
- 2 Verplaatsen of verwijderen van een overgang of object,
- 3 Het lokaal hanteren van een lagere rekenwaarde van het kritisch overslagdebiet.

In het beoordelingsinstrumentarium ([48]) wordt het volgende gemeld met betrekking tot overgangen: “Het effect van overgangen en objecten op de erosiebestendigheid van de grasbekleding wordt niet meegenomen”.

5.3. Beschouwing overgangen

5.3.1. Wegen

Wegen zijn uitgebreid beschouwd in Bijlage J en samengevat in onderhavige paragraaf aan de hand van een voorbeeld.

In dit voorbeeld wordt een weg op de binnenberm beschouwd. In deze situatie zijn er in theorie vier overgangen te beschouwen (zie ook Figuur 5.1):

- 1 Overgang 1: de knik van het boventalud naar de berm
- 2 Overgang 2: de overgang van het gras op het boventalud naar het asfalt
- 3 Overgang 3: de overgang van het asfalt naar het gras
- 4 Overgang 4: de knik van de berm naar het ondertalud



Figuur 5.1 Schematische weergave van de verschillende overgangen bij een weg op de binnenberm van een dijk.

In het ontwerp van de weg op de dijk dient met alle vier deze overgangen expliciet rekening te worden gehouden. In sommige gevallen liggen de overgang 1,2 en 3,4 vrijwel op elkaar en ervaart men dit als één overgang. De specifieke aandachtspunten, gegeven een nette overgang, per type overgang zijn weergegeven in Bijlage J.

Er wordt benadrukt dat een weg op de kruin waarbij het overslagdebiet gelijk of kleiner is dan 5 l/s/m conform OI2014 geen specifieke aandacht behoeft aannemende dat het een nette overgang betreft. Onder een nette overgang wordt verstaan dat de weg en de grasbekleding goed op elkaar aansluiten en dat de graskwaliteit van de zode vergelijkbaar is met de kwaliteit elders op het talud. Hierbij is in het OI niet aangegeven wat een nette overgang is ten aanzien van de funderingslaag en infiltratie. Indien de weg op het binnentalud (binnenwaartse berm) ligt of het ontwerp-overslagdebiet groter is dan 5 l/s/m, dan dient hier wel expliciet aandacht aan te worden besteedt.

Uit de analyse in Bijlage J blijkt dat voornamelijk overgang 3 het grootste risico loopt met betrekking tot falen van de bekleding. Hier treden ruwheidsverschillen op waardoor er meer turbulentie aanwezig is wat leidt tot een grotere hydraulische belasting op het gras. Tevens is de zode hier onderbroken wat leidt tot een lagere sterkte. Er wordt benadrukt dat de in Bijlage J gegeven berekeningen als indicatief moeten worden beschouwd aangezien de berekeningen zijn uitgevoerd met niet gevalideerde waarden van de invloedsfactoren van overgangen. Daarnaast zijn de berekeningen gebaseerd op gekozen waarden van verschillende parameters (zoals bijvoorbeeld de golfhoogte). Bij andere waarden kunnen de conclusies veranderen.

Een aanzienlijk aandachtspunt bij wegen is de vorming van bandensporen. De toelaatbare golfoverslagdebieten zoals gesteld in het ontwerpinstrumentarium zijn alleen van toepassing voor een situatie waarbij de graszode netjes aansluit op de overgang. Het is maar zeer de vraag of dat bij bandensporen het geval is. Dit is niet alleen bij een relatief hoog overslagdebiet (5 tot 10 l/s/m) van toepassing maar ook bij lagere overslagdebieten (1 l/s/m). Aguilar-Lopez et. al 2018 ([1]) laat zien dat bij een weg op de kruin met schade door verkeer bij overgang 3 in Figuur 5.1 aanzienlijk meer erosie optreedt dan bij een volledige grasbekleding op de kruin (zonder overgangen). Om bandensporen te voorkomen is vooralsnog geen eenduidige oplossing voorhanden welke voldoet aan de waterbouwkundige, verkeerskundige en architectonische eisen.

Best practices: Wegen

Het waterschap Rivierenland hanteert de volgende ontwerpuitgangspunten ten aanzien van wegen en paden (integraal overgenomen uit [51]):

Asfaltwegen

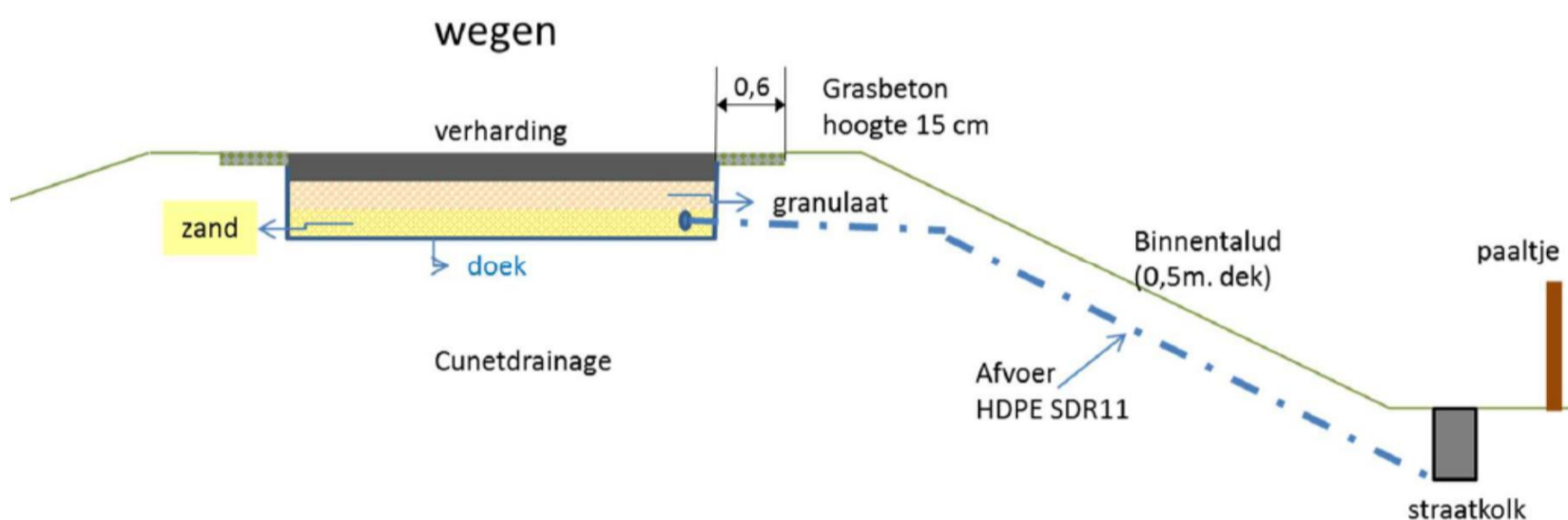
- Asfaltpaden die smaller zijn dan 3,6 meter moeten worden uitgevuld aan weerszijden tot een breedte van 3,6 meter met grasbeton, zie calamiteitenpaden.
- De strook langs het asfalt wordt snel kapot gereden. Daarom een enkele rij grasbeton (12 cm dik) aanbrengen boven de asfaltonderlaag / funderingslaag.
- Wegcunetdrainages zijn toegestaan maar deze mogen niet afwateren in het talud i.v.m. de obstakelwerking (uitstroomopening en verklikkerpaal) in het gras. Afvoerbuizen haaks op de dijk uitvoeren in HDPE SDR11 met minimaal 0,50 meter kleidekking. Aan de buitenzijde van de onderhoudsstrook (4,00 meter uit de teen) onderin een straatkolk laten uitkomen. Water

kan in deze kolk verdampen of naar boven uitstromen. Straatkolk verklikken met paal 15x15 cm. Tot 1,50 meter boven maaiveld.

- Wegmeubilair en verlichting: palen mogen o.g.v. de handreiking op maaiveldniveau niet groter zijn dan 0,15x0,15 m. Meubilair i.v.m. golfoverslag zo veel mogelijk aan de binnenkruinzijde plaatsen.
- Asfaltwapening is toegestaan.
- Trottoir en elementenverharding: gestabiliseerd zandcunet is toegestaan.

Niet toegestaan bij asfaltwegen:

- Houten hekwerken als verkeersgeleiding zijn niet toegestaan i.v.m. belemmering voor maaierwerk.
- Drainmondingen in het talud.



Figuur 5.2 Illustratie van ontwerpuitgangspunten ten aanzien van wegen (bron: [51])

Fietspaden

Uitvoeren conform eis wegbeheerder. Bij een breedte van minder dan 3,6 meter, uitvullen met doorgroeistenen tot 3,6 meter.

5.3.2. Op- en afritten

Op- en afritten zijn uitgebreid beschouwd in Bijlage 0 en samengevat in onderhavige paragraaf.

Op- en afritten zijn grotendeels vergelijkbaar met wegen (zie Paragraaf 5.3.1 en Bijlage J). Het verschil is echter dat bij op- en afritten het overslaande water langs de oprit kan afstromen (in plaats van dwars over de oprit). Deze stromingsconcentratie kan leiden tot een zwaardere belasting. In het ontwerp dient dit nagegaan te worden en dienen er eventueel maatregelen te worden getroffen. Hierbij zijn de volgende maatregelen denkbaar:

- Het verwijderen van de oprit. Dit is veelal echter geen realistisch scenario gezien de functie van de oprit (onderhoudspad of verkeerskundige functie);
- Het ontwerp zodanig maken dat het water niet langs de afrit kan afstromen maar dat het overslaande water de oprit als het ware 'oversteekt';
- Indien het water toch parallel aan de oprit afstroomt, de stroomgeul erosiebestendig maken (bijvoorbeeld een betonnen stroomgoot).
- Het verminderen van de belasting door ter hoogte van de oprit de kruin te verhogen waardoor hier minder water over de kruin stroomt.

Het Waterschap Rivierenland heeft verschillende ontwerpuitgangspunten met betrekking tot op- en afritten. Hiervoor wordt verwezen naar het beheer en onderhoudsplan van WSRL ([50] en [51])

Naast de bovengenoemde aandachtspunten dient een oprit tevens te worden beschouwd als een weg welke is behandeld in Paragraaf 5.3.1.

5.3.3. Rasterpalen

In het OI2014 wordt gesteld dat, indien objecten kleiner zijn dan 0,15 x 0,15 m, er hier geen rekening mee hoeft te worden gehouden. In die zin zullen rasterpalen dus geen directe invloed uitoefenen op de erosiebestendigheid van het binnentalud. Wel zijn er indirecte mechanismen met betrekking tot rasterpalen:

- Schapen gaan mogelijk langs dergelijke palen schuren. Door de aanwezigheid van deze schapen kan het gras rondom een dergelijke paal worden vertrapt.
- Het is mogelijk dat het onderhoud rondom rasterpalen niet goed mogelijk is. Zo kan het bijvoorbeeld zijn dat maaimachines hier niet goed bij kunnen komen waardoor verruiging optreedt of dat de grond minder compact is omdat dit niet door het gewicht van de maaimachine wordt aangedrukt ([41]).

In het ontwerp dient er rekening mee gehouden te worden dat het gras rondom rasterpalen goed kan worden onderhouden. Daarnaast dient er goed gemonitord te worden zodat eventuele beschadigingen door schapen worden opgemerkt en, indien nodig, maatregelen kunnen worden getroffen (zoals het minder of niet toelaten van schapen op de dijk of het plaatsen van verhardingen rondom de rasterpalen). Overigens wordt opgemerkt dat schapen ook een positieve invloed kunnen hebben op de kwaliteit van de grasbekleding. De invloed van schapen wordt verder toegelicht in paragraaf 5.4.

Het Waterschap Rivierenland heeft verschillende ontwerpuitgangspunten met betrekking tot afrasteringen, dijpalen en grenspalen. Hiervoor wordt verwezen naar het beheer en onderhoudsplan ([50] en [51])

5.3.4. Trappen

Indien trappen op het binnentalud worden gelegd en het ontwerp overslagdebiet is groter dan 1 l/s/m dan dient er volgens het OI2014 'hiermee rekening te worden gehouden'. Bij trappen zijn er de volgende aandachtspunten:

- **Uitspoelen zand (zie ook Paragraaf 5.5)**
In de praktijk blijkt dat trappen veelal zijn gebouwd op een stellaag van zand. Dit zand kan uitspoelen. Het ontwerp dient zodanig te zijn dat er geen stellaag van zand wordt gebruikt, dat dit zand niet kan uitspoelen of dat het uitspoelen van zand aantoonbaar niet leidt tot falen van de dijk.
- **Beschadigen door frequente betreding**
Voetgangers zullen doorgaans de trap zelf gebruiken en niet al te vaak langs de trap lopen. Echter, sommige fietsers willen ook de dijk op of af en lopen met de fiets aan de hand. Indien dit wordt verwacht, wordt aanbevolen om naast de trap een zogenoemde betonnen fietsgeultje aan te leggen. Op deze manier zal de fiets niet op het gras komen wat kan leiden tot beschadigingen en is het voor de fietser eenvoudiger om op de dijk te komen. Indien ook andere betredingen naast de trap (honden, watersporters met apparatuur et

cetera) worden verwacht, kan worden overwogen om langs de trap doorgroeistenen aan te leggen.

- **Bezwijken trapelementen**

De trapelementen zelf mogen onder maatgevende belasting niet bezwijken (bijvoorbeeld wegspoelen van de traptreden). Indien dit toch het geval is dan dient de dijk zodanig ontworpen te zijn dat het 'restprofiel' van de dijk de belasting kan weerstaan. Zo hanteert het Waterschap Rivierenland het uitgangspunt dat de trap niet 'in de dijk' maar 'op de dijk' dient te worden aangebracht. Dit kan echter leiden tot stromingscontracties (zie hieronder)

- **Stromingscontracties**

Langs de trap kan een stromingscontractie ontstaan. Dit is een hogere belasting wat tot schade kan leiden, zie ook Figuur 5.3. Dit dient in het ontwerp zoveel mogelijk voorkomen te worden of er dienen maatregelen te worden toegepast waardoor deze belasting kan worden weerstaan (bijvoorbeeld doorgroeistenen).

- **Onderhoud**

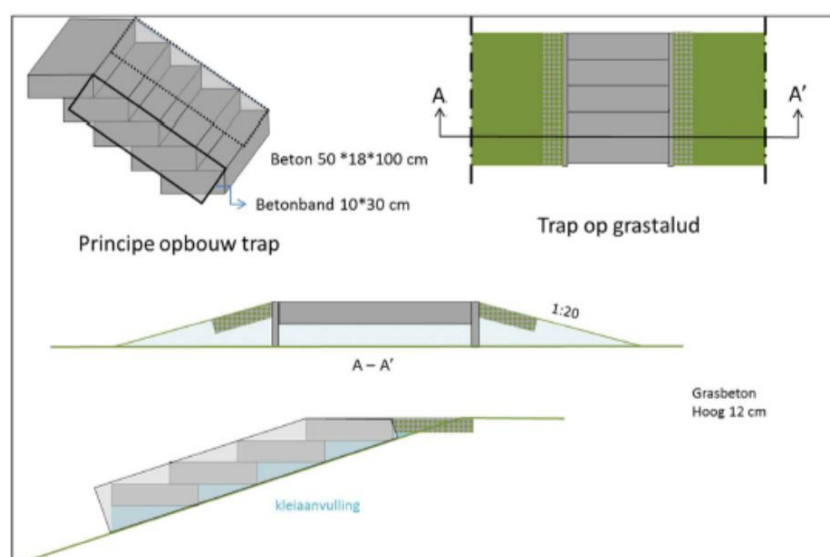
Het onderhoud langs de trap dient eenvoudig te kunnen worden uitgevoerd zodat er een nette aansluiting tussen de trap en de grasbekleding zal zijn. Verder moeten onderhoudsmethoden waardoor de graszode langs de trap beschadigd kan worden (zoals chemische bestrijdingsmiddelen) vermeden worden.



Figuur 5.3 Schade als gevolg van stroomconcentratie na zeer grote overslagdebieten (6 uur, 50 l/s/m)

Best practices: trap mag niet in bestaande kleilaag worden geplaatst

Bij het Waterschap Rivierenland is als eis gesteld dat trappen op grastaluds bovenop de bestaande kleibekleding worden geplaatst. De trap dient echter wel verzonken te zijn in de omliggende kleibekleding. De nieuwe klei wordt dus naar de trap afgewerkt ([51]). Dit is weergegeven in Figuur 5.4. Voor overige aandachtspunten bij het Waterschap Rivierenland wordt verwezen naar het beheer en onderhoudsplan ([50] en [51]).



Figuur 5.4 Ontwerpuitgangspunten trap conform WSRL (2017)

5.3.5. Knik in de teen (of binnenwaartse berm)

De knik in de teen of binnenwaartse berm is een belangrijk aandachtspunt vanwege de volgende aspecten:

- Op de knik treden veelal de hoogste stroomsnelheden op (het overslaande water versnelt op het binnentalud).
- De belasting is extra groot door de aanwezigheid van de knik zelf. De invloedsfactor hiervan is echter beperkt en is meegenomen in de kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet in het ontwerpinstrumentarium. Een voorwaarde hiervoor is dat deze wel 'netjes' moet zijn.
- In sommige gevallen is de knik 'het einde' van de dijk en het begin van een ander stuk grond zoals landbouwgrond. Er zijn situaties waarbij bijvoorbeeld landbouwgrond is omgeploegd 'tot aan de dijk'. Hierdoor ontstaat er een potentieel zwakke overgang tussen de dijk en de omgeploegde landbouwgrond.
- Het onderhoud kan lastig uitvoerbaar zijn bij een scherpe knik. Zo is het denkbaar dat maaimaterieel het gras beschadigt.
- Langs de knik kunnen schapenpaden ontstaan.

Het ontwerpen van de knik vraagt maatwerk. Mogelijke oplossingsmaatregelen zijn om de knik uit te voeren in doorgroeienden, om de knik niet al te scherp te maken of om hier een dikke kleilaag toe te passen.

Best Practices: dikke kleilaag bij de teen

Het Waterschap Rivierenland heeft als uitgangspunt dat de onderlaag van de klei op het buitentalud wigvormig dient te zijn. Deze dient aan de kruin 80 cm dik te zijn en aan de teen dikker dan 2,0 m ([51] en [18]). Voor het binnentalud zijn geen aanvullende eisen gevonden.

5.3.6. Bomen

Bomen hebben de volgende potentiële invloed op de stabiliteit van een waterkering:

- Een boom kan ontwortelen. Doorgaans zijn de ontwortelingskuilen dieper dan dat de toplaag dik is en dient deze als bezweken te worden beschouwd.
- Een boom kan leiden tot een stromingsconcentratie, zie bijvoorbeeld Figuur 5.5
- Een boom geeft schaduw wat invloed kan hebben op de graskwaliteit.
- Een boom heeft bladval wat invloed kan hebben op de graskwaliteit.
- De aanwezigheid van een boom kan leiden tot moeilijker uitvoerbaar onderhoud van de graszode; maaimachines kunnen hier mogelijk niet goed bij komen.
- Er wordt tevens aanbevolen om een analogie te maken met rasterpalen, zie Paragraaf 5.3.3.

Bij objecten zoals rasterpalen met een afmeting kleiner dan 0,15 m x 0,15 dient er volgens het OI2014 geen rekening te worden gehouden in het ontwerp. Voor bomen is dit niet helemaal het geval omdat:

- De boom zal groeien en de diameter mogelijk groter zal worden dan 0,15 m x 0,15 m
- De zogenaamde secundaire effecten (bladval, ontwortelen et cetera) mogelijk maatgevend kunnen zijn.



Figuur 5.5 Voorbeeld van schade als gevolg van stromingsconcentratie en turbulentie na grote overslagdebieten (5,5 uur 50 l/s/m met golfoverslagsimulator)

Er zijn verschillende oplossingsrichtingen denkbaar. De meest voor de hand liggende is om bomen niet toe te staan op de dijk. Indien deze toch wordt toegestaan dient aangetoond te worden dat de dijk desondanks toch de maatgevende belasting kan weerstaan.

Best practises: Bomen

Het Waterschap Rivierenland heeft in beginsel geen beplanting op de dijk ([51]). Indien toch beplanting wordt aangebracht dan zijn er bij het Waterschap Rivierenland verschillende voorschriften voor beschikbaar ([51]).

5.4. Aandachtspunt: schapen

In voorgaande paragrafen is een aantal keer genoemd dat er schade rond overgangen kan optreden door schapen. Tijdens het ontwerp van de dijk kan rekening gehouden worden met schade door schapen door als uitgangspunt te nemen dat schapen niet worden toegelaten op de dijk. Dit is vaak echter ongewenst vanuit zowel waterbouwkundig opzicht als vanuit andere opzichten (verpachting, belevingswaarden). Vanuit waterbouwkundig opzicht zijn schapen juist wel gewenst, omdat ze de grond aantrappen (waardoor bijvoorbeeld muizengaten worden dichtgetrapt en de kleilaag wordt verdicht) en grazen waardoor bomen en struiken niet kunnen ontwikkelen (*“Vier gouden pootjes en een gouden bekkie”*). Een andere mogelijkheid is om schapen wel toe te laten en te voorspellen waar vertrapping van het gras door schapen optreedt (bijvoorbeeld schapenpaden) en hier maatregelen in het ontwerp mee te nemen. Hierbij kan worden gedacht aan bijvoorbeeld het aanbrengen van doorgroeistenen, een verborgen bekleding of een dikker kleipakket. Hierbij dient de oplossingsrichting de schapen niet ‘weg te jagen’ naar een andere plek (waar dan weer schade optreedt aan het gras). Plekken waar dit vaak kan optreden is langs palen of hekwerken (schapen schuren langs het hek) of in/rondom de poort van een grasgebied.

Verder kan er ook in het beheer en onderhoud rekening gehouden worden met schade door schapen. Bijvoorbeeld door te monitoren waar vertrapping van het gras door schapen

optreedt (bijvoorbeeld schapenpaden). Herstellen van het gras op die plaatsen heeft geen zin omdat het logischerwijs valt te verwachten dat op die plekken het gras opnieuw vertrapt zal worden. Indien in kaart wordt gebracht waar de erosie optreedt, zouden daar bovengenoemde versterkingsmaatregelen getroffen kunnen worden.

5.5. Aandachtspunt: uitspoelend zand

Het is van belang dat het ontwerp zodanig is dat er geen zand kan uitspoelen. Indien bijvoorbeeld een trap op een dijktaalud wordt aangelegd is het voor de uitvoerder aantrekkelijk om deze trap op een 'stellaag' van zand te plaatsen (in klei is het erg lastig om de traptreden op de goede hoogte aan te brengen). Dit kan echter tot situaties leiden waarbij het zand onder maatgevende omstandigheden kan wegspoelen. Dit mechanisme is bijvoorbeeld opgemerkt bij proeven met de golfklapgenerator ([41]). Een impressie van dat onderzoek is weergegeven in Figuur 5.6.

Er kan hier op verschillende manieren mee worden omgegaan:

- Het niet gebruiken van zand als stellaag.
- Het zodanig ontwerpen dat het zand niet kan uitspoelen.
- Het zodanig ontwerpen dat het uitspoelen van zand niet leidt tot falen van de waterkering.



Figuur 5.6 *Impressie van test met golfklapgenerator op een trap. Tijdens de testen bleek dat er rondom de trap een laag zand zat welke snel uitspoelde ([41])*

5.6. Aandachtspunt: onderhoudbaarheid van de overgang

De overgang en het onderhoudsmaterieel dienen zodanig te zijn ontworpen dat de grasbekleding tot aan de overgang goed onderhoudbaar is. Om die reden dient het ontwerp getoetst te worden aan de onderhoudbaarheid. Hierbij zijn de inzichten van de onderhoudsmensen van een dijkbeheerder onontbeerlijk. Het is daarom noodzakelijk om deze personen te betrekken in het ontwerp van de dijk.

5.7. Samenvatting en conclusies

Wanneer het toelaatbare golfoverslagdebiet wordt verhoogd van 1 l/s/m naar 5 l/s/m of 10 l/s/m dan dient te worden nagegaan of dit consequenties heeft voor de overgangen op de dijk. In beginsel kan dit worden gedaan door Tabel 5 in het OI2014 te raadplegen. Dit is met betrekking tot overgangen samengevat in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Samenvatting van Tabel 5 van het OI2014 met betrekking tot overgangen

q (l/s/m)		bovenrivierengebied	overig
$0 \leq q \leq 1$	Kruin en binnentalud	geen eisen	
$1 < q \leq 5$	kruin	geen eisen	
	binnentalud	beperkingen ¹	
5 – 10	kruin	beperkingen ¹	geen eisen
	binnentalud	beperkingen ¹	

1) '...dan dient hier in het ontwerp rekening mee te worden gehouden'

Tabel 5.2 is alleen van toepassing op een overgang waarbij het gras 'netjes' aansluit op de overgang en dezelfde kwaliteit heeft als het omringende gras. De tabel kan voor specifieke ontwerpen worden aangescherpt door met behulp van de cumulatieve overbelastingsmethode aanvullende analyses uit te voeren. Dit is als voorbeeld uitgewerkt voor een drietal overgangen rondom een weg op de dijk (zie Bijlage J). Opgemerkt wordt wel dat dit een relatief intensieve exercitie is waarbij er veel onzekerheden zijn met betrekking tot de in rekening te brengen invloedsfactoren in relatie tot de overgang.

Er zijn verschillende typen overgangen behandeld zoals bomen, rasterpalen, wegen, op- en afritten, trappen, bomen en een knik in de teen.

Qua oplossingsrichtingen zijn er op hoofdlijnen drie potentiële oplossingsrichtingen:

1 Het niet toestaan van objecten of overgangen.

Dit geldt vooral voor bomen en in mindere mate voor de overige typen overgangen. Bomen zijn niet toegestaan, mits er in het ontwerp rekening mee gehouden is.

2 Het lokaal verhogen van de kruin zodat lokaal het overslagdebiet lager is.

Mogelijk is dit toepasbaar voor op- en afritten.

3 Het versterken van de overgang.

Er zijn op basis van het beheer en onderhoudsplan van WSRL ([51]) verschillende best practices gegeven maar het is onbekend of ontwerpen welke op die uitgangspunten zijn gebaseerd afdoende zijn. Er is een studie gaande ([5], [10], [11], een samenvatting is weergegeven in Bijlage H) naar potentiële versterkings-maatregelen zoals doorgroeibare textielen. De verwachting is dat de resultaten over enkele jaren beschikbaar komen. Bij het beoordelen van de ontwerpen is expert judgement daarom noodzakelijk.

Bij het ontwerpen van overgangen dient expliciet rekening te worden gehouden met:

- Verkeersbelasting (bijvoorbeeld bandensporen langs een weg),
- Schapenpaden welke veelal langs een overgang liggen,
- Uitvoeringstechnische aspecten zoals het voorkomen van het aanbrengen van een zandlaag nabij een overgang,
- Onderhoudbaarheid: het ontwerp dient zodanig te zijn dat het gras tot aan de overgang goed kan worden onderhouden.

6. Secundaire functies van de dijk in relatie tot het golfoverslagdebiet

6.1. Inleiding

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3, kan een dijk naast de primaire waterkerende functie, ook secundaire functies hebben waaraan eisen gesteld worden. Het kan dat de dijk aan de overstromingskansnormen voldoet terwijl de kans op het verlies van secundaire functies groot is. De enige 'harde' eis aan de waterkering is echter de eis ten aanzien van de overstromingskans, waarop met behulp van het Ontwerpinstrumentarium ontworpen dient te worden gebaseerd op faalkanseisen van afzonderlijke faalmechanismen (zoals besproken in Hoofdstuk 3 en 4). Voor de secundaire functies is het in principe aan de beheerder om eisen te formuleren (referentie [25]). In een memo van KPR (Kennisplatform Risicobenadering, referentie [25]) wordt een raamwerk van stappen gegeven om te komen tot een ontwerp voor een waterkering waarbij naar de verschillende functies wordt gekeken. Het raamwerk is hieronder gegeven in Figuur 6.1 en op een beter leesbaar formaat weergegeven in Bijlage E.

	Functie	Aspect	Ongewenste gebeurtenis	Gevolg	Criterium (praktische definitie grenstoestand)	Betrouwbaarheidseis	Mogelijke invloed op dimensies ontwerp
Functie Waterkeren	Waterkeren	Voorkomen van overstroming	Instroming van grote volumes water over of door de dijk	Overstroming	Overstromingsgevolgen cf. Grondslagen: - schade >10% van schadebedrag MKBA - >1% kans op 1 of meer dodelijke slachtoffers	Norm Per faalmechanisme uit te werken in eisen op doorsnedeniveau cf. OI2014	Alle aspecten
		Onderhoudbaarheid	Onderhoud niet goed mogelijk	Dijk wordt slecht onderhouden en voldoet mogelijk niet aan ontwerpspecificaties	N.t.b.	Taludhelling $\geq 1:2,5$ a $1:3$ Kruinbreedte ≥ 3 m Onderhoudspaden n.t.b.	Kruinbreedte, taludhellingen, onderhoudspaden
		Inspecteerbaarheid	Inspectie niet mogelijk	Verschuiven die horen bij begin van faalproces worden niet opgemerkt, ingrijpen niet mogelijk	$q_{\text{overstag}} > 1.5$ l/s/m	10-100 x Norm	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
		Wateroverlast	Overschrijden kombergend vermogen in achterland	Schade door wateroverlast	Waterdiepte > 0,10 m in één gebied/buurt volgens CBS wijk- en buurtkaart cf. Grondslagen	1/50 per jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
		Zoutbezwaar	Groot overslagdebiet in kustgebieden	Schade aan areaal door hoge concentratie zout in boezemwater (zoutbezwaar)	Gemiddeld chloridegehalte in achterliggend watersysteem: > 2000 mg/l (25% verlies) > 4000 mg/l (50% verlies) > 10.000 mg/l (100% verlies)	1/50 per jaar 1/100 per jaar 1/200 per jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
Overige functies	Faciliteren weg- / railinfrastructuur	Beschikbaarheid weg- / railinfrastructuur	Water en vuil op weg door groot overslagdebiet	Infrastructuur tijdelijk niet beschikbaar	$q_{\text{overstag}} > 1$ l/s/m	snelweg: 1/50 per jaar provinciale weg: 1/25 per jaar regionale weg: 1/10 per jaar railinfrastructuur: 1/50 per jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
	Faciliteren wonen	Standzekerheid	Schade aan woningen door vervormingen dijklichaam	Woningen tijdelijk niet beschikbaar / herstel schade	Afhankelijk van specifieke situatie	Schade: 1/25 jaar Niet-beschikbaarheid: 1/50 jaar	Taludhelling binnentalud, stabiliteitsberm, constructieve voorziening
	Faciliteren kabels en leidingen	Standzekerheid	Schade aan kabels en leidingen door vervormingen dijklichaam	Nutsvoorziening tijdelijk niet beschikbaar	Afhankelijk van specifieke situatie	Huisaansluitingen: 1/10 jaar Regionale K&L: 1/25 jaar Landelijke K&L: 1/100 jaar	Taludhelling binnentalud, stabiliteitsberm, constructieve voorziening
	Faciliteren recreatie	Beschikbaarheid fiets- en wandelpaden	Water en vuil op paden door groot overslagdebiet	Fiets- en wandelpaden niet beschikbaar	$q_{\text{overstag}} > 1$ l/s/m	1/1 jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
	Faciliteren LNC-waarden	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.

Figuur 6.1 Voorstel voor een raamwerk voor de betrouwbaarheidseisen in het ontwerp van waterkeringen (referentie [25])

De invloed van de overslagcondities op de eisen met betrekking tot deze secundaire functies wordt in dit hoofdstuk nader toegelicht.

Het voorliggende rapport is hierin niet compleet en kan verder worden opgepakt zodra de studie van Sweco op dit onderwerp is afgerond (studie volgens het plan van aanpak van referentie [31]). De verwachting is dat deze secundaire functie voornamelijk betrekking hebben tot de begaanbaarheid van de dijk. Om die reden zijn die onderwerpen in de onderstaande paragrafen verder uitgewerkt.

6.2. Begaanbaarheid van de dijk

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3, kan de dijk ook secundaire functies hebben waardoor de dijk begaanbaar moet zijn voor personen en/of voertuigen (verkeersfunctie, functie als evacuatie route, mogelijkheid tot inspectie, recreatieve functie, mogelijkheid tot onderhoud en dergelijke).

De begaanbaarheid van de dijk wordt door verschillende factoren bepaald:

- De weersomstandigheden
- De stabiliteit van de ondergrond
- De mate van golfoverslag

Deze factoren worden in onderstaande paragrafen verder toegelicht

6.2.1. Begaanbaarheid en weersomstandigheden

Extreme condities waarbij maatgevende golfoverslagcondities plaats vinden gaan vaak gepaard met harde wind. Tijdens extreme stormcondities is het mogelijk niet meer veilig om de dijk te betreden voor bijvoorbeeld inspectiedoeleinden (referentie [47]) of evacuatie.

6.2.2. Begaanbaarheid en stabiliteit van de ondergrond

Vanuit geotechnisch oogpunt kan een dijk onbegaanbaar worden, bijvoorbeeld:

- Als er geen weg op de dijk ligt en de kruin van klei met gras is kunnen personen en voertuigen van de dijk afglijden wanneer deze te nat wordt. Vooral bij evacuatie kan dit voor gevaarlijke situaties zorgen. Voor bijvoorbeeld inspecties kan geschikt schoeisel gedragen worden.
- Als er een weg met een standaard wegfundering op de kruin ligt kan er verweking optreden,
- Als er alleen zand onder de wegverharding ligt kan de draagkracht van de weg te laag worden voor bepaalde voertuigen.

Wanneer er zwaardere golfoverslagcondities worden toegestaan bij een dijk, zal er meer water over de kruin stromen en kan de dijk eerder onbegaanbaar worden door (een van) bovenstaande mechanismen. Er zijn echter geen grove vuistregels gevonden om een inschatting te maken van de geotechnische begaanbaarheid bij verschillende golfoverslagcondities. De geotechnische begaanbaarheid zal sterk afhankelijk zijn van de opbouw van de dijk en kan bij een specifiek geval geschat worden door middel van stabiliteitsberekeningen.

6.2.3. Begaanbaarheid en golfoverslag

De golfoverslagcondities (debieten en volumes) waarbij een dijk nog begaanbaar is voor personen en verkeer is beschreven in het EurOtop handboek voor golfoverslag (referentie [20]). Wanneer er goed zicht op het water is en de golfoverslag stroomt nagenoeg horizontaal over de kruin, wat doorgaans het geval is bij dijken, gelden de in Tabel 6.1 gegeven golfoverslag limieten⁴.

⁴ In het EurOtop handboek wordt naast de bovenstaande tabel ook een beschrijving gegeven van de maximaal veilige overslagvolumes voor personen en voertuigen. In de beschrijving staat echter voor het nog veilig betreden van personen op een dijk zowel een maximaal overslagvolume van orde 500 l/m als een maximaal overslagvolume van 600 l/m genoemd. In deze rapportage is het maximaal overslagvolume uit de tabel (van 600 l/m) aangehouden. Verder staat er

Tabel 6.1 Golfoverslag limieten voor personen en voertuigen, vertaald uit (Tabel 3.3, ref. [20])

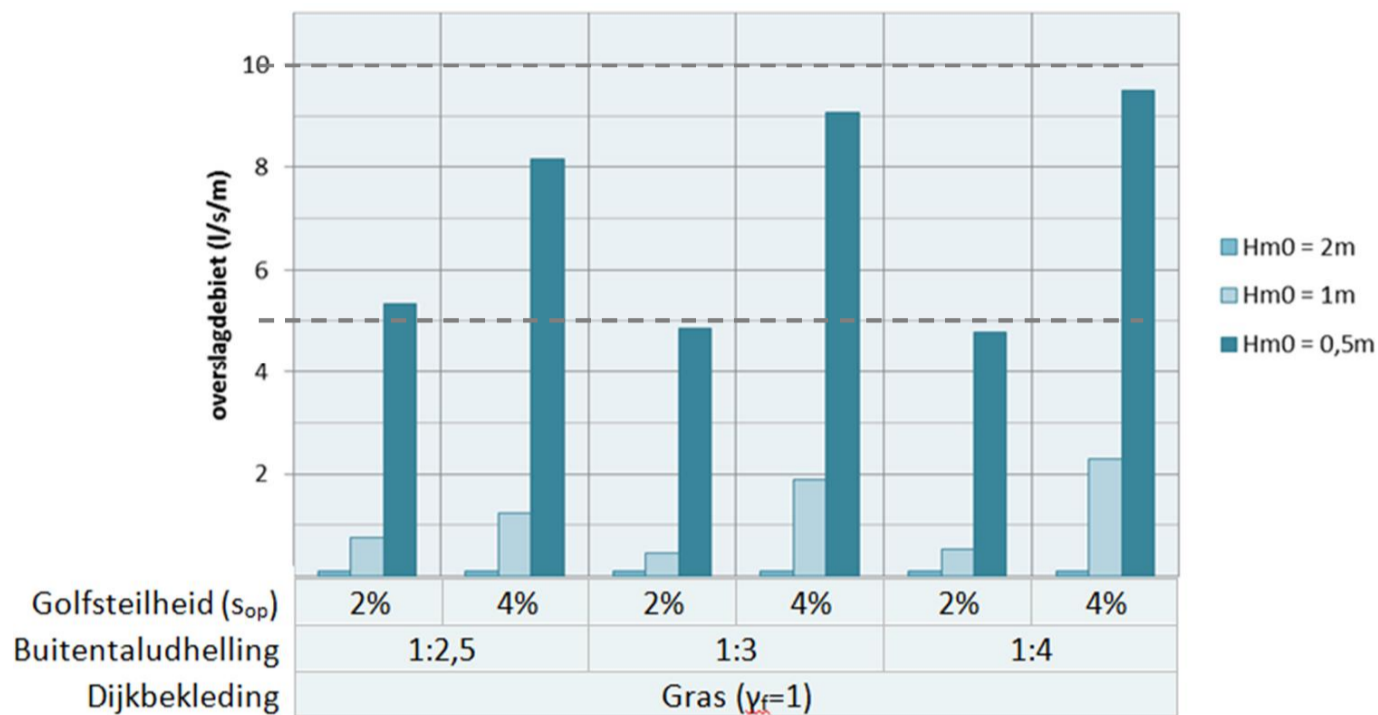
Type en reden van gevaar	Gemiddeld overslagdebiet q (l/s per m)	Maximaal overslagvolume V_{max} (l per m)
Personen op een waterkering bij veel overtoppings geweld, voornamelijk verticale keringen	Geen toegang tot waterkering wanneer meer overslag wordt voorspeld dan:	Geen toegang tot waterkering wanneer meer overslag wordt voorspeld dan:
Personen op een kade of dijk met goed zicht op het water	$H_{m0} = 3$ m	0,3
	$H_{m0} = 2$ m	1
	$H_{m0} = 1$ m	10-20
	$H_{m0} < 0.5$ m	ongelimiteerd
Voertuigen op de waterkering	$H_{m0} = 3$ m	< 5
	$H_{m0} = 2$ m	10-20
	$H_{m0} = 1$ m	< 75
Snelwegen, verkeer met hoge snelheid	Geen toegang wanneer er gevaar is voor vuil wat meegesleurd wordt de weg op	Geen toegang wanneer er gevaar is voor vuil wat meegesleurd wordt de weg op

Bij de golfoverslag limieten uit Tabel 6.1 is het maximaal overslagvolume maatgevend voor het toelaten van personen en/of voertuigen op de dijk (ref. [20]). Als een enkele golf personen of voertuigen mee kan sleuren geeft dit immers al een gevaarlijke situatie, onafhankelijk van het gemiddelde overslagdebiet. De gemiddelde overslagdebieten in Tabel 6.1 geven een indicatie van het gemiddelde overslagdebiet wat hoort bij de gegeven golfhoogte en het maximaal overslagvolume. Het overslagdebiet wat bij een maximaal overslagvolume hoort van 600 of 2000 l/m varieert echter sterk met de golfcondities en de geometrie van de dijk.

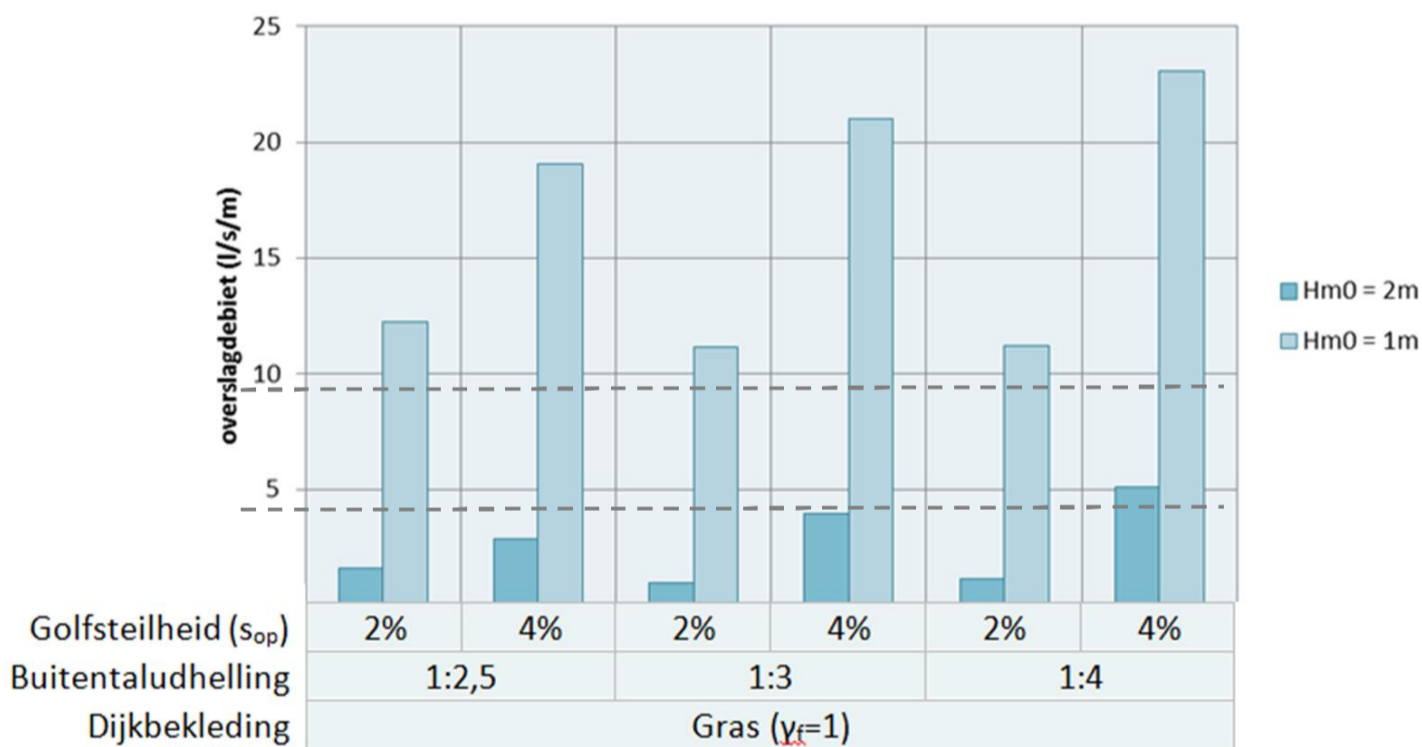
Om een indicatie te geven van de gemiddelde overslagdebieten waarbij de dijk nog toegankelijk is, is in Figuur 6.2 en Figuur 6.3 voor dezelfde dijkgeometrieën en golfcondities als eerder gebruikt in Hoofdstuk 2 het gemiddeld overslagdebiet gegeven waarbij de dijk nog toegankelijk is voor personen (Figuur 6.2) en voertuigen (Figuur 6.3).

In Figuur 6.2 is te zien dat wanneer een dijk ontworpen wordt op een gemiddeld overslagdebiet van 5 l/s/m, de dijk eerder de begaanbaarheidsfunctie voor personen niet meer zal vervullen dan de primaire waterkerende functie wanneer de maatgevende golfcondities golven een H_{m0} van 1m of hoger bevatten. Wanneer de maatgevende golfcondities maximaal golven met een H_{m0} tussen 0,5 m en 1 m bevatten zal het maximale gemiddelde overslagdebiet waarbij de dijk nog toegankelijk is tussen de 0,8 en 9,5 l/s/m liggen. Afhankelijk van de condities en de geometrie zal de dijk eerst de begaanbaarheidsfunctie of de primaire functie verliezen. Wanneer de dijk is ontworpen op een gemiddeld overslagdebiet van 10 l/s/m, zal bij maatgevende golfcondities hoger dan 0,5 m de dijk onbegaanbaar zijn voor personen voordat de dijk faalt aangaande de primaire waterkerende functie.

in de begeleidende tekst uitgelegd dat bij een H_{m0} kleiner dan 0,5 m geen limiet voor de begaanbaarheid wordt gesteld omdat de kans op overslagvolumes groter of gelijk aan 600 l/m zeer klein is. Deze aanname wordt in dit hoofdstuk aangehouden.



Figuur 6.2 Indicatie maximaal gemiddeld overslagdebiet waarbij personen de dijk nog kunnen betreden (maximaal overslagvolume van 600 l/m bij een stormduur van 6 uur)



Figuur 6.1 Indicatie maximaal gemiddeld overslagdebiet waarbij voertuigen de dijk nog kunnen betreden (maximaal overslagvolume van 2000 l/m bij een stormduur van 6 uur)

Voor de begaanbaarheid van de dijk voor voertuigen geldt dat wanneer de maatgevende condities met golven hoger dan 1 m en een overslagdebiet van 5 l/s/m of hoger treedt op, de begaanbaarheidsfunctie niet meer vervuld wordt voordat de primaire waterkerende functie in gevaar komt (Figuur 6.3).

6.3. Betrouwbaarheidseis van secundaire functies in relatie tot overstromingskansseis

Het hoeft echter geen probleem te zijn dat de kans van het verlies van secundaire functies groter is dan de kans van het verlies van de primaire waterkerende functie. De betrouwbaarheidseis van de begaanbaarheid van de dijk is afhankelijk van de functie waar deze uit voortkomt. De betrouwbaarheidseis kan voortkomen uit secundaire functies zoals

een verkeersfunctie, functie als evacuatie route, mogelijkheid tot inspectie en mogelijkheid tot onderhoud. Een indicatie van de betrouwbaarheidseisen met betrekking tot een aantal van deze functies is gegeven in Figuur 6.1.

Bijvoorbeeld, wanneer de begaanbaarheid van de dijk alleen voortkomt uit een 'gewone' verkeersfunctie dan zal de betrouwbaarheidseis minder streng zijn (orde 1/10 jaar, zie regionale weg Figuur 6.1). In dit geval hoeft de begaanbaarheidsfunctie van de dijk niet maatgevend te worden voor het maximaal toelaatbare overslagdebiet, ook bij maatgevende condities met grote golven. In dit geval is het simpelweg toegestaan dat de dijk niet meer begaanbaar is voor personen en/of voertuigen bij de maatgevende condities ten aanzien van de sterkte van de dijk (voor het vervullen van de primaire waterkerende functie).

Echter, wanneer de dijk bijvoorbeeld ook een evacuatiefunctie heeft zal de betrouwbaarheidseis ten aanzien van de begaanbaarheid orde grootte overstromingskansseis zijn. In dit geval kan de begaanbaarheid van de dijk bepalend worden voor het maximaal toelaatbare gemiddelde overslagdebiet. In Bijlage F is ter indicatie voor dit geval (betrouwbaarheidseis begaanbaarheid = overstromingskansnorm) een rekenvoorbeeld gegeven van de maximale gemiddelde overslagdebieten die kunnen worden toegestaan en de eventuele kruinhoogtereductie die behaald kan worden. Dit rekenvoorbeeld gebruikt dezelfde dijkgeometrieën en golfcondities als eerder gebruikt in Hoofdstuk 2.

In de overweging of er zwaardere overslagcondities kunnen worden toegestaan bij een dijk, moet er dus gecontroleerd worden of er nog wordt voldaan aan de betrouwbaarheidseisen voor de begaanbaarheid van de dijk ten aanzien van secundaire functies de verkeersfunctie, functie als evacuatie route, mogelijkheid tot inspectie, mogelijkheid tot onderhoud en recreatieve functies.

6.4. Samenvatting

In de overweging of er zwaardere overslagcondities kunnen worden toegestaan bij een dijk, moet er gecontroleerd worden of er nog wordt voldaan aan de betrouwbaarheidseisen voor de begaanbaarheid van de dijk ten aanzien van secundaire functies zoals de verkeersfunctie, functie als evacuatie route, mogelijkheid tot inspectie, mogelijkheid tot onderhoud en recreatieve functies. Deze betrouwbaarheidseisen zijn echter niet wettelijk vastgelegd, het is in principe aan de beheerder om deze eisen nader in te vullen.

7. Veranderingen in onderhoud en kwaliteitsborging bij hoger toelaatbaar golfoverslagdebiet

Waterkeringbeheerders hebben de wettelijke zorgplicht voor het waterbeheer en de veiligheid met betrekking tot de waterkeringen. Bij deze zorgplicht hoort het beheer en onderhoud van de waterkeringen. In dit hoofdstuk worden de aspecten van het beheer en onderhoud benoemd die mogelijk veranderen wanneer er zwaardere overslagcondities worden toegestaan. Zwaardere overslagcondities hebben mogelijk invloed op de eisen die aan de (gras)bekleding van het binnentalud worden gesteld en daarmee mogelijk invloed op de aandachtspunten tijdens inspectie van de grasbekleding en de intensiteit van het onderhoud aan het binnentalud. Wanneer er rekening is gehouden met de zwaardere overslagcondities in het ontwerp zullen de aandachtspunten voor inspectie en de intensiteit van onderhoud voor de andere aspecten niet veranderen.

In onderstaande paragrafen wordt allereerst de mogelijke veranderingen in het beheer en onderhoud aan de grasbekleding van het binnentalud toegelicht. Vervolgens wordt verder ingegaan op beschadigingen aan het talud.

7.1. Beheer en onderhoud van de graszode op het binnentalud

Deze paragraaf geeft aan wat het verschil is in beheer en onderhoud van een grasbekleding op het binnentalud wanneer er zwaardere golfoverslag condities worden toegestaan (5 l/s/m of 10 l/s/m) ten opzichte van de gangbare toegestane overslagcondities (0,1 l/s/m of 1 l/s/m).

Afhankelijk van het gemiddeld overslagdebiet waarmee rekening wordt gehouden bij het ontwerp van de dijk worden er eisen aan de kwaliteit van de graszode gesteld (zie Tabel 3.1). De kwaliteit van de graszode wordt in de onderstaande drie categorieën ingedeeld (referentie [32]):

- I. Gesloten graszode: Op het oog continue grasmat gedomineerd door grasblad en met, naar globale visuele inspectie, een representatieve plantafstand minder dan ongeveer 0,1 m, welke in niet meer dan 10 % van het oppervlak tot 0,2 m mag bedragen. Er mogen niet meer dan 2 ondiepe (minder dan 0,1 m) beschadigingen per vierkante meter van de grasmat groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ zijn en gemiddeld over 25 m^2 niet meer dan 5 van zulke gaten.
- II. Open graszode: Op het oog continue grasmat gedomineerd door grasblad en met, naar visuele inspectie, een representatieve plantafstand minder dan ongeveer 0,1 m, welke in niet meer dan 25 % van het oppervlak tot 0,25 m mag bedragen. Er mogen niet meer dan 2 ondiepe (minder dan 0,1 m) beschadigingen per vierkante meter van de grasmat groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ zijn en gemiddeld over 25 m^2 niet meer dan 5 van zulke gaten.
- III. Fragmentarische zode: Taludbegroeiing met meer dan 25 % van het oppervlak plantafstanden groter dan 0,25 m, veelal slechts individuele, losstaande planten, of pollen waartussen eventueel bodembedekkende kleinere planten die geen gesloten grasmat vormen.

De gesloten zode heeft de beste zode kwaliteit met de grootste erosiebestendigheid en de fragmentarische zode heeft de slechtste kwaliteit met zeer geringe erosiebestendigheid. Ter

illustratie geeft Figuur 7.1 voorbeelden van de bedekkingsgraad van de grasbekleding uit de Digigids [16].



Figuur 7.1 Gesloten zode (links), open zode (midden) en fragmentarische zode (rechts) (bron: [16]).

Een bepaalde zodekwaliteit kan verkregen worden met verschillende graslandtypes (type vegetatie, soortendiversiteit, worteldichtheid en dergelijke) welke worden bereikt met verschillende types beheer. In [32] wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende beheercategorieën

- Beheercategorie A: Hooien (HH-) of beweiden (WW-) zonder bemesting en veedichtheid of maaifrequentie afgestemd op de productie van het dijkgrasland.
- Beheercategorie B: Aangepast agrarisch beheer met lichte bemesting (WW+) of gazonbeheer (KG+)
- Beheercategorie C: Intensieve agrarische beheervorm met (zware) bemesting (beweiding WW++ of hooien HH++)
- Beheercategorie D: Achterwege blijven van onderhoud, klepelmaaien (1-4 per jaar) zonder afvoer maaisel, afbranden van vegetatie, beweiding met runderen of paarden, zeer zware bemesting en intensieve beweiding.

Uit verschillend vegetatiegericht onderzoek en verschillende golfoverslagproeven ([32]) bleken over het algemeen marginale verschillen in doorworteling en erosiebestendigheid op te treden bij beheercategorie A, B en C. Bij alle drie de categorieën is het mogelijk om een open zode of gesloten zode te verkrijgen als dit vereist is vanwege golfoverslag. Alleen een grasbekleding met beheer categorie D bleek zeer erosiegevoelig bij golfoverslagproeven.

Wanneer in het ontwerp van een dijk rekening is gehouden met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m worden er geen eisen gesteld aan de grasbekleding van het binnentalud (zie Tabel 3.1). Een grasbekleding met een gesloten zode, een open zode of een fragmentarische zode zullen in dit geval allemaal voldoen voor het binnentalud. Beheercategorieën A, B, C en D zijn in dit geval allen mogelijk.

Wanneer in het ontwerp van een dijk rekening is gehouden met een overslagdebiet van 1 l/s/m of een overslagdebiet van 5 l/s/m in combinatie met lagere golven dan 2 m worden er eisen gesteld aan de grasbekleding van het binnentalud (zie Tabel 3.1). De zode moet in dat geval open of gesloten zijn. Beheercategorieën A, B, en C zijn in dit geval allen mogelijk.

Wanneer in het ontwerp van een dijk rekening is gehouden met een overslagdebiet van 5 l/s/m in combinatie met golven van 2 m of hoger of een overslagdebiet van 10 l/s/m worden er strengere eisen gesteld aan de grasbekleding van het binnentalud (zie Tabel 3.1). De zode moet in dit geval gesloten zijn. Beheercategorieën A, B, en C zijn ook in dit geval allen mogelijk.

7.2. Beheer en onderhoud met betrekking tot beschadigingen aan het binnentalud en de kruin

Beschadigingen aan het binnentalud kunnen een aangrijppunt zijn voor erosie (ter illustratie zie Figuur 7.2) en een intrede punt voor het overslaande water waardoor sneller verweking optreedt en/of de freatische lijn sneller stijgt. Dergelijke beschadigingen kunnen veroorzaakt worden door bijvoorbeeld dierlijke graverij, menselijke activiteit en scheurvorming van niet-geotechnische aard (zoals verdroging). Bij zwaardere golfoverslagcondities kunnen er strengere eisen nodig zijn ten aanzien van deze beschadigingen.

Scheuren in een weg op de kruin (bijvoorbeeld door zettingen of verkeersbelasting) kunnen ook een intredepunt zijn voor het overslaande water waardoor de freatische lijn in de dijk sneller stijgt. Bij zwaardere overslagcondities wordt het onderhoud aan wegen, naast vanuit verkeersfunctie, ook vanuit waterkerende functie een aandachtspunt. Een kruin met weg is echter vaak een vergeten stukje beheer, omdat de weg zelf in beheer is bij de wegbeheerder (veelal een gemeente of provincie) en alle aspecten gerelateerd aan waterkeren onder het beheer van het waterschap vallen.



Figuur 7.2 Voorbeeld van overslagproeven op een beschadigd talud. Links: initieel aangebrachte schade. Rechts: afgestroopt gras beneden de initiële schade na afloop van de proef. (bron:[32]).

7.2.1. Dierlijke graverij

Ondanks dat door middel van keuzes in het ontwerp van de dijk het risico van dierlijke activiteit verkleind kan worden (zie Paragraaf 4.4.1) blijft graverij een aandachtspunt voor beheer en onderhoud. Geïdentificeerde graverijen dienen direct hersteld te worden volgens het Beheer en onderhoudsplan Waterkeringen van Waterschap Rivierenland (referentie [51]). Het Beheer en onderhoudsplan Waterkeringen geeft aan volgens welke richtlijnen het herstel moet plaatsvinden bij schade door verschillende diersoorten. Zo zijn bijvoorbeeld

dassen en bevers beschermd waardoor het beverprotocol ([52]) en het dassenprotocol ([51]) gevolgd zal moeten worden wanneer er graafactiviteiten door deze dieren hebben plaats gevonden.

Tijdens hoog water vluchten alle dieren uit de uiterwaarden naar de dijken. Tijdens hoogwater kunnen er dus meer dierlijke graafactiviteiten in de dijk plaats vinden dan onder normale dagelijkse omstandigheden. In het Handboek dijkbewaking (rode boekje, [54]) staat het volgende over waargenomen schade door dierlijke graverij:

‘Alert blijven op erosie en kwel door de gegraven gangen, zonodig beschermende maatregelen nemen.’

Tijdens zwaardere golfoverslagcondities zijn kwel en erosie bij gegraven gangen mogelijk moeilijker waar te nemen. Eveneens wordt het nemen van maatregelen mogelijk bemoeilijkt door golfoverslag. Het zou kunnen dat wanneer er zwaardere golfoverslagcondities kunnen gaan optreden er al eerder preventieve maatregelen genomen moeten worden. Dit moet echter nog wel verder worden uitgezocht.

7.2.2. Menselijke graverij

Bij menselijke graverij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan werkzaamheden dicht bij de dijk zoals het de aanleg en het onderhoud van kabels en leidingen of het ploegen van grond. Deze ontgravingen moeten na afloop van de activiteit weer gerepareerd worden, maar ook na langere tijd zijn toegedekte ontgravingen nog een zwakke plek in de waterkering. Water infiltreert gemakkelijk in de lossere grond en hoopt zich vervolgens in het voormalige gat op, waardoor de weerstand tegen afschuiven in de grond vermindert. En er bestaat een verhoogd risico op erosie van het talud en kwel (referentie [55]). Locaties waar graafactiviteiten hebben plaats gevonden blijven een aandachtspunt voor inspecties onder normale en extreme omstandigheden.



Figuur 7.3 Voorbeeld van werkzaamheden dicht bij de dijk (bron: [55]).

7.2.3. Andere beschadigingen van niet-geotechnische aard

Omdat scheuren door bijvoorbeeld verdroging (Figuur 7.4) ook een aangrijppunt kunnen zijn voor erosie en een intrede punt voor het overslaande water kunnen er reparaties van deze scheuren nodig zijn voor het winterseizoen of kunnen er preventieve maatregelen nodig zijn

wanneer extreme condities worden verwacht. Dit moet echter nog wel verder worden uitgezocht.



Figuur 7.4 Voorbeeld scheurvorming met een andere oorzaak dan geotechnisch falen (bron: [16]).

7.3. Samenvatting

Wanneer er zwaardere overslagcondities worden toegestaan (5-10 l/s/m) zullen er strengere eisen aan het beheer van het binnentalud van de dijk worden gesteld. Vaak zal een gesloten graszode vereist zijn, in sommige gevallen voldoet een open graszode ook. Beheer categorieën A, B en C kunnen allen resulteren in een voldoende goede graszode-kwaliteit; beheercategorie D is niet geschikt bij zware overslagcondities.

Beschadigingen aan het binnentalud kunnen een aangrijppunt zijn voor erosie en een intredepunt voor het overslaande water waardoor sneller verweking optreedt en/of de freatische lijn sneller stijgt. Beschadigingen aan het binnentalud zullen gerepareerd moeten worden wanneer er zwaardere overslagcondities worden toegestaan. De eisen met betrekking tot het binnentalud zullen vergelijkbaar worden met de eisen met betrekking tot het buitentalud in de golfoploopzone.

8. Uitwerking casus: ontwerp van dijk met relatief hoog overslagdebiet

8.1. Inleiding

In dit rapport wordt een semi-fictieve casus globaal uitgewerkt. Het doel is om een praktisch inzicht in de consequenties van het hanteren van een hoger toegestaan golfoverslagdebiet te geven. In de casus wordt aangenomen dat er een toegestaan golfoverslagdebiet wordt gehanteerd van 5 l/s/m of 10 l/s/m in plaats van 1 l/s/m.

De casus is gebaseerd op een Waaldijk in het stroomgebied van het Waterschap Rivierenland (noordelijke dijk, traject Tiel-Waardenburg en Gorinchem-Waardenburg). Hoewel de casus hierop gebaseerd is, wordt benadrukt dat berekeningen en illustraties uit dit rapport niet direct kunnen worden overgenomen ten behoeve van daadwerkelijke dijkversterkingen. De casus heeft een illustratief karakter en daarom zijn deze in sommige gevallen vereenvoudigd weergegeven of zijn gegevens aangenomen of, ten behoeve van het verduidelijken van de illustraties, aangepast. De casus kan wel als leidraad gebruikt worden voor de berekeningen voor de daadwerkelijke dijkversterking.

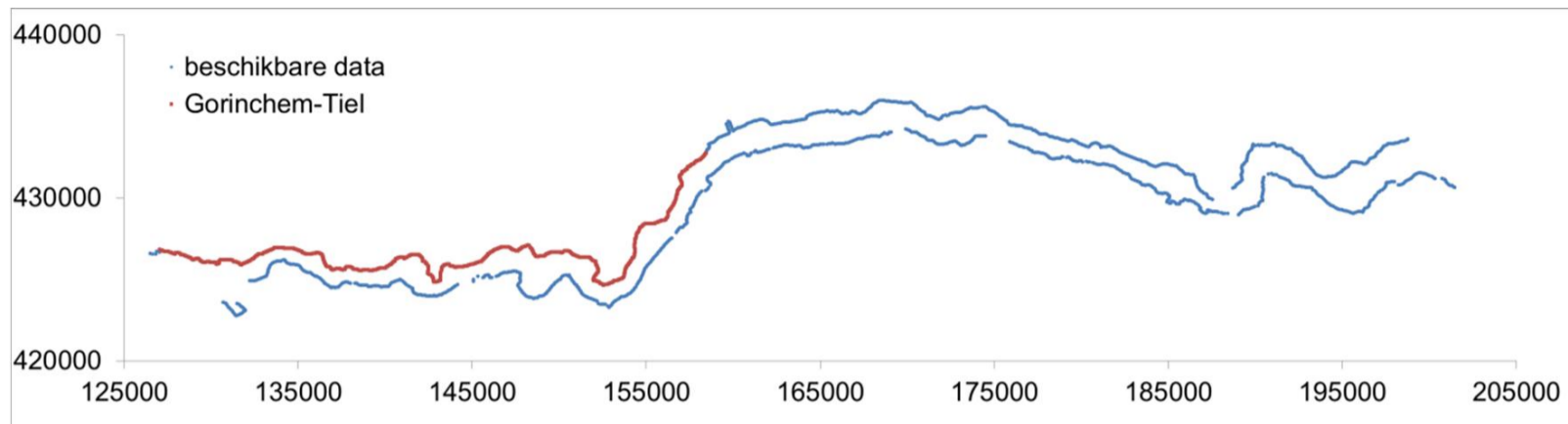
8.2. Hydraulische randvoorwaarden

In HKV (2017, [21]) zijn de hydraulische ontwerpcondities voor de Waal ten behoeve van HWBP (hoogwaterbeschermingsprogramma) projecten afgeleid. Dat rapport wordt in voorliggende rapportage als uitgangspunt genomen ten aanzien van de hydraulische randvoorwaarden. In HKV (2017, [21]) zijn de hydraulische belastingniveaus (HBN's) bepaald bij de faalkanseis op doorsnedeniveau. Dit is gedaan voor verschillende zichtjaren (2015, 2025, 2050, 2075, 2100 en 2125) en voor verschillende golfoverslagdebieten ($q = 0, 1, 1, 5, 10$ en 50 l/s/m). Tevens zijn er drie verschillende profielen toegepast: de werkelijke profielen, een 1:2 talud en een 1:3 talud. De werkelijke profielen zijn gebaseerd op basis van het AHN 2 (Actueel Hoogtebestand Nederland), waarbij het bovenste deel van het talud is doorgetrokken om de benodigde hoogte te verkrijgen. Een overzicht van de beschouwde locatie is weergegeven in Figuur 8.1.



Figuur 8.1 Impressie van dijkpalen langs de Waal in stroomgebied WSRL waarvoor in HKV (2017, [21]) de hydraulische condities zijn bepaald.

In de hiernavolgende analyse wordt onderscheid gemaakt in enerzijds het gehele stroomgebied van de Waal binnen Waterschap Rivierenland (WSRL) en anderzijds een subset op het traject Gorinchem – Tiel. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 8.2.



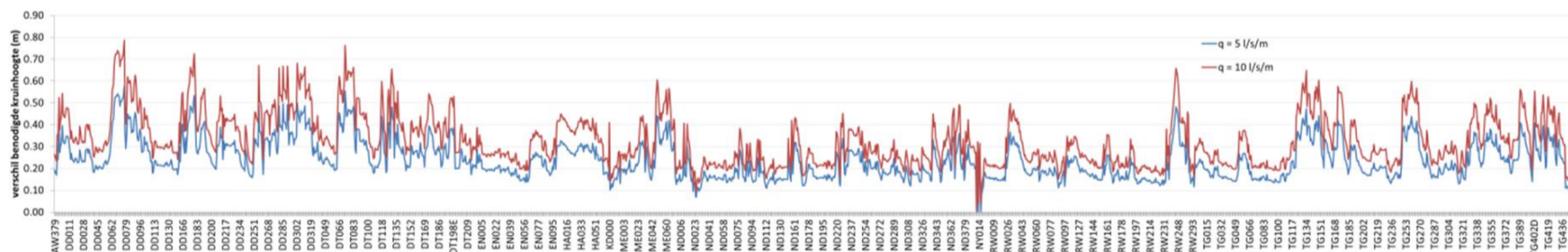
Figuur 8.2 Overzicht gehele stroomgebied van de Waal binnen WSRL (blauw) en het traject Gorinchem-Tiel (rood)

In voorliggende studie worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

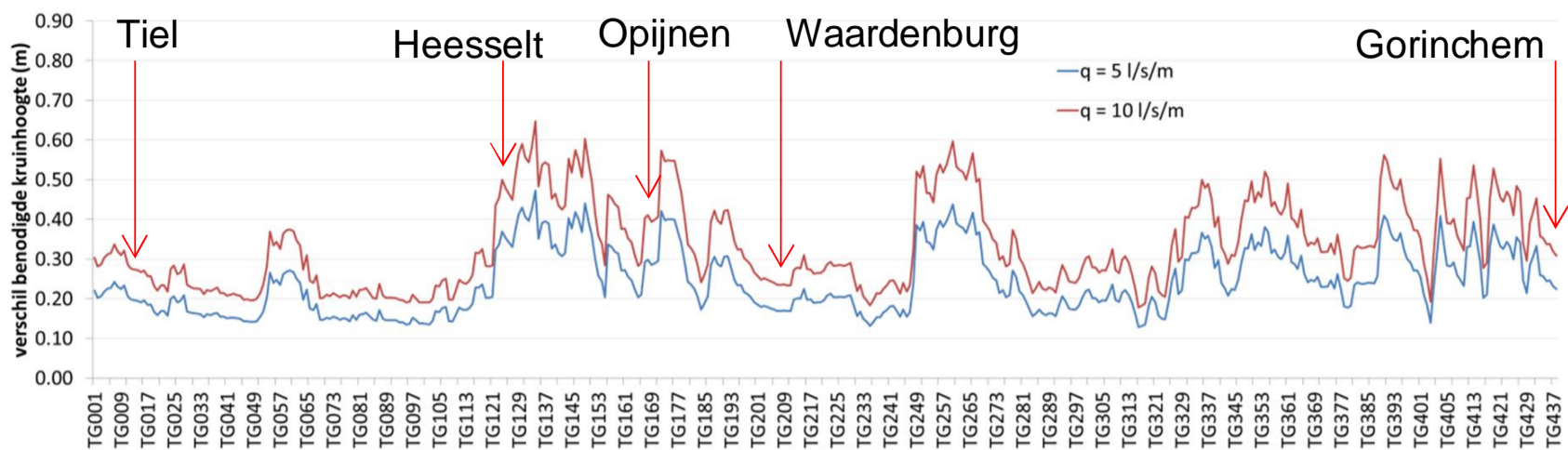
- $q = 1 \text{ l/s/m}$, 5 l/s/m en 10 l/s/m
- zichtjaar 2075
- werkelijke profielen
- studie zoals gerapporteerd in HKV (2017, [21])
- in deze analyse is geen toeslag gehanteerd als gevolg van bodemdaling en restzetting. Overigens is dit bij Tiel- Waardenburg en Gorinchem-Waardenburg een verhoging van de kruin van 0,2 m tot 0,3 m ([1] en [22])
- het buitentalud heeft een helling van 1:3

Er wordt benadrukt dat de hier gehanteerde uitgangspunten slechts ter illustratie zijn en dat dit niet zondermeer van toepassing is op de beoogde dijkversterkingen op deze trajecten.

De benodigde kruinhoogte bij een overslagdebiet van 1 l/s/m is vergeleken met de benodigde kruinhoogte behorende bij een overslagdebiet van 5 l/s/m en 10 l/s/m . Hieruit volgt een kruinhoogteverschil. Dit kruinhoogteverschil is inzichtelijk gemaakt in Figuur 8.3 en Figuur 8.4. Daarbij is op de horizontale as (in de volgorde van de door HKV opgeleverde tabel) de benaming van de dijkpaal uitgezet en op de verticale as het verschil in benodigde kruinhoogte ten opzichte van de situatie waarbij een overslagcriterium van 1 l/s/m wordt gehanteerd.



Figuur 8.3 Het verschil in benodigde kruinhoogte indien een golfoverslagdebiet van 5 l/s/m (blauwe lijn) of 10 l/s/m (rode lijn) wordt toegepast in plaats van 1 l/s/m (gebaseerd op geleverde Excel tabel door WSRL, zichtjaar 2075, en buitentaludhelling 1:3. Er is in deze figuur niet verdisconteerd voor zetting, bodemdaling etc). Dit betreft alle beschikbare data van de Waal in het stroomgebied van WSRL.



Figuur 8.4 Gelijk aan Figuur 8.3 maar alleen de noordoever op het traject Gorinchem-Tiel (dijkpaal TG001-TG438)

Tabel 8.1 Samenvatting verschil in benodigde kruinhoogte bij een HBN van 5 l/s/m of 10 l/s/m in plaats van 1 l/s/m voor de beschouwde locaties bij de Waal o.b.v. HKV (2017, [21]). De waarden tussen haakjes zijn de waarden behorende bij de subset 'Tiel-Gorinchem, dijkpaal TG001-TG438'.

Verskil in kruinhoogte (in meters) t.o.v. q = 1 l/s/m	q = 5 l/s/m	q = 10 l/s/m
Minimum (m)	0,01 (0,13)	0,01 (0,18)
Gemiddeld (m)	0,24 (0,24)	0,33 (0,33)
Maximum (m)	0,58 (0,47)	0,79 (0,65)

Wat opvalt in de hierboven gegeven analyse is dat er een grote range is met betrekking tot de effectiviteit van het verhogen van een hoger toelaatbaar golfoverslagdebiet. Deze grote range wordt verklaard door het verschil in de effectieve strijklengte en daarmee het verschil in de golfcondities; bij een langere strijklengte zijn er zwaardere golfbelastingen en is de invloed op het golfoverslagdebiet groter. Bij relatief korte strijklengte hebben golfcondities nauwelijks invloed op de benodigde kruinhoogte welke door de waterstand wordt gedomineerd. Dit is tevens toegelicht in de WBI factsheet GEKB ([36]).

Voorbeeld

Uit Figuur 8.4 blijkt dat de benodigde kruinhoogte van de dijk tussen Opijnen en Heesselt sterk afhankelijk is van het toegestane golfoverslagdebiet. Zo is bij dijkpaal TG133 het maximale benodigde kruinhoogteverschil gelijk aan 0,65 m (uitgaande van een vergelijking tussen een toegestaan debiet van 1 l/s/m en 10 l/s/m). Ter illustratie is het gedeelte tussen Opijnen en Heesselt weergegeven in Figuur 8.5. Hierin valt duidelijk te zien dat er grote strijklengtes zijn en dat dit gedeelte van de dijk aan relatief grote golven blootgesteld kan worden.



Figuur 8.5 Impressie van de Waaldijk tussen Heesselt en Opijnen. Duidelijk is te zien dat hier sprake is van een grote strijklengte waardoor dit gedeelte meer door golven wordt gedomineerd dan andere delen van de waaldijk.

Met het bovenstaande voorbeeld wordt geïllustreerd wat de ‘opbrengst’ kan zijn van het accepteren van een hoger overslagdebiet (5 of 10 l/s/m in plaats van 1 l/s/m). Dit kan significant zijn (in het voorbeeld een besparing van een benodigde kruinhoogte van 0,65 m) maar kan ook leiden tot een minimale besparing van de benodigde kruinhoogte (in dit voorbeeld 1 cm). Er wordt daarom aanbevolen om altijd de baten (besparing in de benodigde kruinhoogte) uit te zetten tegen de lasten (eventuele versterkingen van de dijk en andere effecten als gevolg van het toelaten van een hoger overslagdebiet).

8.2.1. Kruinhoogte en overslag gedurende de levensduur van de waterkering

De maatgevende hydraulische belastingen waarmee rekening gehouden wordt in het ontwerp zijn de maatgevende hydraulische belastingen uit zichtjaar 2075. Aan het begin van de levensduur van de dijkversterking zullen lagere hydraulische belastingen maatgevend zijn (zichtjaar 2025). Verder wordt in het ontwerp van de dijkversterking rekening gehouden met 0,2 m extra kruinhoogte om zettingen, klink en bodemdaling in rekening te brengen. Door de hogere kruin en de lagere maatgevende hydraulische belasting zullen de overslagcondities aan het begin van de levensduur van de versterkte dijk lager zijn dan aan het eind van de levensduur.

8.3. Faalmechanismen dijk

8.3.1. Inleiding

In het OI2014 is een ontwerptabel gegeven voor de toepassingsvoorwaarden voor verschillende golfoverslagdebieten. Deze tabel is verkort weergegeven in Tabel 8.2 voor een situatie waarbij de golfhoogte kleiner is dan 2 m én waarbij geen overgangen of objecten voorkomen.

Tabel 8.2 Toepassingsvoorwaarden golfoverslagdebiet bij een golfhoogte $H_{m0} < 2$ m en geen overgangen of objecten.
In rood zijn de aanvullende eisen ten opzichte van een situatie waarbij $q = 0,1$ a 1 l/s/m wordt gehanteerd.

q (l/s/m)	Toepassingsvoorwaarden
0,0 - 0,1	<ul style="list-style-type: none"> • Geen
0,1 - 1	<ul style="list-style-type: none"> • open of gesloten zode^a op klei^b • voldoende stabiliteit^c
1 - 5	<ul style="list-style-type: none"> • open of gesloten zode^a op klei^b • voldoende stabiliteit^c • taludhelling flauwer dan 1:2,3
5 - 10	<ul style="list-style-type: none"> • voldoende stabiliteit^c • gesloten zode^a op klei^b • taludhelling flauwer dan 1:2,3

^a een gesloten zode is een op het oog gesloten grasmatt, zonder grote (0,15 m x 0,15 m) open plekken

^b minimale gegarandeerde kleidikte van 0,4 m, geen eisen aan kleikwaliteit

^c Controle van de geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud en de binnenwaartse macrostabiliteit. Dit kan leiden tot aanvullende eisen ten aanzien van kleilaagdikte, kleikwaliteit, het aanbrengen van drainage, aanpassing van de taludhelling et cetera.

De verschillende faalmechanismen worden in de onderstaande paragraaf verder uitgewerkt.

8.3.2. Erosie grasbekleding – eisen aan graskwaliteit

Aannemende dat de significante golfhoogte H_{m0} kleiner is dan 2 m dan dient het gras de volgende kwaliteit te hebben met betrekking tot de erosie van de grasbekleding:

- 0,1 l/s/m - 5 l/s/m: open of gesloten zode
- 5 l/s/m - 10 l/s/m: gesloten zode

Voor de kleilaag gelden de volgende eisen:

- 0,1 - 10 l/s/m: minimale gegarandeerde kleidikte van 0,4 m, geen eisen aan kleikwaliteit. Echter, in het OI2014 staat tevens opgemerkt dat vanuit de substraatfunctie voor het gras en het voorkomen of in de hand houden van graafgangen van konijnen, ratten, muizen en mollen een grotere dikte moet worden aangelegd: 0,8 m. Dit heeft tevens een positieve werking op het infiltratiedebiet en daarmee op de binnenwaartse microstabiliteit.

Met betrekking tot het faalmechanisme ‘erosie gras’ zijn de consequenties van het verhogen van het toegestane golfoverslagdebiet beperkt. In het geval van het verhogen van een overslagdebiet van 1 l/s/m naar 5 l/s/m is er geen consequentie. In het geval van het verhogen naar 10 l/s/m is de consequentie dat het gras de kwaliteit ‘gesloten zode’ dient te hebben.

Een aanvullende eis is dat de talud helling flauwer dient te zijn dan 1:2,3. Dit is gebaseerd op het feit dat bij steile taluds er een grotere versnelling van de overslaande golftong optreedt wat leidt tot een grotere belasting op het talud. Voor deze casus wordt aangenomen dat de taludhelling flauwer is dan 1:2,3. Indien dat voor specifieke gevallen niet het geval is dan dient in een aanvullende analyse op basis van de cumulatieve overbelastingsmethode aangetoond te worden dat de graszode bestand is tegen de verhoogde belasting.

Een mogelijke uitzondering op het bovenstaande is de graskwaliteit rondom overgangen en discontinuïteiten. Dit wordt in de volgende paragraaf beschreven.

8.3.3. Erosie grasbekleding: Overgangen en discontinuïteiten

In het OI2014 is een tabel weergegeven met betrekking tot de toepassingsvoorwaarden van het kritieke golfoverslagdebiet. Deze is verkort weergegeven in Tabel 8.2 voor een situatie zonder overgangen of objecten op de dijk. Echter, in de praktijk zullen er veelal wel overgangen of objecten aanwezig zijn. In de onderstaande tabel zijn de aanvullende toepassingsvoorwaarden uitgelicht.

Tabel 8.3 Aanvullende toepassingsvoorwaarden m.b.t. overgangen en objecten o.b.v. OI2014. In rood zijn de aanvullende eisen ten opzichte van een situatie waarbij $q = 0,1$ a 1 l/s/m wordt gehanteerd.

q (l/s/m)	Aanvullende toepassingsvoorwaarden m.b.t. overgangen en objecten	
	kruin	binnentalud
0,0 - 0,1	- geen	- geen
0,1 - 1	- geen	- geen
1 - 5	- geen	- 'er dient rekening mee gehouden te worden'
5 - 10	- geen (m.u.v. bovenrivierengebied)	- 'er dient rekening mee gehouden te worden'

In de bovenstaande tabel is uitgegaan van een 'nette' overgang: er is een graszode aanwezig tot aan de overgang welke een vergelijkbare kwaliteit heeft met de graszode elders op het talud. In de praktijk blijkt dit vaak niet het geval te zijn.

In de fictieve cases worden de volgende overgangen aangenomen:

- Weg (kruin)
- Op- of afrit (binnentalud)
- Trap (binnentalud)
- Knik bij berm of teen (binnentalud)
- Rasterpalen

Weg (kruin)

Bij een weg op de kruin zijn er geen aanvullende consequenties. Bij een gehanteerd golfoverslagdebiet van 5 l/s/m dient de zode, net als bij een golfoverslagdebiet van 1 l/s/m netjes aan te sluiten op de weg. Bandensporen zijn hier een belangrijk aandachtspunt welke zijn beschreven in Paragraaf 5.3.1 en Bijlage J.3.5. Overigens gelden er voor een weg op het binnentalud wel aanvullende eisen welke zijn beschreven in Paragraaf 5.3.1.

Op- en afritten

Bij op- en afritten op het binnentalud zijn er aanvullende consequenties. Bij een gehanteerd golfoverslagdebiet van 5 l/s/m dient deze, net als bij een golfoverslagdebiet van 1 l/s/m zodanig ontworpen te zijn dat de overslaande golftongen dwars over de oprit stromen en niet parallel (tenzij deze zodanig is ontworpen dat deze een parallelle stroming kan weerstaan). Dit is uitvoeriger beschreven in Bijlage I en Paragraaf 5.3.2. Tevens dient de oprit als een weg beschouwd te worden. Voor een weg op het binnentalud geldt volgens het OI wel een aanvullende eis en dat is dat er 'rekening mee gehouden dient te worden'. Dit is uitvoerig beschreven in Bijlage J en Paragraaf 5.3.1.

Trap

Een trap op het binnentalud dient volgens het OI zodanig ontworpen te worden dat 'er rekening mee gehouden dient te worden'. Dit is behandeld in Paragraaf 5.3.4.

Knik (berm of teen)

Een knik bij de berm of een knik in de teen verdient specifieke aandacht. Dit is behandeld in Paragraaf 5.3.5.

Rasterpalen

Rasterpalen behoeven geen specifieke aandacht zolang deze kleiner zijn dan 0,15 m x 0,15 m.

Algemeen (ontwerp)

In het ontwerp van de overgangen dient rekening gehouden te worden met de onderhoudbaarheid van de overgangen. Hiervoor zijn de praktische inzichten van de onderhoudsmensen essentieel. Er wordt daarom aanbevolen om de onderhoudsmensen te betrekken in het ontwerp van een dijk. Hierbij kan worden gedacht aan het uitvoeren van een toets op de onderhoudbaarheid van de bekleding. Meer informatie hierover is weergegeven in Paragraaf 5.6. Overigens is dit van toepassing op zowel een toegestaan golfoverslagdebiet van 5 l/s/m als 1 l/s/m.

Het uitspoelen van zand rondom een overgang blijkt in de praktijk vaak voor te komen. Het ontwerp dient zodanig te zijn dat dit niet kan voorkomen of dat dit niet tot bezwijken van de waterkering leidt. Meer informatie is weergegeven in Paragraaf 5.5.

Algemeen (Beheer)

Voor alle benoemde overgangen geldt dat er in het beheer specifieke aandacht besteedt dient te worden aan de overgangen en discontinuïteiten. Het primaire aandachtspunt hierbij is het uitgangspunt waarin wordt gesteld dat de zode netjes dient aan te sluiten op de overgang. Overigens geldt dit uitgangspunt zowel voor een gehanteerd golfoverslagdebiet van 1 l/s/m als voor 5 l/s/m. Meer specifiek kan worden gedacht aan de vorming van bandensporen (Bijlage J.3.5) en schapenpaden (Paragraaf 5.4). Er wordt ingeschat dat het voorkomen van bandensporen een grote uitdaging vormt.

8.3.4. Macrostabieliteit binnenwaarts

De keuze voor een ontwerp overslagdebiet heeft invloed op de benodigde maatregel voor de binnenwaartse macrostabieliteit. De keuze voor een relatief hoog ontwerp golfoverslagdebiet geeft een lagere kruin en een relatief hoge kans dat er golfoverslag optreedt. Een laag ontwerp golfoverslagdebiet geeft juist een hogere kruin en een kleine kans dat er golfoverslag optreedt. Zowel de hoogte van de kruin als de kans dat er golfoverslag optreedt hebben invloed op de binnenwaartse macrostabieliteit en daarmee op de benodigde bermengte en taludhelling om te voldoen aan de faalkanseis. Voor één case is dit nader uitgewerkt, zie Bijlage K.

Er is bij de uitwerking gebruik gemaakt van het KPR Memo Voorlopige werkwijze macrostabieliteit bij golfoverslag. De case is bedoeld om zo veel mogelijk representatief te zijn voor het dijktraject Tiel – Waardenburg (TiWa) en Gorinchem – Waardenburg (GoWa). Er is

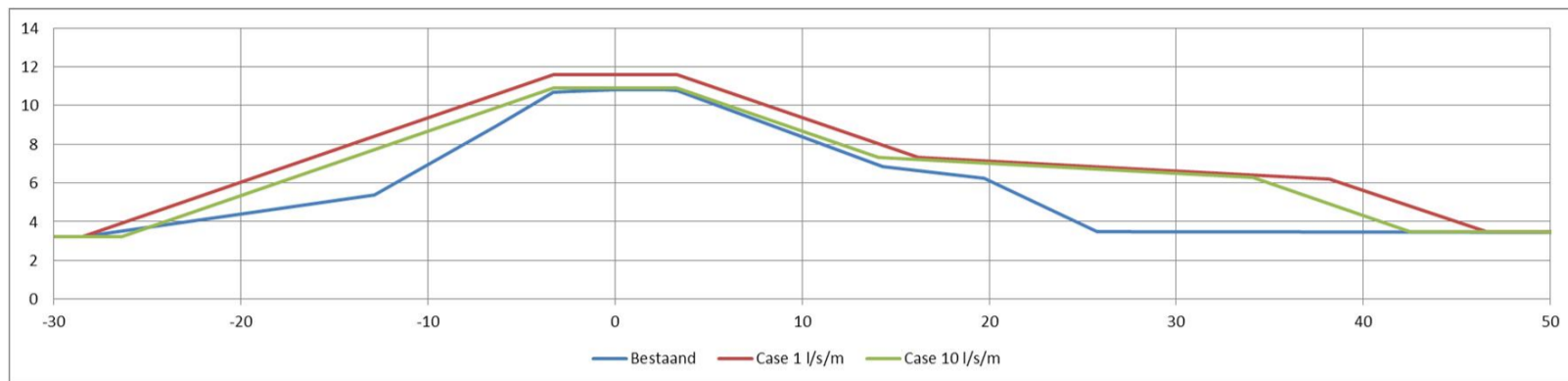
uitdrukkelijk niet gekozen voor één van de exacte berekende dwarsprofielen voor deze trajecten, maar voor een representatief profiel voor delen van dit traject. Het profiel heeft een vereenvoudigde geometrie en grondopbouw. Zie voor de uitwerking hiervan Bijlage K.2.

De vereenvoudigde uitgewerkte case betreft een kleidijk die met klei wordt versterkt. De versterkingsvariant is vierkant, zonder as-verschuiving. De taludhelling van de versterking is in principe 1:3 en de stabiliteitsberm heeft een afschot van 1:20. De ondergrond bestaat uit een holocenee slappe lagenpakket van een kleilaag (3 m) en een laag van afwisselend klei en veenlaagjes (3 m). De totale dikte van het slappe lagenpakket is daarmee 6 m en deze ligt op een pleistoceen zandpakket dat in contact staat met het buitenwater. Tijdens hoogwater treedt opdrijven van het slappe lagenpakket op. Omdat het slappe lagenpakket dikker is dan de kritische waarde van 4 m treedt geen opbarsten op.

Voor de achtergrond en overige uitgangspunten van de berekeningen wordt verwezen naar Bijlage K. De belangrijkste uitgangspunten en bevindingen worden hier genoemd:

- Er zijn twee ontwerpkuinhoogtes uitgewerkt:
 - NAP +10,9 m bij ontwerp golfoverslagdebiet van 10 l/s/m
 - NAP +11,6 m bij ontwerp golfoverslagdebiet van 1 l/s/m.
- Dwarsprofiel en ondergrondschematisering zijn een vereenvoudiging van een dijkprofiel in het traject TiWa.
- De rekenkundige dijkverbetering in de case wordt uitgevoerd met 'stevige klei' ([33]). Dit is plastische, niet schrale klei. Deze stevige klei is nodig vanuit zowel de eis ten aanzien van macrostabiliteit als de eis ten aanzien van gras afschuiving binnentalud (GABI).
- Schuifsterkteparameters gebaseerd op ([42]), echter vereenvoudigd.
- Er zijn, conform het KPR memo voorlopige werkwijze macrostabiliteit bij golfoverslag ([27]), voor elk van de ontwerpkuinhoogtes, twee stabiliteitscontroles uitgevoerd:
 - bij het ontwerppeil, zonder significante golfoverslag, reguliere schadefactor (1,18) en alleen glijvlakken door bovenste helft van het talud of de kruin beoordelen
 - bij een lager peil, met significante overslag, lagere schadefactor, ook kleine glijvlakken beoordelen.
- Het ontwerp is zodanig gemaakt dat het voldoet aan beide situaties.
- De eerste controle bij het ontwerppeil met reguliere schadefactor blijkt maatgevend voor het ruimtebeslag, ofwel berm lengte.
- Er is evenals in ([42]) uitgegaan van een schematiseringsfactor van 1,2.
- Er is gerekend met het model LiftVan, modelfactor 1,06.
- De opdrijfpotentiaal voor de case is NAP +7,1 m. De waterdruk ter plaatse van de teen is hierdoor begrensd. Zowel bij de stabiliteitscontrole bij het ontwerppeil als bij het lagere peil wordt de oprijfsituatie van het achterland behaald.

Het benodigde ruimtebeslag wordt grafisch weergegeven in Figuur 8.6.



Figuur 8.6 Ruimtebeslag in dwarsprofiel voor de bestaande situatie, case 1 l/s/m (hoge kruin) en case 10 l/s/m (lage kruin)

Bij een hoger ontwerp golfoverslagdebiet mag de dijk iets lager zijn en de berm iets korter, in dit geval 10% ofwel 2 m op 20 m. Mogelijk kan door optimalisatie van de bermhoogte bij een hogere kruin nog iets van de berm lengte worden afgehaald, waardoor het verschil nog kleiner wordt.

De uitkomst van de analyse lijkt op het eerste gezicht contra intuïtief. Men zou kunnen verwachten dat een lagere dijk met een hoger ontwerp golfoverslagdebiet, een lagere stabiliteit zou hebben en dus breder zou moeten worden gemaakt.

Met de gevolgde werkwijze van het KPR memo pakt dit echter anders uit. De hogere kruin bij een lager ontwerp golfoverslagdebiet, geeft meer aandrijvend moment op het glijvlak dat door een iets langere berm gecompenseerd moet worden. De hogere kans op golfoverslag bij een lagere kruin leidt wel tot een strengere stabiliteitseis voor het scenario met een hoog freatisch vlak door golfoverslag, echter indien stevige klei wordt gebruikt, dan voldoet een 1:3 talud altijd en is dit dus in dit geval niet onderscheidend voor de benodigde omvang van de dijk.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het KPR memo nog de status van een werk- of ontwikkeldocument heeft. Bekend is dat een volledig probabilistische analyse anders kan uitpakken dan de semi probabilistische werkwijze van het KPR memo ([27]). Ervaringen met deze werkwijze dienen te worden teruggekoppeld, zodat de werkwijze indien nodig kan worden verbeterd.

8.3.5. Microstabiliteit

Er wordt in deze case uitgegaan van een kleidijk met een verbetering in klei. Deze dijk is ongevoelig voor micro-instabiliteit. Er komen geen aanvullende eisen voort aan het dwarsprofiel door dit faalmechanisme.

Overigens wordt opgemerkt dat, indien voor de case zou worden uitgegaan van een zandaanvulling met een kleibekleding, deze ontworpen zou moeten worden met de rekenregels voor GABI, vanwege het ontwerp-golfoverslagdebiet dat groter is dan 0,1 l/s/m.

8.3.6. Afschuiven (GABI)

Volgens het OI2014v4 moet zowel bij een ontwerp-overslagdebiet van 1 l/s/m als 10 l/s/m een controle worden uitgevoerd op stabiliteit. Dit is zowel de macrostabiliteit binnenwaarts (zie paragraaf 8.3.4) als het afschuiven van de bekleding van het binnentalud, ook wel het mechanisme GABI (Grasbekleding Afschuiven Binnentalud) genoemd.

Door infiltratie van water in het binnentalud bij golfoverslag wordt de stabiliteit van de kleibekleding ongunstig beïnvloed en kan deze oppervlakkig afschuiven. Vaak gaat het om een afschuivende laag met een dikte van circa 1 m.

Er is voor deze case uitgegaan van een kleidijk met een verbetering in stevige klei. In dat geval voldoet een helling van 1:3 (Bijlage II [48]) bij een overslagdebiet van zowel 1, 5 als 10 l/s/m. Voor eisen ten aanzien van de classificatie 'stevige klei' zie [33].

Indien zou worden uitgegaan van 'schrone klei' dan moet het talud worden verflauwd naar 1:4, of moet door middel van een berekening worden aangetoond dat de stabiliteit voldoende is.

8.4. Overige aandachtspunten

8.4.1. Beheer en onderhoud

De golfcondities van deze casus hebben een significante golfhoogte kleiner dan 2 m. Wanneer er golfoverslag wordt toegestaan van 5 l/s/m in plaats van 1 l/s/m heeft dit geen invloed op de vereiste kwaliteit van de graszode op het binnentalud en zal het benodigde beheer en onderhoud vergelijkbaar zijn. Wanneer er golfoverslag van 10 l/s/m wordt toegestaan is er een gesloten graszode vereist waardoor er strengere eisen aan het beheer van het binnentalud van de dijk worden gesteld. Verder zal het beheer en onderhoud rond overgangen moeten waarborgen dat de overgangen 'netjes' blijven (de graszode moet goed op de overgang aan blijven sluiten en de graskwaliteit rond de overgang moet vergelijkbaar blijven met de graskwaliteit van de rest van het binnentalud) en indien nodig versterkt worden (bijvoorbeeld schapenpaden). Meer informatie over dit onderwerp is te vinden in Hoofdstuk 7.

8.4.2. Graverij en andere beschadigingen

Beschadigingen aan het binnentalud kunnen een aangrijppunt zijn voor erosie en een intrede punt voor het overslaande water waardoor sneller verweking optreedt en/of de freatische lijn sneller stijgt. Beschadigingen aan het binnentalud zullen gerepareerd moeten worden wanneer er golfoverslag van 5 of 10 l/s/m wordt toegestaan. Gerepareerde beschadigingen kunnen een zwakke plek in de waterkering blijven. Locaties waar beschadigingen zijn gerepareerd blijven een aandachtspunt voor inspecties onder normale en extreme omstandigheden. Meer informatie over dit onderwerp is te vinden in Hoofdstuk 7.

8.5. Conclusies

In voorliggend hoofdstuk is een semi-fictieve casus beschouwd. De kernvraag daarbij is wat de consequenties zijn wanneer het toelaatbare golfoverslagdebiet wordt verhoogd van 1 l/s/m naar 5 l/s/m of 10 l/s/m.

Op basis van de casussen komt duidelijk naar voren dat de baten en lasten van het toelaten van een hoger golfoverslagdebiet variabel zijn.

Baten

De verwachte baten van het toelaten van een golfoverslagdebiet van 5 l/s/m in plaats van 1 l/s/m kunnen primair worden uitgedrukt in de reductie in de benodigde kruinhoogte. Uit de casussen blijkt dat deze reductie sterk varieert. Bij golfgedomineerde dijkvakken (doorgaans dijkvakken waar een grote strijklengte aanwezig is) blijkt er bij de beschouwde casus een

besparing in de kruinhoogte tot wel 0,84 m mogelijk te zijn. Bij waterstandsgedomineerde dijkvakken (dijkvakken waar nauwelijks golven voor kunnen komen) is de besparing in de kruinhoogte zeer gering (in specifieke gevallen slechts 0,01 m).

In het rekenvoorbeeld met betrekking tot macrostabiliteit blijkt dat, door het feit dat er een lagere kruin is, ook de benodigde berm lengte is gereduceerd. Dit leidt tot een kleiner ruimtebeslag en lagere kosten.

Lasten

De verwachte lasten van het toelaten van een golfoverslagdebiet van 5 l/s/m in plaats van 1 l/s/m kunnen worden uitgesplitst in de lasten ten aanzien van het ontwerp en de lasten ten aanzien van het beheer.

Bij het ontwerp dient er met name meer aandacht besteedt te worden aan de macrostabiliteit van de dijk en de detaillering van de overgangen tussen de grasbekleding en niet waterkerende objecten zoals wegen, trappen, rasterpalen, op- en afritten en bomen.

De lasten ten aanzien van macrostabiliteit kunnen primair worden uitgedrukt in de benodigde extra berm lengte. In het gehanteerde voorbeeld blijkt echter dat de benodigde berm lengte juist korter is geworden. In dat voorbeeld kan dit dus niet als een last worden gezien.

Met betrekking tot het beheer zijn er geen significante wijzigingen te verwachten aangezien de eisen ten aanzien van de kwaliteit van de grasbekleding niet wijzigen. Hierbij wordt aangenomen dat er in het ontwerp, onafhankelijk van het toegestane golfoverslagdebiet, in ieder geval wordt gekozen voor een stevige kleilaag met een minimale gegarandeerde dikte van 0,8 m.

Ontwerpuitgangspunt: 5 l/s/m of 1 l/s/m hanteren?

Gezien de grote variatie van met name de baten (grote variatie in kruinhoogte) wordt aanbevolen om geen generiek uitgangspunt (bijvoorbeeld 5 l/s/m voor een geheel dijktraject) te hanteren met betrekking tot het toelaatbare golfoverslagdebiet maar om het te hanteren golfoverslagdebiet per dijkvak te bepalen. Dit vergt dus maatwerk. Globaal genomen kan worden gesteld dat het weinig lonend is om dijken waar nauwelijks golven voorkomen (waterstandsgedomineerd) te ontwerpen met een toegestaan golfoverslagdebiet van 5 l/s/m. Bij dijken waarbij de belasting gedomineerd wordt door golven is het waarschijnlijk lonend om te ontwerpen met een toegestaan golfoverslagdebiet van 5 l/s/m in plaats van 1 l/s/m. Dit dient echter voor iedere situatie specifiek te worden bepaald.

Om bovenstaande reden wordt aanbevolen om geen generiek uitgangspunt te hanteren met betrekking tot het toelaatbare golfoverslagdebiet maar om deze variabele te laten zijn over een dijktraject aangezien de consequenties (zowel baten als lasten) per dijkvak zeer verschillend kunnen zijn.

9. Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport geeft een verkenning van de potentiële consequenties van het toestaan van zwaardere golfverslagcondities voor dijken als alternatief voor het verhogen van de dijkkruin. De focus ligt hierbij op het verhogen van het toegestaan golfverslagdebiet naar 5 l/s/m of 10 l/s/m in plaats van 1 l/s/m. De studie richt zich met name op rivieren in het bovenrivieren-gebied.

9.1. Conclusies

De consequenties kunnen worden vertaald in de baten en de lasten. De baten worden primair uitgedrukt in de 'bespaarde' kruinhoogte en daarmee gepaard gaande bespaarde kosten, bespaard ruimtebeslag en ruimtelijke kwaliteit. De lasten worden voornamelijk gevormd door de extra maatregelen die getroffen moeten worden om grotere golfverslagcondities te kunnen weerstaan.

Baten

De bespaarde kruinverhoging is sterk afhankelijk van de specifieke situatie. In gebieden waarin nauwelijks golven (weinig strijklengte) kunnen voorkomen is de bespaarde kruinhoogte minimaal. In golfgedomineerde gebieden, welke zeker ook voorkomen in het rivierengebied, kan de bespaarde kruinhoogte echter significant zijn.

Lasten

De lasten worden voornamelijk gevormd door aanpassingen in het ontwerp of het onderhoud. De volgende aandachtspunten zijn in dit rapport beschreven:

- Erosie grasbekledingen
- Erosie rondom overgangen en discontinuïteiten
- Geotechnische instabiliteit
 - Macrostabiliteit
 - Afschuiven
 - Microstabiliteit
 - Piping
- Graverij
- Scheurvorming en andere beschadigingen

De potentiële gevolgen op bovenstaande mechanismen dienen in het ontwerp te allen tijde te worden beschouwd. Op basis van de beschouwde casus lijken de consequenties echter beperkt te zijn. Zo was vooraf de inschatting dat het aandachtspunt macrostabiliteit zou kunnen leiden tot grote consequenties (in termen van extra benodigde berm lengte) maar bleek dit in de casus niet het geval te zijn. Een belangrijk aandachtspunt is het ontwerp en (mogelijkheid tot) onderhoud van de overgangen in de bekleding waar in dit rapport verschillende aanbevelingen en handreikingen voor zijn gedaan. Verder vormen zandinsluitingen in de bekleding van het binnentalud een risico voor het bezwijken van de bekleding wanneer er aanzienlijke golfverslag optreedt. Bij het toestaan van zwaardere overslagcondities moet de aanwezigheid (of de invloed) van zandinsluitingen uitgesloten kunnen worden.

De gevolgen voor het onderhoud lijken beperkt te zijn aannemende dat het goed mogelijk is een zode van de kwaliteit 'gesloten zode' te hanteren en er een kleilaag van tenminste 80

centimeter is aangebracht. Wel is een aanzienlijk aandachtspunt voor het onderhoud van overgangen de vorming van bandensporen langs wegen. Of een weg met bandensporen ernaast nog een nette overgang is, is ten eerste de vraag, terwijl er nog geen eenduidige oplossing om bandensporen te voorkomen. Verder dient er beseft te worden dat tijdens een crisissituatie (noodreparatie) onder ontwerpomstandigheden de werkbaarheid mogelijk minder wordt als gevolg van een verweekte dijk, harde wind en golfoverslag.

Aandachtsgebieden welke niet gerelateerd zijn aan de waterveiligheid zijn in dit rapport summier belicht. Te denken valt aan evacuatie routes, verkeersfunctie, veiligheidsbeleving en woon en recreatieve functies van de dijk. Hiervoor wordt verwezen naar de rapportage van Sweco ([31]).

Op basis van de voorliggende bureaustudie wordt geconcludeerd dat het lonend kan zijn om een hoger toegestaan golfoverslagdebiet te hanteren. Er wordt dan ook aanbevolen om bij een dijkversterkingsproject altijd een consequentieanalyse uit te voeren van de baten en de lasten indien een toegestaan golfoverslagdebiet van 5 l/s/m of 10 l/s/m wordt gehanteerd in plaats van 1 l/s/m of 0,1 l/s/m. Tabel 9.1 tot en met Tabel 9.4 geven een overzicht van de geldende eisen voor ontwerp, beheer en onderhoud bij verschillende kritieke overslagdebieten. Deze tabel kan als handvat gebruikt worden voor het uitvoeren van een consequentieanalyse ten behoeve van het bepalen van het optimale kritieke overslagdebiet voor een ontwerp.

Verder wordt aanbevolen om het optimale ontwerp golfoverslagdebiet te bepalen op dijkvakniveau en niet op dijktrajectniveau aangezien de baten en lasten per dijkvak significant anders kunnen zijn. Het hanteren van een enkele waarde van het toegestane golfoverslagdebiet voor een geheel dijktraject wordt daarom afgeraden.

Tabel 9.1 Overzicht van relevante aspecten voor ontwerp, beheer en onderhoud van dijken voor een kritiek overslagdebiet tot 0,1 l/s/m

q_c l/s/ m		Ontwerp kruin en binnentalud Basis ontwerp richtlijnen	Methoden voor verdieping en optimalisatie	Beheer en onderhoud kruin en binnentalud
$\leq 0,1$	Grasbekleding <i>n</i>	geen eisen		geen eisen
	Overgangen en discontinuïteite <i>n</i>	geen eisen		geen eisen
	Macrostablieit	voldoende stabiliteit volgens reguliere berekening		
	Afschuiven	Voldoende stabiliteit		
	Microstablieit	Voldoende stabiliteit		
	Piping	Reguliere piping berekeningen		
	Beschadigingen (zoals graverij en scheurvorming)			Reguliere reparatie van beschadigingen

Tabel 9.2 Overzicht van relevante aspecten voor ontwerp, beheer en onderhoud van dijken voor een kritiek overslagdebiet van 0,1 - 1 l/s/m

q_c l/s/ m	Ontwerp kruin en binnentalud		Beheer en onderhoud kruin en binnentalud
	Basis ontwerp richtlijnen	Methoden voor verdieping en optimalisatie	
>0,1 ≤1	Grasbekledingen	<u>gesloten of open zode op klei</u>	<u>Waarborgen gesloten of open zode</u>
	Overgangen en discontinuïteiten	geen eisen	geen eisen
	Macrostabieliteit	voldoende stabiliteit volgens reguliere berekening <u>en berekening met golfoverslag (KPR memo)</u>	Maatwerk o.b.v. fragility curves methode
	Afschuiven	Voldoende stabiliteit <u>Voorkomen/verwijderen zand insluitingen in kleibekleding</u>	
	Microstabieliteit	<u>Niet maatgevend bij golfoverslag</u>	
	Piping	Reguliere piping berekeningen	<u>Mogelijk belemmering inspectie door golfoverslag</u>
	Beschadigingen (zoals graverij en scheurvorming)		Reguliere reparatie van beschadigingen

Tabel 9.3 Overzicht van relevante aspecten voor ontwerp, beheer en onderhoud van dijken voor een kritiek overslagdebiet van 1 - 5 l/s/m

q_c l/s/ m	Ontwerp kruin en binnentalud		Beheer en	
	Basis ontwerp richtlijnen	Methoden voor verdieping en optimalisatie	onderhoud kruin en binnentalud	
>1 ≤5	Grasbekledingen	<u>Taludhelling flauwer dan 1:2,3::</u> <u>$H_{m0} < 2$ m: open zode op klei</u> <u>$H_{m0} < 4$ m : gesloten zode op klei</u>	Taludhelling steiler dan 1:2,3: Maatwerk o.b.v. cumulatieve overbelastingmethode	Waarborgen gesloten of open zode
	Overgangen en discontinuïteiten	geen eisen aan objecten en overgangen op de kruin met objecten groter dan <u>0,15x0,15m²</u> en overgangen op <u>het binnentalud dient rekening gehouden te worden in het ontwerp</u>	'rekening houden' met objecten en overgangen in het ontwerp is maatwerk	<u>Waarborgen nette overgang</u>
	Macrostabiliteit	voldoende stabiliteit volgens reguliere berekening en berekening met golfoverslag (KPR memo)	Maatwerk o.b.v. fragility curves methode	
	Afschuiven	Voldoende stabiliteit Voorkomen/verwijderen zand insluitingen in kleibekleding		
	Microstabiliteit	Niet maatgevend bij golfoverslag		
	Piping	Reguliere piping berekeningen		Mogelijk belemmering inspectie door golfoverslag
	Beschadigingen (zoals graverij en scheurvorming)		Maatwerk: mogelijkheid graafwerende maatregelen	<u>Strengere controle en reparatie van beschadigingen</u>

Tabel 9.4 Overzicht van relevante aspecten voor ontwerp, beheer en onderhoud van dijken voor een kritiek overslagdebiet van 5 - 10 l/s/m

q_c l/s/ m	Ontwerp kruin en binnentalud		Beheer en onderhoud kruin en binnentalud
	Basis ontwerp richtlijnen	Methoden voor verdieping en optimalisatie	
>5 ≤10	Grasbekledingen	<u>Taludhelling flauwer dan 1:2,3 en $H_{m0} < 4$ m:</u> <u>gesloten zode op klei</u>	<u>Waarborgen gesloten zode</u>
	Overgangen en discontinuïteiten	<u>Alleen eisen aan objecten en overgangen op de kruin in het bovenrivierengebied met objecten groter dan 0,15x0,15m² en overgangen op het binnentalud dient rekening gehouden te worden in het ontwerp</u>	Waarborgen nette overgang
	Macrostabiliteit	voldoende stabiliteit volgens reguliere berekening en berekening met golfoverslag (KPR memo)	
	Afschuiven	Voldoende stabiliteit Voorkomen/verwijderen zand insluitingen in kleibekleding	
	Microstabiliteit	Niet maatgevend bij golfoverslag	
	Piping	Reguliere piping berekeningen	Mogelijk belemmering inspectie door golfoverslag
	Beschadigingen (zoals graverij en scheurvorming)		Intensievere reparatie van beschadigingen

9.2. Aanbevelingen

Naar aanleiding van deze rapportage wordt het volgende aanbevolen::

- Er wordt aanbevolen om eventuele baten-lasten analyses van specifieke projecten te ontsluiten zodat deze ervaringen bij andere projecten kunnen worden toegepast.
- Om een baten-lasten analyse uit te voeren kan voorliggende rapport als uitgangspunt worden gehanteerd.
- Wanneer er bij een dijktraject wordt overwogen om een hoger overslagdebiet toe te staan is het aan te bevelen om meerdere casussen uit te werken, aangezien de baten en de lasten (bijvoorbeeld het ontwerp ten aanzien van macrostabiliteit) sterk uiteen kunnen liggen per locatie binnen een dijktraject.
- Momenteel wordt er nog niet volledig probabilistisch ontworpen met betrekking tot macrostabiliteit en golfoverslag. Dit kan door het toepassen van de fragility curves methode. Elementen uit de methode zijn nog niet uitontwikkeld. Het is aan te bevelen om dit verder te ontwikkelen.
- Omdat de opbouw van het binnentalud (aanwezigheid van zandinsluitingen e.d.) een belangrijke rol speelt bij de stabiliteit van het binnentalud tijdens golfoverslag is het van

belang om de samenstelling van een bestaand binnentalud nauwkeurig te kunnen meten. Hiervoor zou EM of radar geschikt kunnen zijn. Uit recent onderzoek voor de tweede infiltratieproef bleek de radar een beter inzicht te geven. Het is aan te bevelen om de meest geschikte techniek voor gedetailleerd onderzoek naar de samenstelling van de ondergrond verder uit te zoeken en vervolgens uit te werken tot een direct toepasbare techniek.

- Overgangen worden doorgaans als zwakke plekken gezien. Er is een onderzoeksproject gaande (ref. [10] en [11]) waarbij in het veld kunstmatige overgangen zijn versterkt met bijvoorbeeld doorgroeiextielen, doorgroeistenen en andersoortige oplossingen. Er wordt aanbevolen om deze potentiële versterkingsmaatregelen te beproeven met de golfoploosimulator of de golfoverslagsimulator.
- Over de invloed van bandensporen bij overgangen is nog weinig bekend. Wanneer er bandensporen ontstaan zijn naast overgangen wordt deze overgang niet meer gezien als een nette overgang. Het voorkomen van bandensporen is praktisch gezien echter haast onmogelijk. Het is aan te bevelen om meer onderzoek te doen naar de invloed van bandensporen op de stabiliteit bij overgangen (bijvoorbeeld met de overslagsimulator).
- In het kader van het WBI2017 is een onderzoeksrapport opgesteld naar de reststerkte bij een afschuiving in combinatie met golfoverslag (referentie [4]). Er is met een kliff-erosiemodel gekeken in hoeverre een golfoverslagdebit van 1 l/s/m of 10 l/s/m de dijk na een afschuiving nog reststerkte heeft. Het onderzoek is een aanzet geweest, echter er is onvoldoende validatie en modelontwikkeling geweest om deze reststerkte kwantitatief in rekening te brengen. Het is aan te bevelen om dit reststerkte onderzoek verder uit te werken om de reststerkte te kunnen kwantificeren.
- Het aanbrengen van graafwerende voorzieningen in het binnentalud zou een optie kunnen zijn om het risico van graverij door grotere dieren te verminderen. Hier zijn echter momenteel nog geen ontwerpuitgangspunten voor gedefinieerd. Dit wordt opgepakt door de werkgroep Preventie maatregelen dierlijke graverij. (referentie [51]). Het wordt aanbevolen op de hoogte te blijven van de bevindingen van werkgroep Preventie maatregelen dierlijke graverij.
- Tijdens zwaardere golfoverslagcondities zijn kwel en erosie bij gegraven gangen mogelijk moeilijker waar te nemen. Eveneens wordt het nemen van maatregelen mogelijk bemoeilijkt door golfoverslag. Het zou kunnen dat wanneer er zwaardere golfoverslagcondities kunnen gaan optreden er al eerder preventieve maatregelen genomen moeten worden. Dit moet echter nog wel verder worden uitgezocht.
- Omdat scheuren door bijvoorbeeld verdroging een aangrijppunt kunnen zijn voor erosie en een intrede punt voor het overslaande water kunnen er reparaties van deze scheuren nodig zijn voor het winterseizoen of kunnen er preventieve maatregelen nodig zijn wanneer extreme condities worden verwacht. Er wordt aanbevolen om deze preventieve maatregelen al van tevoren in kaart te brengen (bieden van handelingsperspectief).

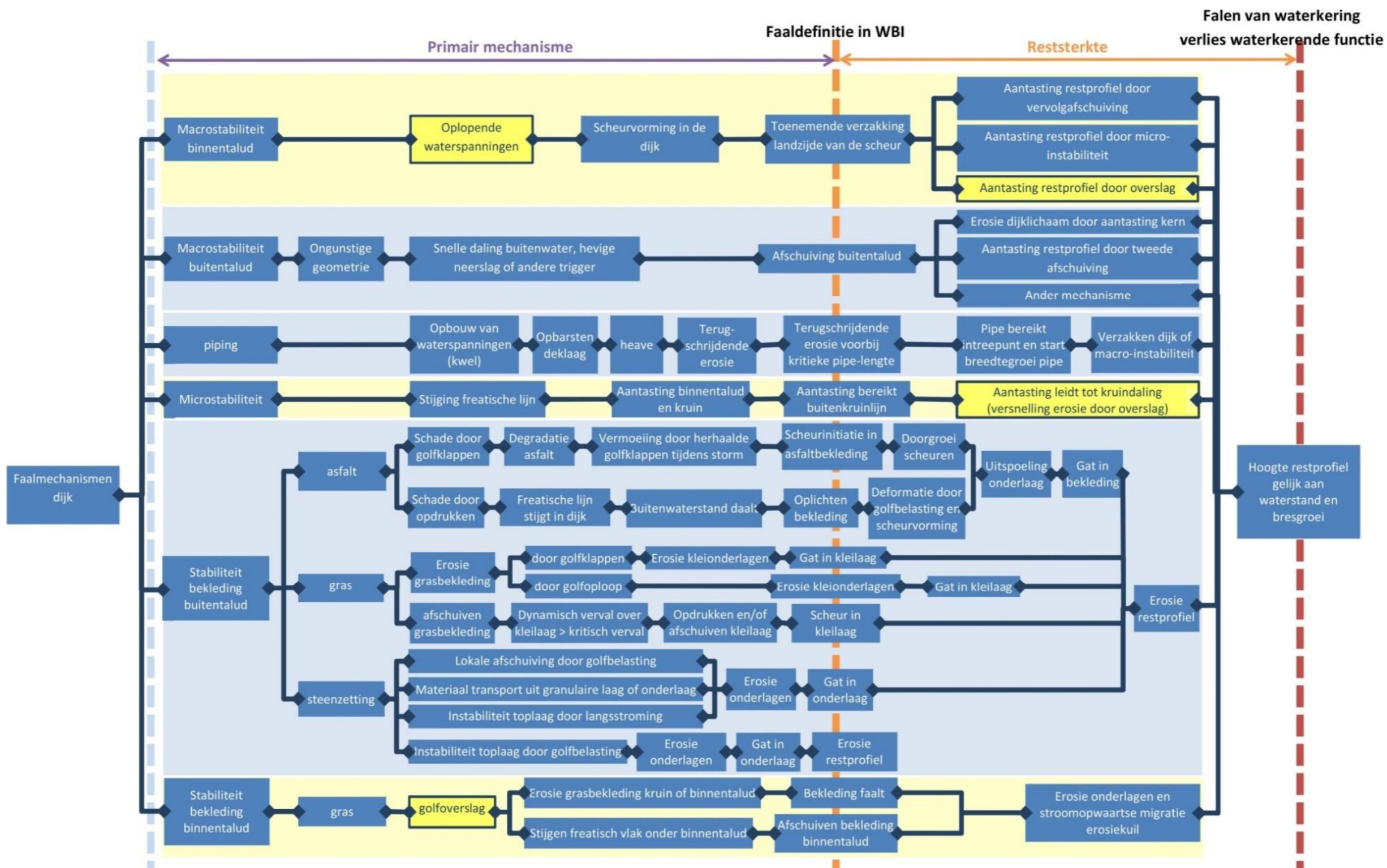
10. Referenties

- [1] Aguilar-Lopez, J. P., Warmink, J. J., Bomers, A., Schielen, R. M. J., Hulscher, S. J. M. H., Failure of Grass Covered Flood Defences with Roads on Top Due to Wave Overtopping: A Probabilistic Assessment Method, journal of Marine Science and Engineering, <http://www.mdpi.com/2077-1312/6/3/74/pdf>, 22 June 2018.
- [2] Bos, 2018. Persoonlijke e-mail van M. Bos (WSRL) aan P. van Steeg (Deltares) d.d. 24-04-2018.
- [3] Deltares, 2013, *Ontwerp stabiliteitsschermen (type II) in primaire waterkeringen (groene versie)*, rapport nr. 1205887-000-GEO-0016, 2013.
- [4] Deltares, 2014, *Residual dike strength after macro-instability, WTI2017*, Deltares report 1207811-0013-HYE-0007, april 2014
- [5] Deltares, 2014. *Bureaustudie overgangen met gras in primaire waterkeringen*. Deltares rapport met kenmerk 1209380-006-VEB-0005, december 2014.
- [6] Deltares, 2015. *WTI Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium, Product 5.12 Analyses grass erosion in wave run-up and wave overtopping conditions*. Deltares rapport met kenmerk 1209437-005-HYE-0003, januari 2015
- [7] Deltares, 2015, *Addendum Ontwerprichtlijn Stabiliteitsschermen*, memo nummer 1203849-080-GEO-0008, 2015
- [8] Deltares, 2015. *Verdelingen kritisch overslagdebiet WTI2017*. Deltares memo met kenmerk 1220086-005-HYE-0003, november 2015.
- [9] Deltares, 2016, *Fenomenologische beschrijving, Faalmechanismen WTI*. Deltares rapport met kenmerk 1220078-000-GEO-0010, februari 2016.
- [10] Deltares, 2016, 1230042-005-ZWS-0002, *Bouw overgangen, verslag van uitgevoerde werkzaamheden op de dijk in augustus 2016*, Deltares rapport met kenmerk 1230042-005-ZWS-0002.
- [11] Deltares, 2017, *Bouw verticale overgangen, verslag van uitgevoerde werkzaamheden op de dijk in 2017*. Deltares rapport met kenmerk 11200537-006-ZWS-0013
- [12] Deltares, 2017, *KPP Versterking Onderzoek Waterveiligheid, Toestand bekledingen*. Deltares rapport met kenmerk 11200537-005-ZWS-0003, december 2017.
- [13] Deltares, 2017. *Onderbouwing kansverdelingen kritisch overslagdebiet ten behoeve van het OIO2014v4*. Deltares rapport met kenmerk 1230090-011-GEO-0006-jvm, februari 2017
- [14] Deltares, 2017, *UGT en BGT bij het ontwerpen van de waterkering*, Deltares rapport 11200575-013-GEO-0001., 11 december 2017
- [15] Den Bieman, J., 2017. Open foam simulatie loskomende golf. Deltares animatie. December 2017.
- [16] Digigids, 2016, <http://digigids.hetwaterschapshuis.nl>
- [17] van Hoven, A., A.F. Noordam, 2017, *POVM Beter benutten actuele sterkte KIK Analyse Infiltratieproef IJsseldijk*, Deltares projectnummer 11200643-002-GEO-0002, versie 3, november 2017
- [18] ENW, 2008, Addendum I bij de Leidraad Rivieren t.b.v. het ontwerpen van rivierdijken, Expertise Netwerk Waterkeren, december 2008.
- [19] ENW, 2017, *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*, Herziene druk, 2017
- [20] EurOtop, 2018, *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures, An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*, www.overtopping-manual.com, second edition, december 2018.
- [21] HKV, 2017. *Hydraulische Randvoorwaarden Waal t.b.v. HWBP Projecten*. PR3592.10 Oktober 2017.

- [22] HKV, 2018, *Overslag Macrostabieliteit Waaldijken, Overschrijdingskans 1 l/s/m golfoverslag en beschouwing overslagduur*, PR3752.10, memorandum van: R. Nicolai, G. Pleijter, B. Maaskant, aan: M. Groenewoud, 4 april 2018.
- [23] Hoffmans, G.J.C.M., van Hoven, A., Hardeman, B., Verheij, H.J., 2014, [https://pure.tudelft.nl/portal/en/publications/erosion-of-grass-covers-at-transitions-and-objects-on-dikes\(13cc342e-af2c-40b5-81cf-1afe3c42ce01\).html](https://pure.tudelft.nl/portal/en/publications/erosion-of-grass-covers-at-transitions-and-objects-on-dikes(13cc342e-af2c-40b5-81cf-1afe3c42ce01).html) Scour and Erosion: Proceedings of the 7th international conference on scour and erosion, ICSE 2014. ed. / L Cheng; H An; S Draper. s.l. : CRC Press / Balkema - Taylor & Francis Group, 2015. p. 644-649.
- [24] KIJK, Deltares, 2017, Krachtige IJsseldijken Krimpenerwaard, *Beter benutten Actuele Sterkte Faalkans Updating 3 cases*, Deltares rapport 1230804-002-GEO-0002, v02_20170404 DEFINITIEF, april 2017
- [25] KPR, Kennisplatform Risicobenadering, *UGT en BGT bij het ontwerpen van waterkeringen (discussiestuk)*, Memo van Wouter ter Horst en Bob van Bree, 20 april 2016.
- [26] KPR, Kennisplatform Risicobenadering, 2017, *KPR factsheet UGT en BGT bij het ontwerpen van waterkeringen (discussiestuk)*, 15 juli 2016.
- [27] KPR, Kennisplatform Risicobenadering, *KPR factsheet werkwijze macrostabieliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4*, KPR memo, d.d. 04-04-2018
- [28] Min I en M. *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- [29] Min I&M, 2017. *Schematiseringshandleiding grasbekleding*, WBI 2017. 1 december 2016. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- [30] Ponsioen, L.A., 2016, *Overflow and wave overtopping induced failure processes on the land-side slope of a dike*. Master thesis, TU Delft, Mei 2016.
- [31] Sweco, Lips, N., *Plan van aanpak voor de topstellen van een ontwerp kader voor de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) bij het ontwerpen van waterkeringen*, Sweco rapport met projectnummer 357475 en referentienummer SWNL0221814-C1.1, concept 1.1, 16 maart 2018.
- [32] Rijkswaterstaat, 2012, *Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde*, 25 oktober 2012.
- [33] Rijkswaterstaat, 2016, *Schematiseringshandleiding grasbekleding*, 1 december, 2016.
- [34] Rijkswaterstaat, Handreiking grasbekleding, graverij, <https://handreikinggrasbekleding.nl/beheer-specifiek/dierlijke-activiteit/>
- [35] Rijkswaterstaat, 2017, *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen-normen*, versie OI2014v4, Februari 2017
- [36] Rijkswaterstaat, 2017. *Factsheet verschillen tussen het faalmechanisme Gras Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB) en het Hydraulisch Belastingniveau*, Appendix 2 'Presentatie Uitleg ontwerp punten bij Gras Erosie Kruin en Binnentalud, 18 mei 2017
- [37] POVM, 2017, *Rekentechnieken Basisrapport Eindige-elementenmethode (onderdeel 6.2.6A)*, M. Visschedijk, Deltares rapport: 11201406-002-GEO-0003, januari 2018
- [38] Schüttrumpf, H., 2001. *Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen – Experimentelle und Theoretische Untersuchungen*, PhD-Thesis.
- [39] STOWA dier-en-dijkendag, http://www.stowa.nl/nieuws_agenda/agenda/Dier-en-dijkendag, 4 oktober 2017.
- [40] Van Steeg, P., 2007. *Wave overtopping aspects of the Crest Drainage Dike*. Master thesis, TU Delft. Delft, 2007.

- [41] Van Steeg, P. Labujere en Mom, R., 2015. *Transition structures in grass covered slopes of primary flood defences tested with the wave impact generator*. E-proc. Of the 36th IAHR World congress 28 June- 3 July, 2015, The Hague, The Netherlands.
- [42] Sweco, 2018, *Verkenning dijkversterking Tiel – Waardenburg Geotechnische onderbouwing dijkontwerp*, referentie SWNL0222861, Concept C1.0, d.d. 22-3-2018
- [43] TAW, 1998, *Grondslagen voor waterkeren*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, januari 1998
- [44] TAW, 2002, *Technisch Rapport Golfoploop en golfoverslag bij Dijken*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, mei 2002
- [45] Visschedijk, M., 2018, *Rekentechnieken Basisrapport Eindige-elementenmethode (onderdeel 6.2.6A)*, POVM, Deltares projectnummer 11201406-002-GEO-0003, januari 2018
- [46] VTV, 2006, Rijkswaterstaat, *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen*, versie VTV2006, 10 september 2007
- [47] Voortgangsoverleg, bespreking tussenrapport 'consequentie verhogen toegestaan overslagdebiet' en vooruitblik uit te werken casussen, Tiel, 20-04-2018.
- [48] WBI2017, Wettelijk beoordelingsinstrumentarium, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 incl toelichting*, www.helpdeskwater.nl
- [49] WSRL, 2015 *Waaldijken Legger Primaire Waterkeringen Dijkpaaltraject Tiel Gorinchem (TG000 – TG438)* Registratienummer 201518294/TG
- [50] Waterschap Rivierenland, 2017, Hans Knotter, Jaap Bronsveld, *Beheer en onderhoudsplan Waterkeringen*, 18-04-2017
- [51] Waterschap Rivierenland, 2017, Hans Knotter, Jaap Bronsveld, *Beheer en onderhoudsplan Waterkeringen (bijlagen)*, 18-04-2017
- [52] Waterschap Rivierenland, 2010, *Beverprotocol (Castor fiber) Waterschap Rivierenland, Werkprotocol ingevolge de gedragscode Flora- en Faunawet voor waterschappen*, versie 01-01-2010.
- [53] Waterschap Rivierenland, 2018, Interview met WSRL d.d. 10-01-2018. Aanwezig: dhr. M. Groenewoud, H. Kotter, M. Bos, P. van Steeg.
- [54] Waterschappen, 2012, *Handboek dijkbewaking waarnemen en alarmeren, 'het Rode Boekje'*, 13-03-2012.
- [55] Wiki noodmaatregelen, http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Menselijke_of_dierlijke_activiteit en

A. Faalpadenschema





B. Geschiedenis van ontwerpen en beoordelen van dijken met betrekking tot golfoverslag

Voor zover bekend wordt er vanaf 1936 in Nederland rekening gehouden met golfoverslag bij het ontwerp van dijken. Toendertijd werd de kruinhoogte van de dijk gebaseerd op de golfoploophoogte. Tegenwoordig wordt er een methode bij het ontwerp en de beoordeling van de dijk toegepast die is gebaseerd op de cumulatieve overbelastingsmethode. De geschiedenis van het ontwerpen gebaseerd op golfoploophoogte tot de cumulatieve overbelastingsmethode wordt in onderstaande paragrafen beschreven.

B.1 Golfoploophoogte

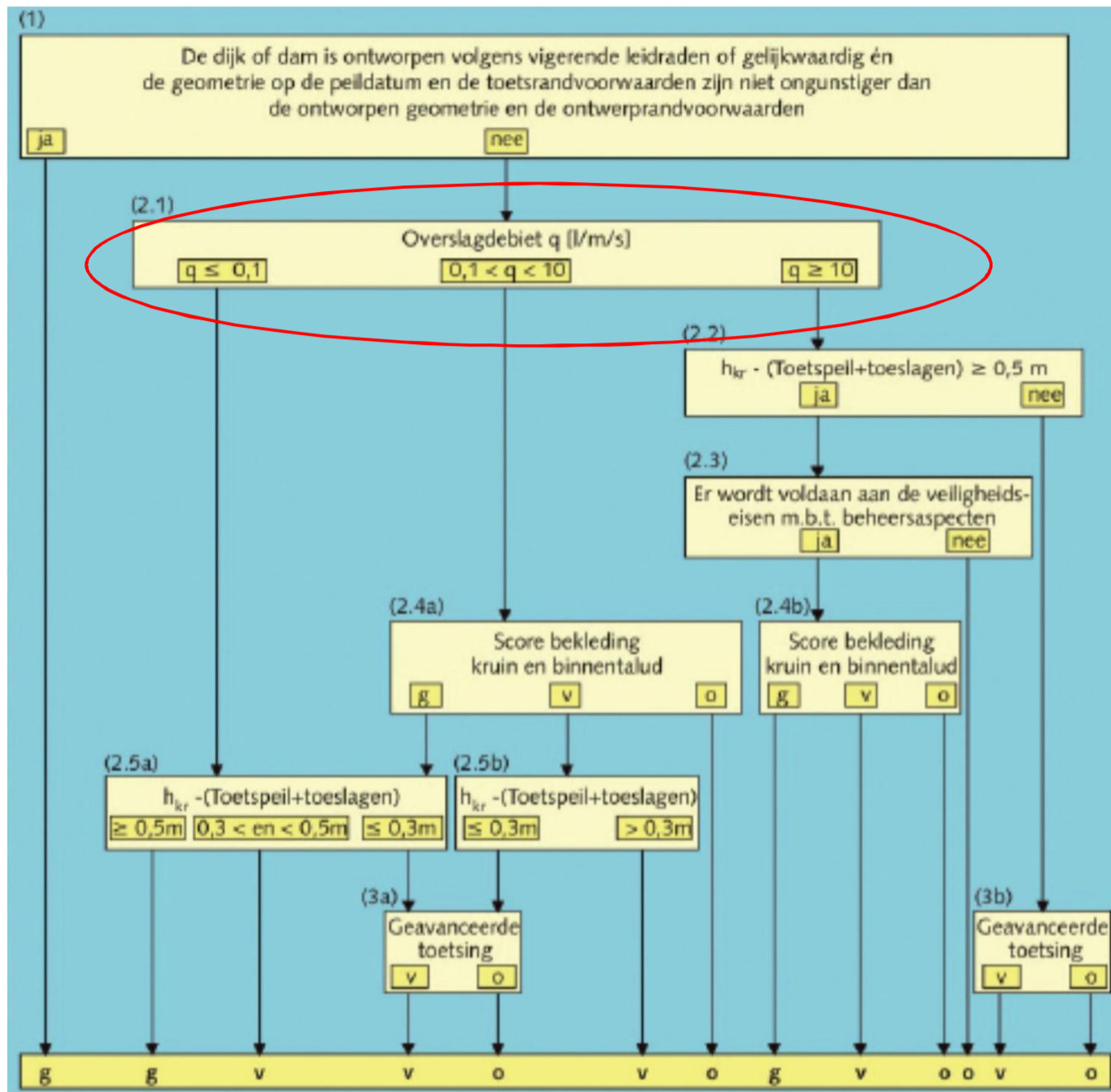
Vanaf 1936 werd de kruinhoogte van een dijk ontworpen op basis van de golfoploophoogte $z_{2\%}$; dit is de oploophoogte welke door 2% van de golven wordt overschreden. Dit lijkt gebaseerd te zijn op testen uit de jaren '30 en '40 van de vorige eeuw waarbij de golfmachine door menselijke kracht (soort fiets) werd aangedreven. Het bleek niet goed mogelijk om meer dan 50 golven achtereenvolgens met menskracht op te wekken. Op basis van deze 50 golven kon de 2% waarde van de golfoploophoogte worden bepaald [20]. In latere tijden werden de golfmachines niet meer met menskracht aangedreven en konden testen met meer golven worden uitgevoerd. Het gebruik van de parameter 2% bleef echter lange tijd gehandhaafd. De golfoploophoogte is afhankelijk van de hydraulische randvoorwaarden en de geometrie en ruwheid van de dijk. Verschillende formules waarmee de golfoploophoogte $z_{2\%}$ kan worden bepaald zijn weergegeven in [44].

B.2 Van golfoploophoogte naar golfoverslagdebiet

De oorspronkelijke formulering van 2% golfoploop is later vertaald in een hoeveelheid overslaand water per tijdseenheid en per strekkende meter dijk ($l/s/m$). Wanneer een klein en nog juist toelaatbaar golfoverslagdebiet wordt overschreden is de waterkering 'overbelast'. De kans op overschrijden van het debiet q mag voor elk dijkvak niet groter zijn dan de norm die in de Wet op de waterkering voor het betreffende dijkkringgebied is genoemd. Daarbij werd meestal uitgegaan van een ontwerpwaterstand (MHW). ([43], pag. 46).

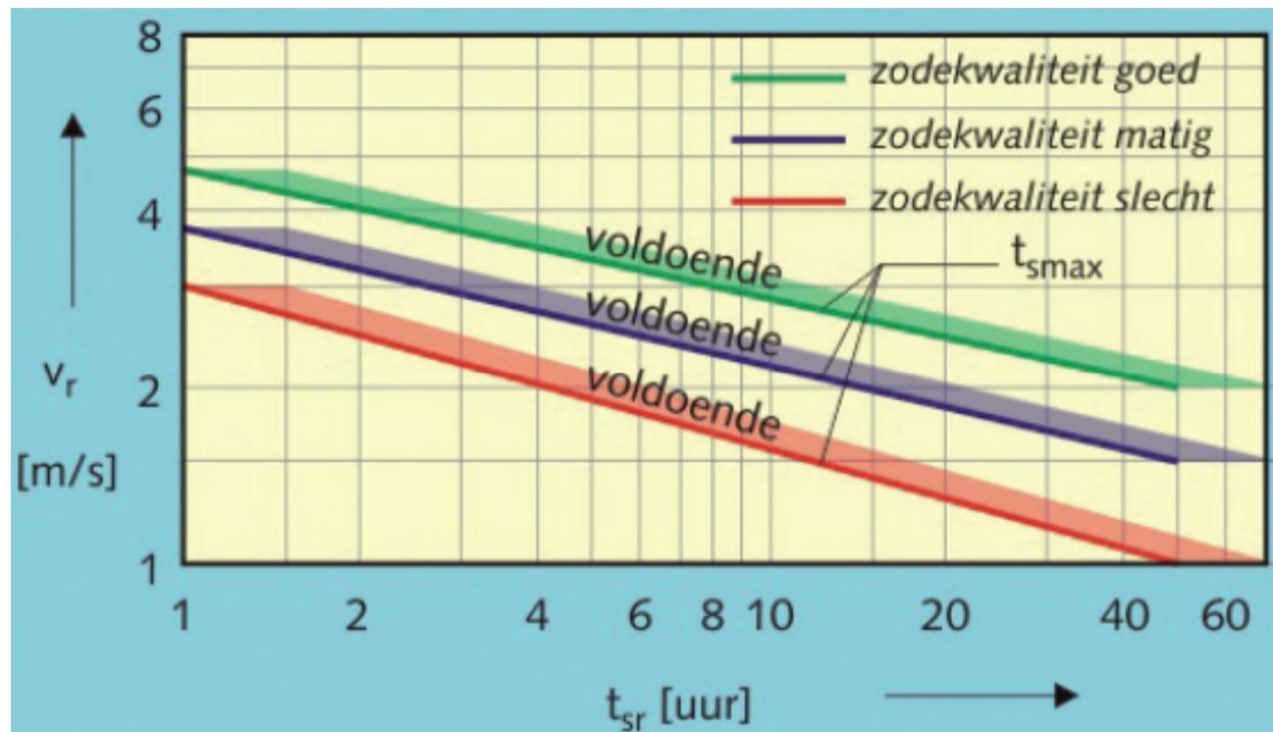
B.3 Van golfoverslagdebiet naar stroomsnelheid

Ten behoeve van de derde ronde toetsing van de primaire waterkeringen (2006 - 2011) is een toetsingsinstrumentarium beschikbaar gesteld: Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen [46]. In dit toetsinstrument (wat nu niet meer actueel is) dienen de waterkeringen getoetst te worden op verschillende faalmechanismen. Eén van de faalmechanismen is het faalmechanisme 'Hoogte'. De belangrijkste parameter in het oordeel op de hoogtetoets was het gemiddelde golfoverslagdebiet q , welke kon worden bepaald met behulp van [44]. Hoewel het niet de bedoeling is om een niet-vigerend beoordelingssysteem compleet weer te geven wordt hier wel een indruk gegeven van dit beoordelingssysteem. Het stroomschema ten aanzien van de beoordeling met betrekking tot hoogte is weergegeven in Figuur B.1.



Figuur B.1 Beoordelingsschema Hoogte voor dijken en dammen in [44] (niet meer actueel)

Wanneer bovenstaande figuur in het geheel wordt doorlopen, wordt men verwezen naar enkele andere stroomschema's. Voor situaties waarbij $q > 0,1$ l/s/m dient men veelal een 'gedetailleerde methode' toe te passen. Deze methode komt neer op een rekenmethode waarbij de rekenwaarde van de belastingduur vergeleken dient te worden met de maximale toelaatbare belastingduur. De toetsregel is weergegeven in Figuur B.2.



Figuur B.2 Gedetailleerde rekenregel voor toetsing op erosie door golfoverslag ([44], niet meer vigerend)

In Figuur B.2 geeft de horizontale as de maatgevende belastingduur aan. Op de verticale as staat de belastingparameter: een rekenkundige stroomsnelheid v_r . Deze parameter is op het buitentalud afhankelijk van de golfparameters, de taludhelling en het niveau op het buitentalud. Voor het binnentalud dient dezelfde waarde genomen te worden als de berekende waarde op de buitenkruinlijn.

In de VTV, 2006 is dus, hetzij enigszins verstopt, de (rekenkundige) stroomsnelheid van belang. Hierbij wordt opgemerkt dat er toentertijd weinig informatie beschikbaar / geïmplementeerd was over de stroomsnelheid op het binnentalud en dat gebruik gemaakt werd van een relatief eenvoudige vuistregel.

B.4 Van stroomsnelheid naar cumulatieve overbelastingsmethode

In het kader van het WBI2017 onderzoeksprogramma zijn vele testen met de golfoverslagsimulator uitgevoerd en geanalyseerd. De golfoverslagsimulator is een machine welke op een (gras)dijk kan worden geplaatst en overslaande golftongen kan simuleren. Op basis van de resultaten hiervan is een stabiliteitsmodel van grasbekledingen opgesteld: de zogenoemde cumulatieve overbelastingsmethode. Deze is geïmplementeerd in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium welke dient te worden gehanteerd in de huidige beoordelingsronde (2017 - 2023). Bij de cumulatieve overbelastingsmethode wordt per overslaande (of olopende) golf de frontsnelheid rekenkundig bepaald. Wanneer het kwadraat van deze snelheid (U^2) groter is dan een kritische snelheid in het kwadraat (U_c^2), dan wordt de grasbekleding overbelast. Alle overbelasting-gevallen in een storm worden bij elkaar opgeteld. Indien de overbelasting een kritische waarde (D) overschrijdt, dan wordt verondersteld dat de grasbekleding faalt. Het model is als volgt in formulevorm:

$$\sum_{i=1}^N (U_i^2 - U_c^2) = D$$

Waarbij

N = aantal golffronten dat het te toetsen punt passeert met $U > U_c$ (-)

U_i = frontsnelheid van de i -de golf in de beschouwde tijdspanne op het te toetsen punt
(m/s)

U_c = kritische frontsnelheid (m/s)

D = cumulatieve overbelasting (m^2/s^2)

De kritische stroomsnelheid U_c (de feitelijke sterkteparameter) is afhankelijk van de graskwaliteit. Deze kan nog met een coëfficiënt gecorrigeerd worden indien er sprake is van een overgang welke de zode onderbreekt.

De optredende stroomsnelheid U_i (de feitelijke belastingsparameter) kan nog gecorrigeerd worden door gebruik te maken van een versnellingsfactor (in het geval van een relatief lang en steil binnentalud) of een andere factor welke de invloed van een overgang op de stroomsnelheid incorporeert.

De cumulatieve overbelastingsparameter D geeft de mate van schade weer. Zo is een waarde van $D = 7000 m^2/s^2$ de rekenkundige waarde welke hoort bij 'bezwijken van de grasmat'.

B.5 Van cum. overbelastingsmethode naar golfoverslagdebiet (WBI2017)

De cumulatieve overbelastingsmethode is voor het buitentalud (belasting in de golfoploopzone) geïmplementeerd in WBI2017. Dit is een semi probabilistische methodiek waarbij rekenkundige waarden voor de schadeparameter ($D = 7000 m^2/s^2$) en de kritische stroomsnelheid ($U_c = 6,6 m/s$ voor een gesloten zode en $4,3 m/s$ voor een open zode) worden gebruikt.

Voor het binnentalud (belasting in de golfoverslagzone) wordt er bij het WBI (2017) indirect gebruik gemaakt van de cumulatieve overbelastingsmethode. Dit wordt uitgelegd nadat de werkwijze in het WBI is toegelicht

Werkwijze WBI2017

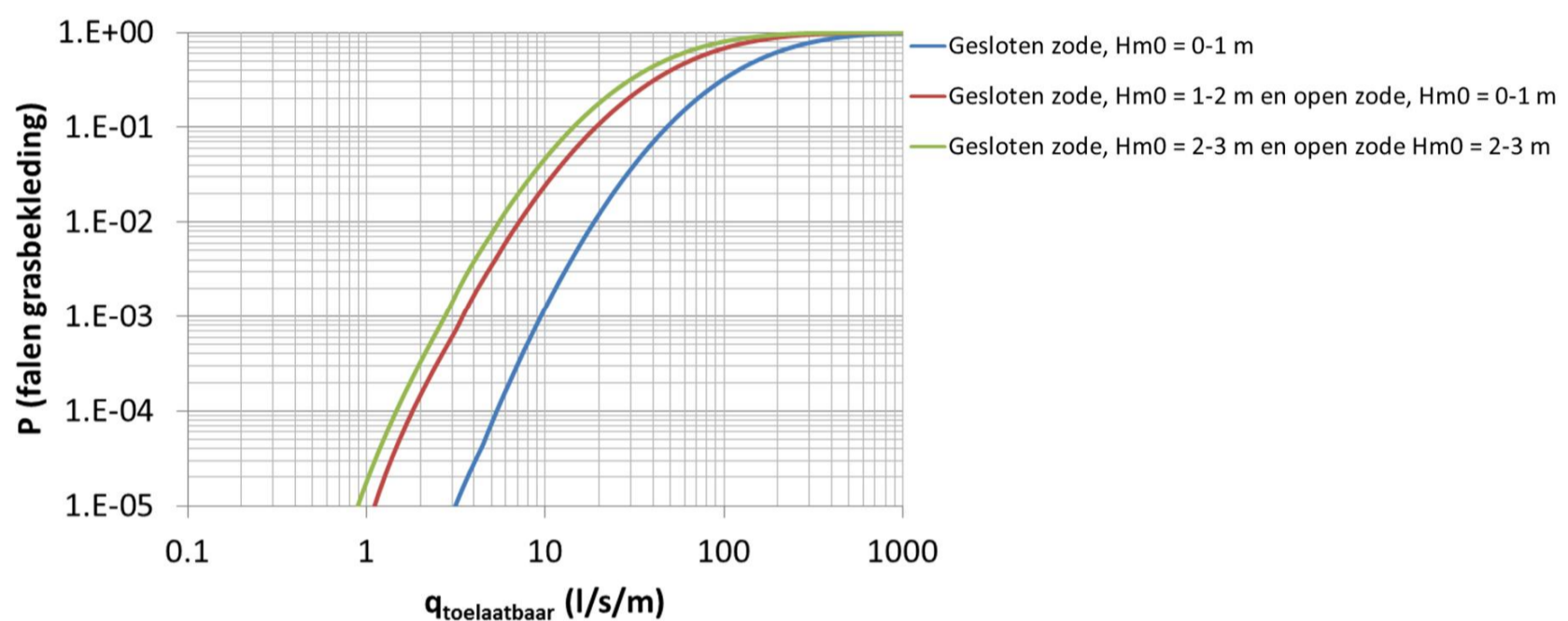
(gedetailleerde toets grasbekleding erosie kruin en binnentalud, GEKB)

Bij de wettelijke beoordeling van primaire waterkeringen dient de gebruiker (bij een gedetailleerde toets) een golfhoogteklasse en de graskwaliteit te bepalen. Op basis daarvan wordt de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet bepaald. De kansverdeling van het kritisch overslagdebiet is een lognormale verdeling met de waarden zoals weergegeven in Tabel B.1 (μ is de verwachtingswaarde en σ is de standaardafwijking van het natuurlijk logaritme van het kritieke overslagdebiet). Dit kritisch overslagdebiet bepaalt als het ware de sterkte van de bekleding.

Tabel B.1 Parameters van de lognormale verdeling voor het kritieke overslagdebiet bij verschillende golfhoogteklassen en zodekwaliteit ([33])

Golfhoogteklasse	Gesloten zode		Open zode	
	μ	σ	μ	σ
0-1 m	225	250	100	120
1-2 m	100	120	70	80
2-3 m	70	80	40	50

Het bovenstaande is inzichtelijk gemaakt door de lognormale verdelingen te plotten. Deze plots zijn weergegeven in Figuur B.3.



Figuur B.3 Grafische weergaven van de kans op falen van de grasbekleding als functie van het optredende golfoverslagdebiet, golfhoogte en graskwaliteit. Deze grafiek geeft als het ware de 'sterkte' van de grasbekleding weer

Voorbeeld 'sterkte' van de grasbekleding conform WBI2017:

Het binnentalud is bekleed met een gesloten zode. De externe belasting bestaat uit een significante golfhoogte tussen 0 en 1 m, zodat de blauwe lijn in Figuur B.3 van toepassing is. In de tabel valt af te lezen dat de parameters μ en σ gelijk zijn aan respectievelijk 225 l/s/m en 250 l/s/m. Op basis van de bovenstaande figuur kan worden afgelezen dat, gegeven een overslagdebiet van 100 l/s/m, de kans op falen van de grasbekleding gelijk is aan 0,3 (30%). Bij 10 l/s/m is deze kans gelijk aan ($10^{-3} = 0,1\%$) en bij 1 l/s/m is deze kans (veel) kleiner dan 10^{-5} .

In het WBI2017 merkt de gebruiker hier niets van, dit zit als het ware onder de motorkap verborgen. De beoordeling vindt plaats door de hydraulische belasting (kansverdeling optredende debiet) te combineren met de sterkte (kansverdeling van het kritische overslagdebiet zoals hierboven gegeven) en hieruit een faalkans uit te rekenen die wordt vergeleken met de norm.

Toelichting WBI2017 (GEKB)

In het WBI2017 wordt dus gerekend met overslagdebieten en niet met de cumulatieve overbelastingsmethode zoals in eerdere paragrafen is toegelicht. Hierbij wordt echter opgemerkt dat deze methodiek is onderbouwd door een tweetal studies ([8] en [13]). In die onderbouwingen zijn probabilistische sommen uitgevoerd op basis van de cumulatieve overbelastingsmethode, een vertaalslag gemaakt naar overslagdebieten en is aangetoond dat de hierboven gegeven verdeling van het kritisch overslagdebiet gebruikt kunnen worden ten behoeve van het WBI2017.

Op basis van bovenstaande kan dus gesteld worden dat de cumulatieve overbelastingsmethode als basis is gebruikt om te verifiëren dat de voorgestelde kansverdeling van toelaatbaar golfoverslagdebiet mag worden gehanteerd in het WBI2017. Deze WBI2017 aanpak mag overigens alleen worden toegepast indien wordt voldaan aan de volgende toepassingsvoorwaarden ([28]):

- Graskwaliteit is een open zode of een gesloten zode
- $H_{m0} \leq 3$ m. De golfhoogte wordt bepaald door het uitvoeren van een HBN berekening bij 0,1 l/s/m gegeven de doorsnede-eis voor het faalmechanisme GEKB.
- Taludhelling flauwer dan 1V:4H of kleilaagdikte $\geq 0,4$ m.

B.6 Ontwerpinstrumentarium (OI2014v4)

Ten behoeve van het ontwerpinstrumentarium (OI2014v4) heeft Deltares ([13]) een zelfde soort aanpak gehanteerd zoals beschreven in voorgaande paragraaf. Echter, daarbij zijn nieuwe inzichten geïmplementeerd in de onderbouwende cumulatieve overbelastingsmethode zoals:

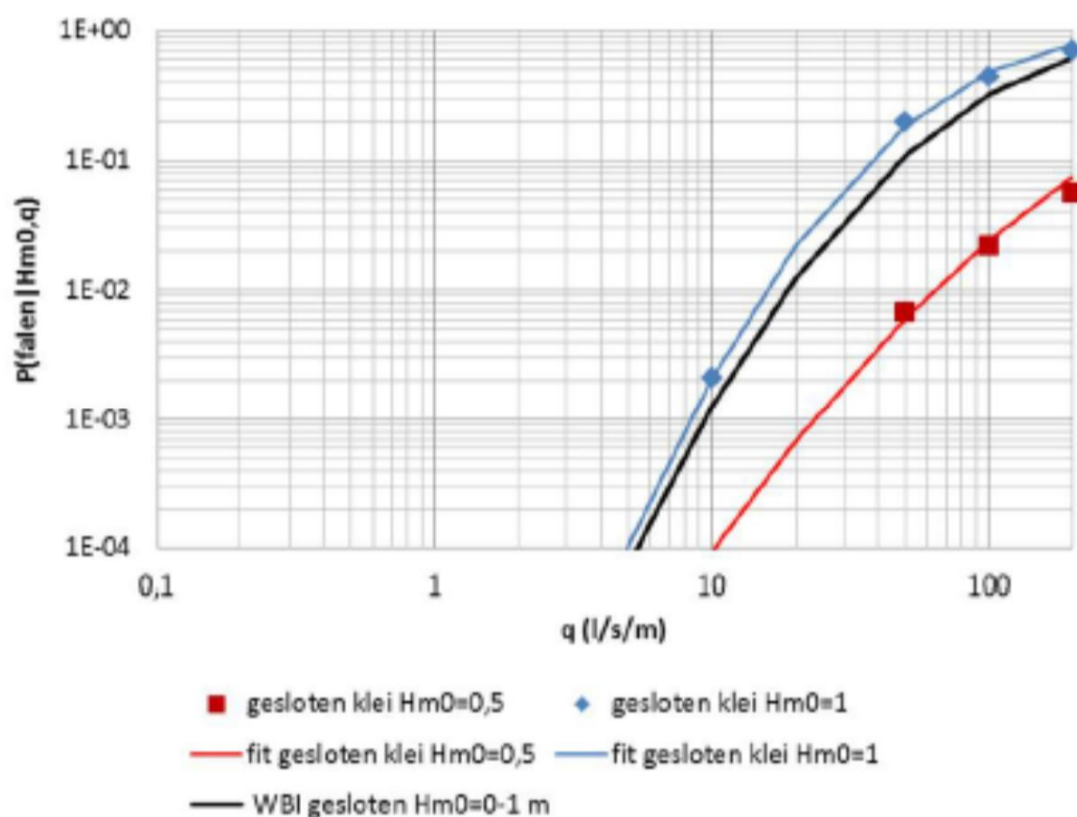
- Het effect van de taludhelling en taludlengte
- Introductie van factoren waarmee de invloed van overgangen en objecten in rekening kan worden gebracht (deze kennis staat overigens nog in de kinderschoenen)
- Verdeling van overslaande golven gedurende een storm
- Erosieve belasting van de bekleding bij een werkelijke storm en waterstandverloop voor verschillende watersystemen.

Met de hierboven gegeven inzichten zijn nieuwe kansverdelingen gefit van het kritisch overslagdebiet (de 'sterkte' van de grasbekleding). Hierdoor is het mogelijk om onderscheid te maken in:

- Watersysteem
 - Stormgedreven (kust, meren, estuaria en benedenrivierengebied)
 - Bovenrivierengebied
- Type bekleding
 - Gesloten zode op klei
 - Open zode op klei
 - Gesloten zode op zand
- Overgang
 - Geen overgang
 - Verschillende typen overgangen

Voorbeeld (overgenomen uit [13])

- Dijk in het bovenrivierengebied.
- Gekarakteriseerd door een belastingduur van circa 5 uur met het maximale golfoverslagdebiet (in plaats van 3 uur zoals bij een stormgedreven systeem)
- Een versnellingsfactor van 1,4 (wat ongeveer de maximaal optredende versnellingsfactor kan zijn van het overslaande water op het binnentalud)
- Gesloten zode op klei
- $H_{m0} = 0,5$ m
- 1:2 buitentalud (zoals vaak voorkomt in het rivierengebied)
- Geen invloed van overgangen



Figuur 10.1 De kans op falen gegeven een significante golfhoogte H_{m0} van 0,5 m (rode lijn), een gesloten zode in het bovenrivierengebied (overgenomen uit [13])

De zwarte lijn geeft de eerder gegeven WBI methodiek weer. De rode lijn geeft de waarden weer voor de beschouwde situatie. Er valt te zien dat in deze situatie de kans op falen kleiner is dan de kans op falen volgens het WBI2017 (bij 10 l/s/m: 0,01% i.p.v. 0,1%, bij 100 l/s/m: 2% in plaats van 30%). Voor die specifieke situatie zal er dus waarschijnlijk met hogere golfoverslagdebieten kunnen ontworpen (specifiek voor dit faalmechanisme). Op de bovenstaande manier zijn verschillende casussen doorgerekend en zijn verdelingen afgeleid. Uiteindelijk zijn deze verdelingen niet geïmplementeerd in het OI2014v4 maar is gekozen om het aantal toepassingsvoorwaarden beperkt te houden en zijn alleen de meest gangbare en conservatieve waarden aangehouden. Hierbij is niet gekozen om de verdelingen in het OI2014v4 weer te geven maar vaste waarden van het toelaatbare golfoverslagdebiet met verschillende beperkingen (o.a. ten aanzien van overgangen).

In het OI wordt aangegeven dat ook een groter overslagdebiet dan 10 l/s/m mag worden aangehouden als:

(tekst integraal overgenomen uit OI2014v4 [35])

1. Het binnentalud op een groter overslagdebiet wordt ontworpen. Dit kan door:
 - a. Gebruik te maken van andere erosiebestendige materialen zoals asfalt, open steenasfalt, versterkt gras en dergelijke of

- b. De rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet locatie specifiek af te leiden, op basis van de gegevens en gedachten die ten grondslag liggen aan de rekenwaarden in tabel 5. Dit betreft maatwerk en wordt bij het ontwerp alleen aanbevolen als hiermee wezenlijke besparingen zijn te realiseren*

En

- 2. De kans voldoende klein is dat door overslag een overstroming optreedt zonder het bezwijken van de kering (overschrijden kombergend vermogen van het achterland). Het gaat hierbij alleen over overstromingen met substantiële economische schade of slachtoffers tot gevolg.*

B.7 Mogelijke verbeteringen WBI en OI

Bij het WBI2017 en OI2014v4 heeft men de mogelijkheid om af te wijken van de aanbevolen paden. Het ontbreekt nog echter aan goede richtlijnen hoe dit gedaan dient te worden. Binnen het WBI heeft de gebruiker de mogelijkheid om te kiezen voor andere waarden van de verdeling van het kritieke golfoverslagdebiet (in de beoordelingssoftware Ringtoets zijn dit parameters welke de gebruiker vrij kan kiezen). Dergelijke gewijzigde waarden zouden onderbouwd dienen te worden door gebruikmaking van de cumulatieve overbelastingsmethode. De bevindingen in [13] geven hiervoor een eerste goede aanzet.

Idealiter zou er niet meer gerekend hoeven te worden in termen van het overslagdebiet maar zou er direct gerekend kunnen worden met de cumulatieve overbelastingsmethode (welke is gebruikt als onderbouwing van het rekenen met golfoverslagdebieten), zoals ook bij golfoploop het geval is.

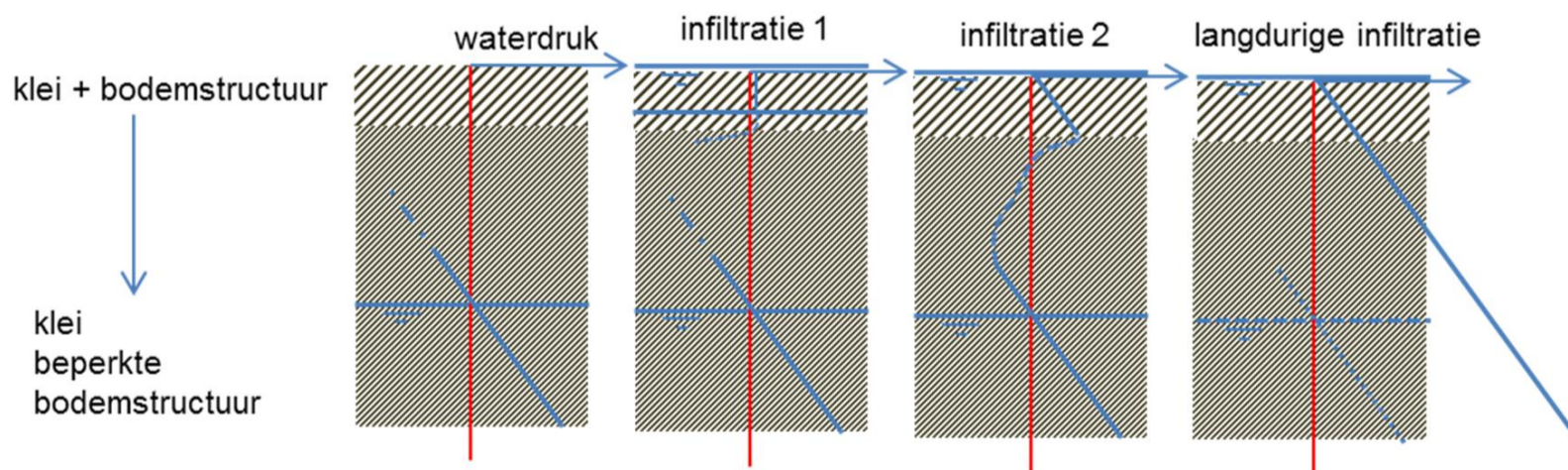
C. POVM Actuele sterkte - infiltratieproef

Zaterdag 9 augustus 2017 is langs de Hollandse IJssel een infiltratieproef uitgevoerd. Hiermee is gesimuleerd dat er golfoverslag optreedt waarvan een deel in de dijk infiltreert. Er bestaat veel onzekerheid over het proces van infiltratie, waardoor er in de praktijk veiligheidshalve wordt uitgegaan van een volledig verzadigde dijk bij een golfoverslagdebiet van 1 l/s/m of meer, scenario 'volle dijk' (zie ook paragraaf 4.2.3). De schematisering die hierbij wordt gebruikt is een freatisch vlak gelijk aan het maaiveld in het binnen het WBI2017 (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017) en OI (Ontwerp Instrumentarium) gangbare stabiliteitsanalyse model LiftVan. Deze paragraaf beschrijft in het kort de infiltratieproef en de lessen die hieruit kunnen worden geleerd.

De hypothese bij het onderzoek was dat de schematisering van een freatisch vlak op het maaiveld bij een golfoverslagdebiet groter dan 1 l/s/m in een stabiliteitsanalyse conservatief is en door middel van onderzoek kwantitatief kan worden aangescherpt.

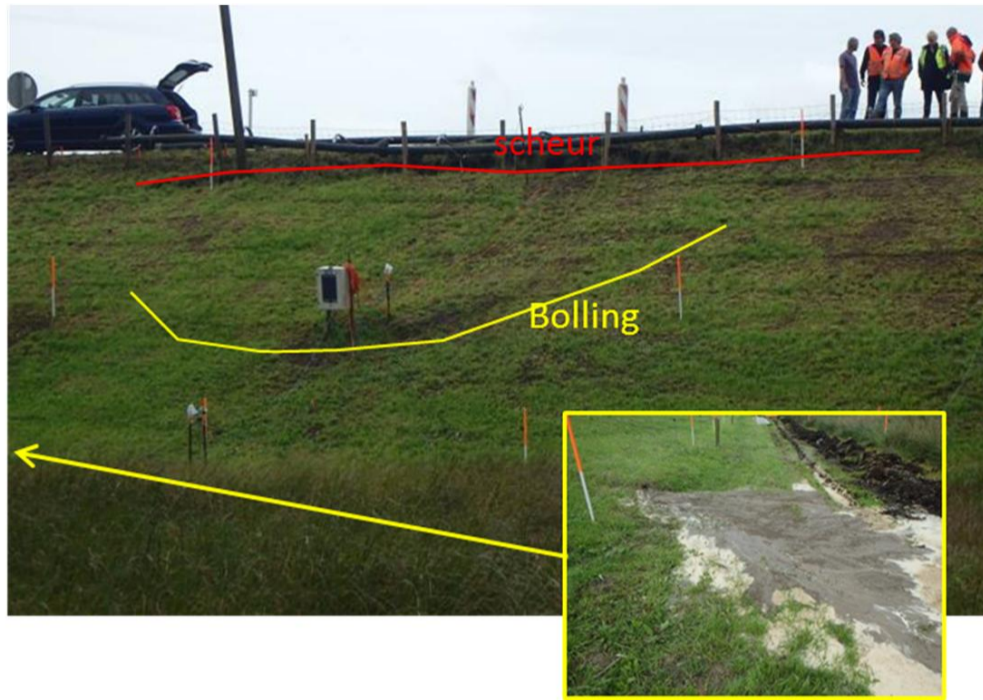
Een gangbare kleidijk heeft een relatief ondoorlatende kleikern en een relatief doorlatende klei aan het oppervlak. Deze opbouw ontstaat door natuurlijke bodemstructuurvormende processen, zoals droogte en vernatting door neerslag, vorst, graverij door wormen, insecten en grotere dieren, werking van wortels en schimmels. De laagdikte met een ontwikkelde bodemstructuur is vaak in de orde van 1 à 1,5 m, waarbij de toplaag van ca. 30 cm relatief rul en doorlatend is en met toenemende diepte de aggregaten groter worden en beter op elkaar aansluiten. De doorlatendheid en het aantal macroporiën neemt af met de diepte onder het maaiveld.

Indien er als gevolg van golfoverslag water over de dijk loopt dan zal dit relatief snel infiltreren in de rulle toplaag, maar veel langzamer in de onderliggende dichtere en minder doorlatende klei. Dit wordt geïllustreerd in Figuur C.1. Met gangbare stromingsparameters voor klei met en zonder bodemstructuur wordt berekend dat de eerste twee stappen in deze figuur relatief snel verlopen, maar dat het bereiken van het laatste beeld ('volle dijk') normaal gesproken veel langer duurt dan een stormduur of golfoverslaggebeurtenis in Nederlandse omstandigheden.



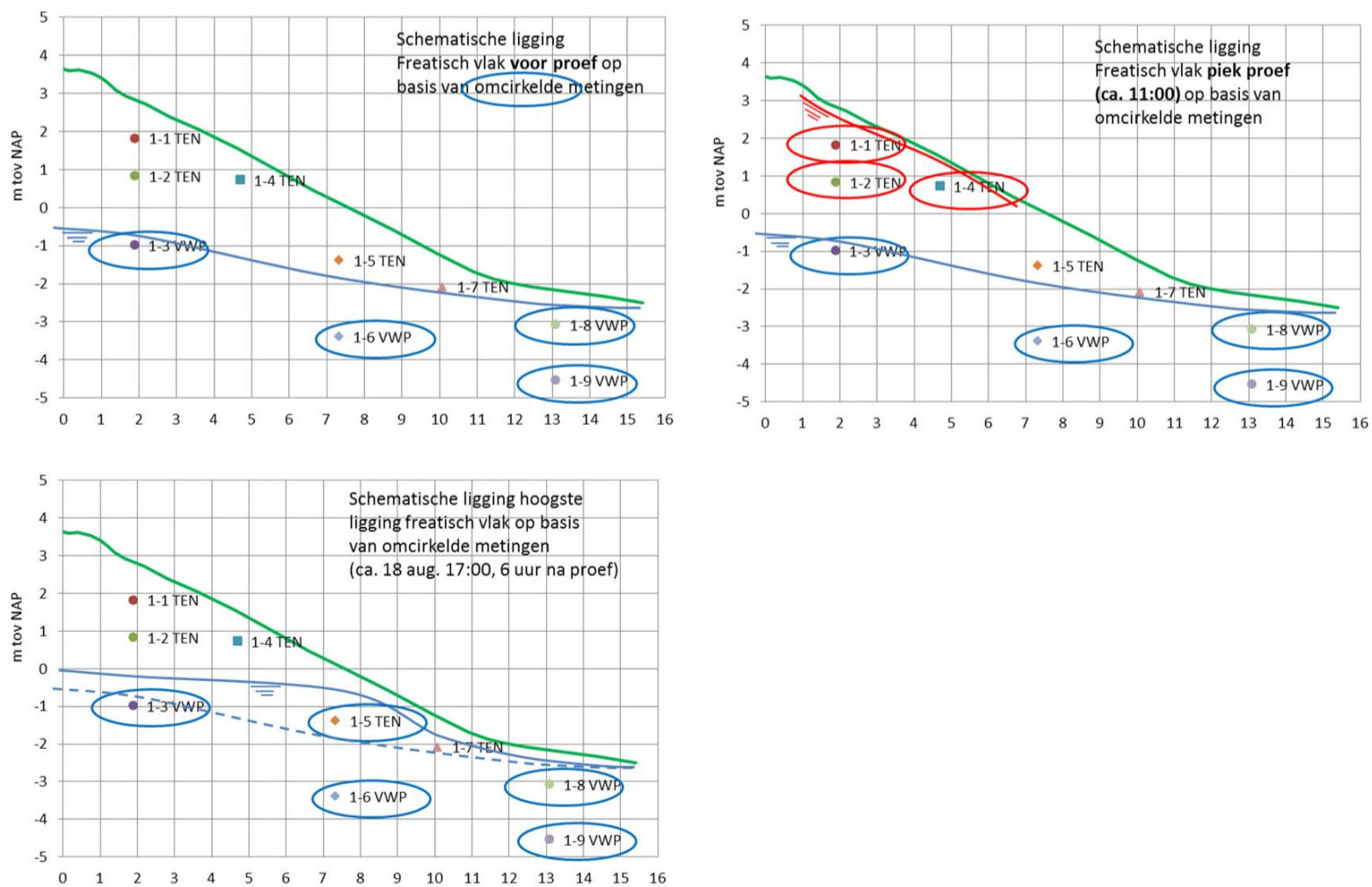
Figuur C.1 Infiltratie in kleidijk met gangbare opbouw van bodemstructuur. Waterdruk over de hoogte in de dijk voor 4 fasen van infiltratie)

Helaas is al snel tijdens het uitvoeren van de infiltratieproef een instabiliteit opgetreden, waardoor de pompen na ca. 50 minuten zijn uitgezet (Figuur C.2). De waterspanningsmeters in de dijk gaven op dat moment de situatie vergelijkbaar met 'infiltratie 2' in Figuur C.1.



Figuur C.2 Instabiliteit bij infiltratieproef langs de Hollandse IJssel

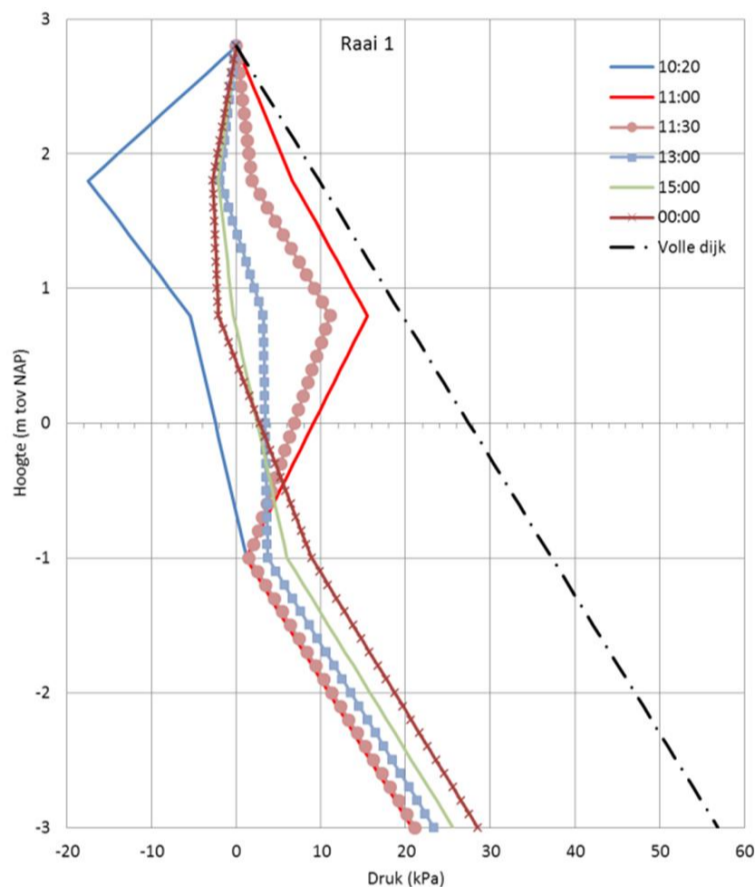
Een visualisatie van het freatisch vlak in de dijk op basis van waterspanningsmetingen, voorafgaand aan de proef, vlak voor het uitzetten van de pompen en een aantal uur hierna staat in Figuur C.3.



Figuur C.3 Visualisatie freatisch vlak in de dijk op basis van metingen, linksboven voor de proef, rechtsboven vlak voor de instabiliteit en onder ca. 6 uur na de proef.

De meting van de waterdruk in één verticaal in het dwarsprofiel wordt gegeven in Figuur C.4.

Zoals te zien neemt in overeenstemming met Figuur C.1 de waterdruk bovenin het profiel snel toe, maar blijft de waterspanning op wat grotere diepte achter. De situatie van een 'volle dijk' wordt niet gehaald. Helaas moest de proef worden stopgezet vanwege de opgetreden instabiliteit welke niet het gevolg was van hoge waterspanningen in de kern van de dijk, maar door een afwijkende grondopbouw van een kleilaag op een zandinsluiting.



Figuur C.4 Druk(kPa) tegen hoogte (m NAP) voor raai 1 samen met de druklijn voor het scenario 'volle dijk'.

In plaats van een volledige kleidijk was er onder een stevige kleilaag van circa 0,8 m een laag 'klei met zandvoorkomens' en een 'zandlens' aanwezig. Dit is in hoofdzaak de oorzaak geweest van de instabiliteit. Het zand heeft geen cohesie en de schuifsterkte neemt af als het zand wordt verzadigd met water en de waterdruk hierin oploopt. In dit geval kon dit extra snel gebeuren, omdat de toplaag zeer doorlatend bleek, en omdat onder het zand weer een kleikern aanwezig was. De zandinsluiting kon zich daardoor zeer snel vullen, dit overigens in tegenstelling tot het geval van een volledige zanddijk met een kleibekleding.

De uitgevoerde proef en analyses verwerpen de oorspronkelijke hypothese niet, echter geeft dit ook maar beperkt steun aan de hypothese. Voor dat laatste was de proef te kort en het overslagdebiet te klein. Er is wel gemeten dat de waterspanningen dieper in de kern van de dijk maar langzaam opliepen en ver verwijderd bleven van het scenario 'volle dijk', echter door de instabiliteit moest de proef worden gestaakt en kon niet worden doorgezet. De onderzoeksvraag blijft daarmee staan.

Ongemakkelijk is het feit dat er een uitgebreid grondonderzoek is geweest in het beperkte dijkvak van circa 40 m waarbij de beperkte zandinsluiting onder het talud is gemist. Weliswaar is vanwege het niet verstoren van het proefvak van 30 m het onderzoek vooral uitgevoerd net naast het proefvak, maar dan nog is de hoeveelheid en dichtheid van het onderzoek veel groter geweest dan gangbaar bij de beoordeling en het ontwerp van dijken. De kans dat dit soort gevoelige plekken worden gemist bij een gangbaar onderzoek is zeer groot.

Dit leidt tot mogelijke vraagstukken:

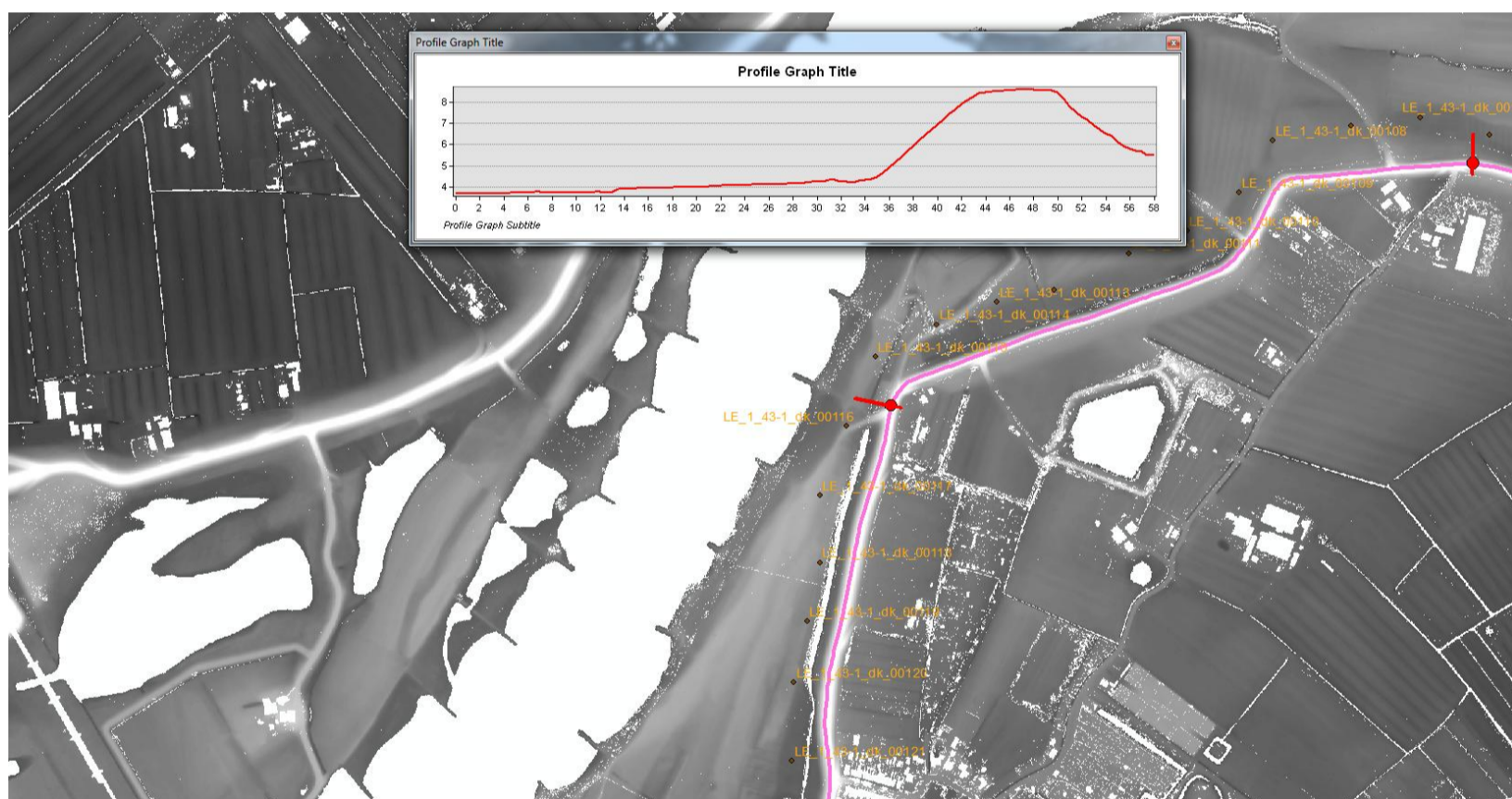
- Is de proeflocatie met een lokaal zandvoorkomen een uitzondering? Hoe zijn de schades na 1953 gerepareerd, is hierbij ook zand met een kleilaag gebruikt als aanvulling op het beschadigde resterende kleiprofiel?
- In hoeverre is de hogere doorlatendheid van de toplaag op de proeflocatie (circa een factor 10 meer doorlatend dan de meest conservatieve, lees meest doorlatend dan aannamen uit de literatuur) een uitzondering of is de toplaag toch veel meer doorlatend dan gangbaar aangenomen?
- In hoeverre is 1 l/s per m een veilig ontwerp overslagdebiet en moet hierbij niet nadrukkelijker dan momenteel gangbaar naar de stabiliteit tegen afschuiven van de bekleding worden gekeken?
- Zijn er methoden denkbaar om dergelijke gevoelige plekken op te sporen?
- Zijn er methoden om taluds met een geringe ingreep bestand te maken tegen instabiliteit bij golfoverslag?

Dat de aanwezigheid van lokale voorkomens die met traditionele grondonderzoeken met aan zekerheid grenzende kans niet zullen worden waargenomen tot een groot schadebeeld kan leiden zeker ook bij grotere toelaatbare overslag debieten is met de 1^{ste} infiltratieproef wel aangetoond. Hoe deze zandvoorkomens te kunnen opsporen kan van wezenlijk belang zijn bij de bepaling van de grote van versterkingen en of een dijktraject wel of niet versterkt moet worden. Hiervoor lijkt EM survey technieken geschikt. Echter dit is nog geen techniek die voor deze specifieke toepassing al is gekalibreerd en zondermeer van de plank beschikbaar is.

D. Voorbeeld hydraulische belastingniveaus

De geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud moet conform het WBI2017 gedetailleerd worden beoordeeld als het overslagdebiet groter is dan 0,1 l/s/m bij de norm trajectkans. Dit is een aanzienlijk hogere kans (minder streng) dan de doorsnede-eis voor gras erosie kruin en binnentalud welke bij het ontwerp kritisch overslagdebiet in het OI2014 wordt gebruikt. Het is duidelijk dat de kruinhoogte bij een ontwerp overslagdebiet van 0,1 l/s/m hoger zal zijn dan het hydraulische belastingniveau bij 0,1 l/s/m bij de norm, waardoor de geotechnische stabiliteit van de bekleding op het binnentalud conform het WBI2017 geen probleem zal zijn als gekozen wordt voor een ontwerp kruinhoogte bij 0,1 l/s/m.

Hoe dit uitpakt voor ontwerp overslagdebieten van 1, 5 of 10 l/s/m zal afhankelijk zijn van specifiek lokale omstandigheden. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat het hydraulisch belastingniveau van 0,1 l/s/m bij de norm lager ligt dan de ontwerp kruinhoogte bij een kritisch overslagdebiet van 1, 5 en of 10 l/s/m. In dat geval zal conform het WBI2017 de stabiliteit van de bekleding geen significante faalkans hebben, terwijl in het OI2014 wel een controle op de stabiliteit noodzakelijk is (zie paragraaf 4.2.2 en 4.3.1). In het kader van deze bureaustudie is één voorbeeld berekening gemaakt, waarbij dit effect overigens net niet optreedt. Er zit nog 1 cm tussen.



Figuur D.1 Dwarsprofiel als voorbeeld HBN berekening, Beusichemsdijk nabij Culemborg

Tabel D.1 Berekende hydraulische belastingniveaus, HBN (m NAP) bij verschillende kansen en bij verschillende overslagdebieten q (l/s/m)

q (l/s/m)	kans	HBN (m NAP)
0,1	norm (1/30.000)	8.49
1	norm (1/30.000)	8.21
0,1	dsn_eis (1/125.000)	8.80
1	dsn_eis (1/125.000)	8.48
10	dsn_eis (1/125.000)	8.29

Indien er sprake is van een golfoverslagdebiet groter dan 0,1 l/s/m bij de norm, dan wordt de gedetailleerde beoordeling uitgevoerd met de formules in bijlage D van de Schematiseringshandleiding Grasbekledingen van het WBI2017. Deze zijn grotendeels overgenomen uit het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, op enkele punten verbeterd en aangescherpt.

De waterspanningen in de dijk als gevolg van golfoverslag kunnen worden geschat met de methode in paragraaf 6.6.8 van de Schematiseringshandleiding Grasbekledingen en [Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, [32]. Net als bij de bepaling van de waterspanningen bij macrostabiliteit binnenwaarts kan in een toets op maat ook gebruik worden gemaakt van diverse software waarin grondwaterstroming als gevolg van golfoverslag kan worden gemodelleerd.

E. Uitwerking raamwerk functies en eisen

Onderstaand raamwerk is overgenomen uit het KPR memo 'UGT en BGT bij het ontwerpen van waterkeringen (discussiestuk)', referentie [25].

	Functie	Aspect	Ongewenste gebeurtenis	Gevolg	Criterium (praktische definitie grenstoestand)	Betrouwbaarheidseis	Mogelijke invloed op dimensies ontwerp
Functie Waterkeren	Waterkeren	Voorkomen van overstroming	Instroming van grote volumes water over of door de dijk	Overstroming	Overstromingsgevolgen cf. Grondslagen: - schade >10% van schadebedrag MKBA - >1% kans op 1 of meer dodelijke slachtoffers	Norm Per faalmechanisme uit te werken in eisen op doorsnedeniveau cf. OI2014	Alle aspecten
		Onderhoudbaarheid	Onderhoud niet goed mogelijk	Dijk wordt slecht onderhouden en voldoet mogelijk niet aan ontwerpspecificaties	N.t.b.	Taludhelling \geq 1:2,5 a 1:3 Kruinbreedte \geq 3 m Onderhoudspaden n.t.b.	Kruinbreedte, taludhellingen, onderhoudspaden
		Inspecteerbaarheid	Inspectie niet mogelijk	Verschijnselen die horen bij begin van faalproces worden niet opgemerkt, ingrijpen niet mogelijk	$q_{\text{overslag}} > 1\text{-}5 \text{ l/s/m}$	10-100 x Norm	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
		Wateroverlast	Overschrijden kombergend vermogen in achterland	Schade door wateroverlast	Waterdiepte > 0,10 m in één gebied/buurt volgens CBS wijk- en buurtkaart cf. Grondslagen	1/50 per jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
		Zoutbezwaar	Groot overslagdebiet in kustgebieden	Schade aan areaal door hoge concentratie zout in boezemwater (zoutbezwaar)	Gemiddeld chloridegehalte in achterliggend watersysteem: > 2000 mg/l (25% verlies) > 4000 mg/l (50% verlies) > 10.000 mg/l (100% verlies)	1/50 per jaar 1/100 per jaar 1/200 per jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
Overige functies	Faciliteren weg- / railinfrastructuur	Beschikbaarheid weg- / railinfrastructuur	Water en vuil op weg door groot overslagdebiet	Infrastructuur tijdelijk niet beschikbaar	$q_{\text{overslag}} > 1 \text{ l/s/m}$	snelweg: 1/50 per jaar provinciale weg: 1/25 per jaar regionale weg: 1/10 per jaar railinfrastructuur: 1/50 per jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
	Faciliteren wonen	Standzekerheid	Schade aan woningen door vervormingen dijklichaam	Woningen tijdelijk niet beschikbaar / herstel schade	Afhankelijk van specifieke situatie	Schade: 1/25 jaar Niet-beschikbaarheid: 1/50 jaar	Taludhelling binnentalud, stabiliteitsberm, constructieve voorziening
	Faciliteren kabels en leidingen	Standzekerheid	Schade aan kabels en leidingen door vervormingen dijklichaam	Nutsvoorziening tijdelijk niet beschikbaar	Afhankelijk van specifieke situatie	Huisaansluitingen: 1/10 jaar Regionale K&L: 1/25 jaar Landelijke K&L: 1/100 jaar	Taludhelling binnentalud, stabiliteitsberm, constructieve voorziening
	Faciliteren recreatie	Beschikbaarheid fiets- en wandelpaden	Water en vuil op paden door groot overslagdebiet	Fiets- en wandelpaden niet beschikbaar	$q_{\text{overslag}} > 1 \text{ l/s/m}$	1/1 jaar	Hoogte, taludhelling buitentalud, ruwheid bekleding
	Faciliteren LNC-waarden	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.	N.t.b.

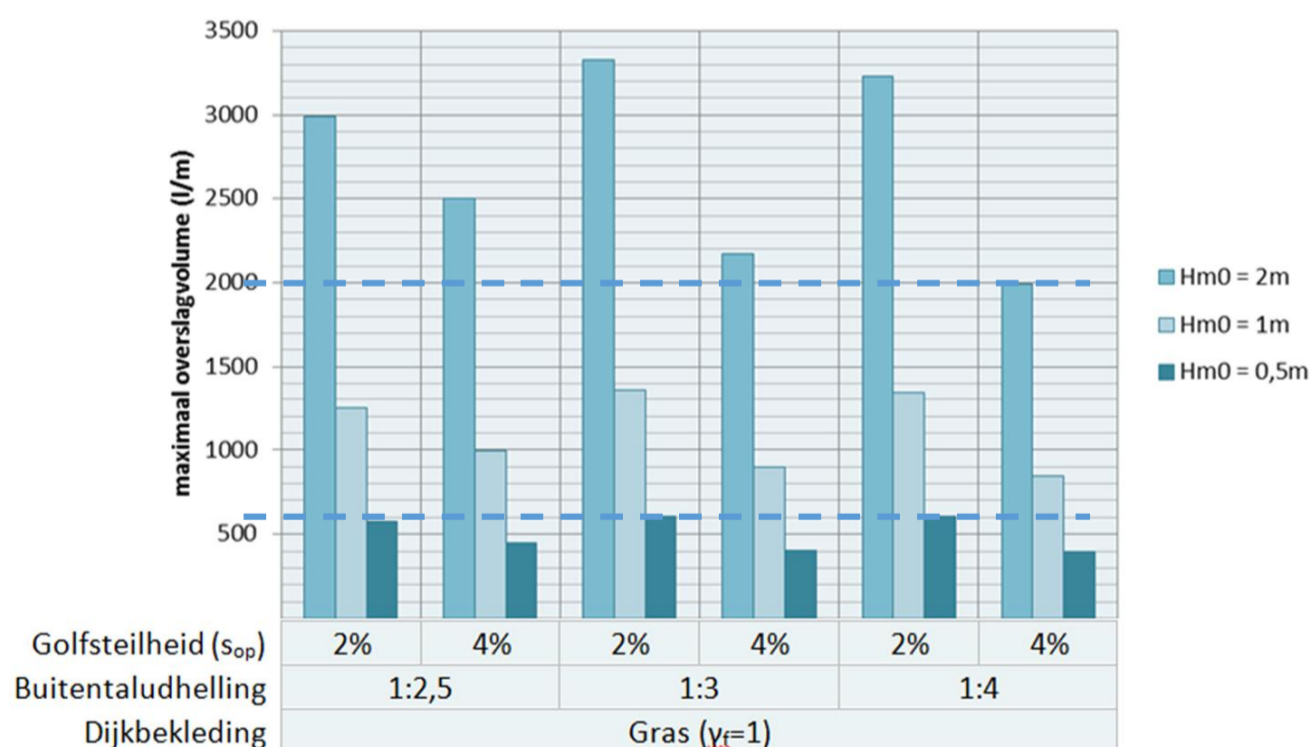
F. Rekenvoorbeeld kruinhoogtereductie bij maximaal overslagdebiet met betrekking tot begaanbaarheid van de dijk

Deze bijlage geeft een voorbeeld van de mogelijke kruinhoogtereductie wanneer er zwaardere golfoverslagcondities worden toegestaan en er rekening gehouden dient te worden met de begaanbaarheid van de dijk. Dit voorbeeld gaat uit van het meest extreme geval waarbij de betrouwbaarheidseis gelijk is aan de overstromingskansnorm voor de primaire waterkerende functie van de dijk. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer een dijk ook als evacuatie-route fungeert. In dit geval kan de begaanbaarheid van de dijk bepalend worden voor het maximaal toelaatbare gemiddelde overslagdebiet en wordt de mogelijke kruinhoogtereductie beperkt.

Wanneer de betrouwbaarheidseisen voor de begaanbaarheid van de dijk minder streng zijn dan de overstromingskansnormen, zal de begaanbaarheid van de dijk minder beperkend zijn voor de mogelijke kruinhoogtereductie. De mogelijke kruinhoogtereductie zal dan tussen dit voorbeeld en het voorbeeld uit Hoofdstuk 2 liggen.

F.1 Maximaal overslagvolume bij een overslagdebiet van 5 l/s/m en 10 l/s/m

Om een indicatie te geven van de toegankelijkheid van een dijk wanneer er een overslagdebiet van respectievelijk 5 l/s/m en 10 l/s/m wordt toegestaan geven Figuur F.1 en Figuur F.2 het maximaal overslagvolume voor dezelfde dijk geometrieën en golfcondities als eerder gebruikt in Hoofdstuk 2 en een stormduur van 6 uur.

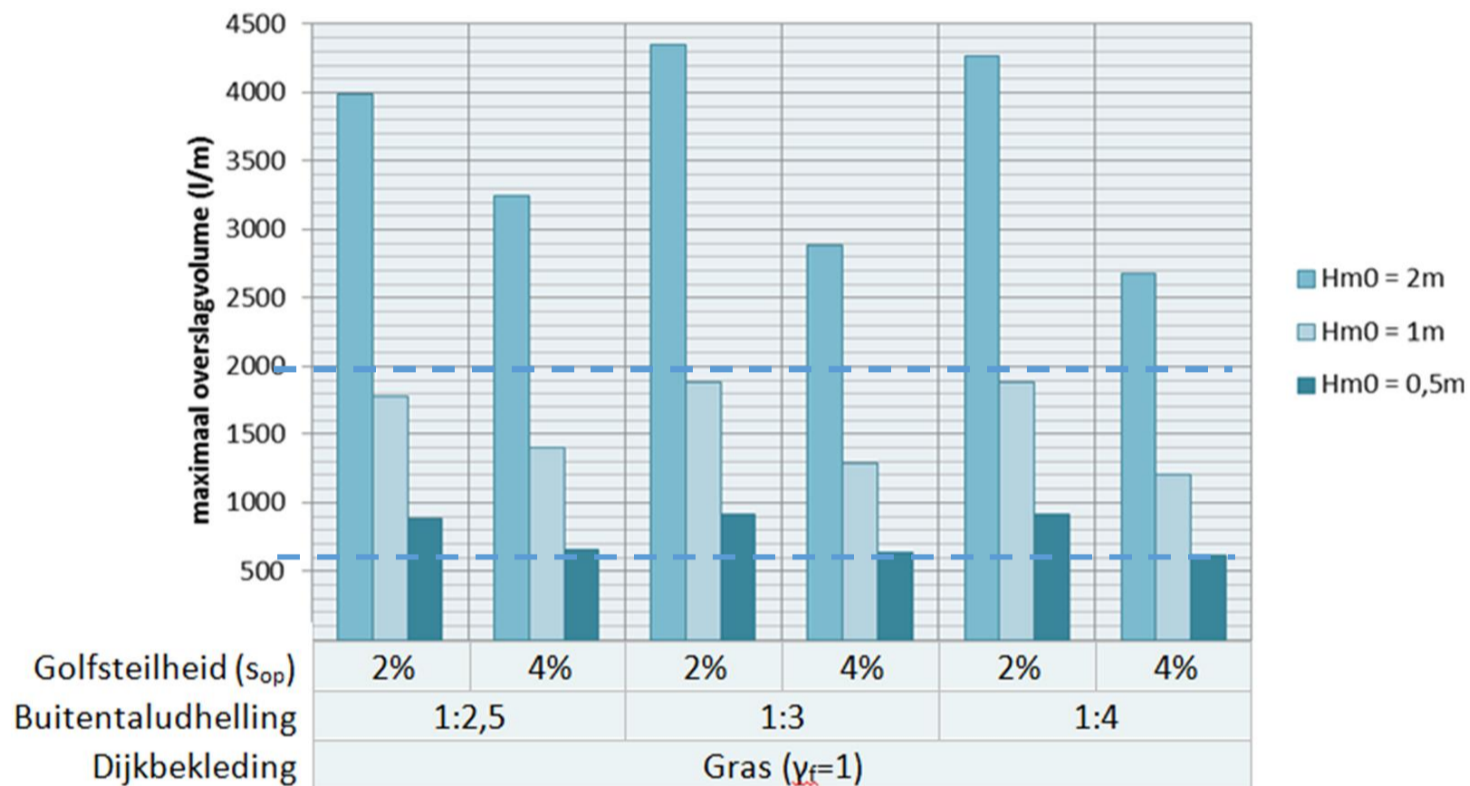


Figuur F.1 Maximaal overslagvolume bij een gemiddeld overslagdebiet van 5 l/s/m (stormduur van 6 uur)

Zoals te zien is Figuur F.1 en Figuur F.2 is het maximaal overslagvolume sterk afhankelijk van de golfhoogte. Daarnaast zijn ook de golfsteilheid en de geometrie van de dijk van invloed. Wanneer een gemiddeld golfoverslagdebiet van 5 l/s/m wordt toegestaan is de dijk niet meer toegankelijk voor personen als de maatgevende golfcondities een hogere significante golfhoogte hebben dan 0,5 m. Voor voertuigen is de dijk niet meer toegankelijk

wanneer de maatgevende golfcondities een hogere significante golfhoogte hebben dan orde 1,5 - 2 m.

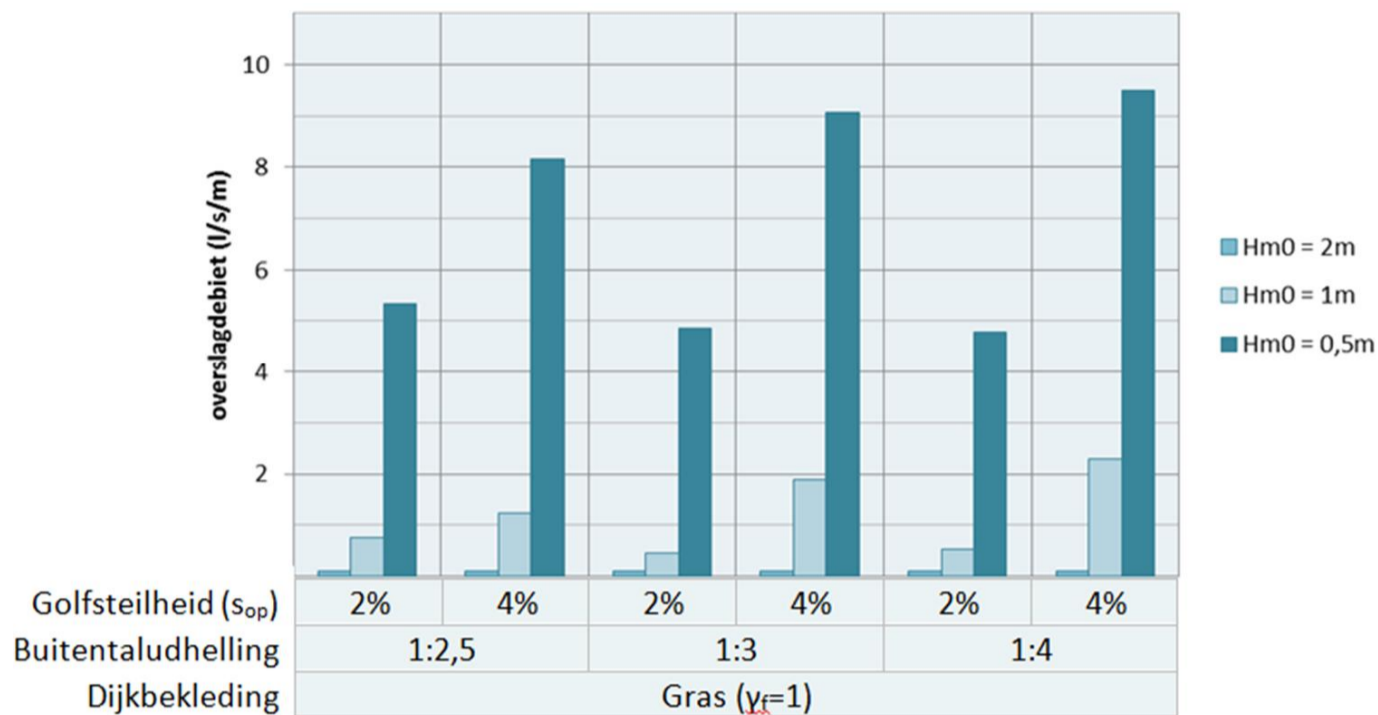
Wanneer een gemiddeld golfoverslagdebiet van 10 l/s/m wordt toegestaan is de dijk niet meer toegankelijk voor personen als de maatgevende golfcondities een hogere significante golfhoogte hebben dan orde 0,5 m. Voor voertuigen is de dijk niet meer toegankelijk wanneer de maatgevende golfcondities een hogere significante golfhoogte hebben dan orde 1 m.



Figuur F.2 Maximaal overslagvolume bij een gemiddeld overslagdebiet van 10 l/s/m (stormduur van 6 uur)

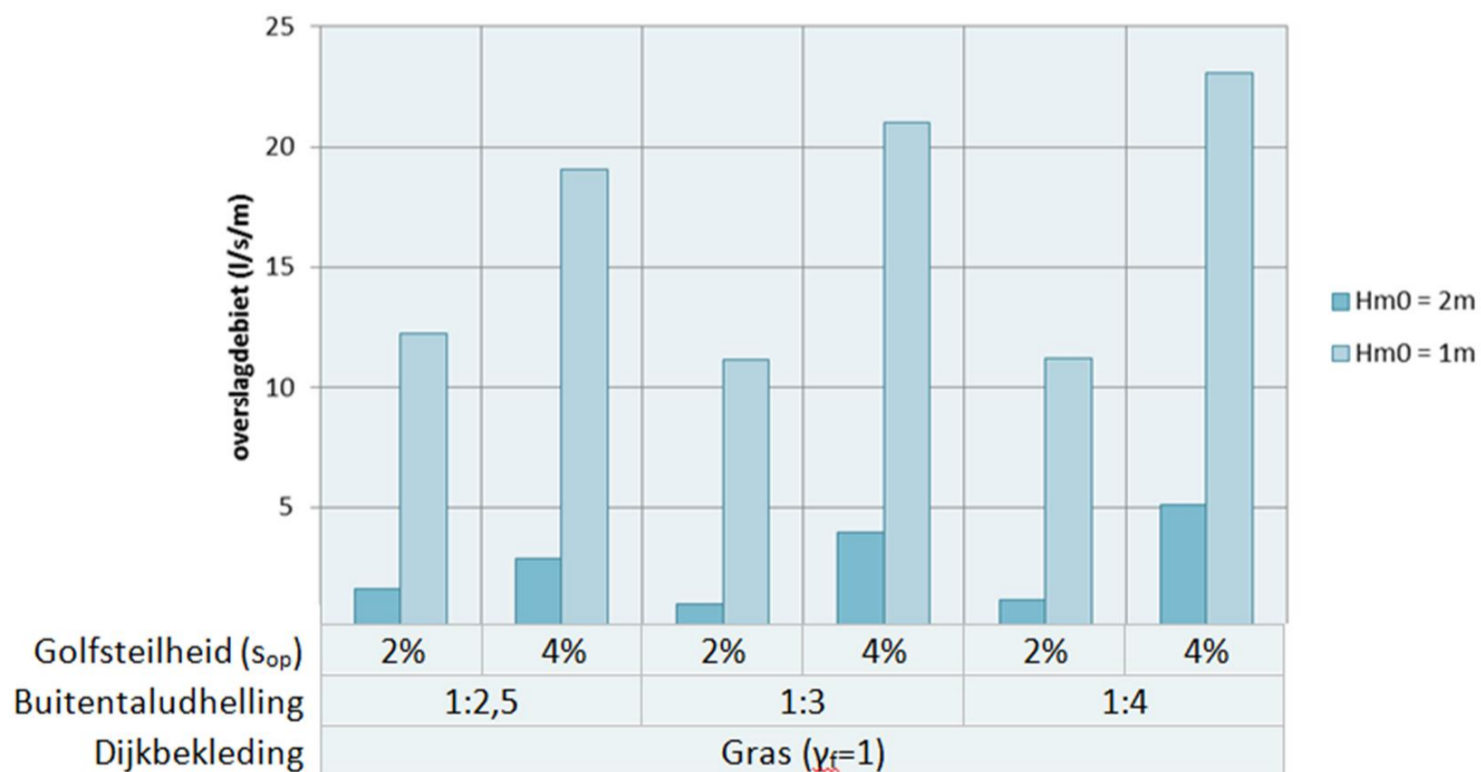
F.2 Kruinhoogte bij toegankelijkheidseis van de dijk

Wanneer het een vereiste is dat de dijk begaanbaar moet blijven voor personen tijdens de maatgevende condities voor de overstromingskansnorm is een indicatie van het maximale gemiddelde overslagdebiet wat kan worden toegestaan weergegeven in Figuur F.3. Wanneer alleen de toegankelijkheid van voertuigen vereist is, is een indicatie van het maximaal toelaatbare gemiddelde overslagdebiet weergegeven in Figuur F.4. De figuren geven de overslagdebieten voor dezelfde dijk geometrieën en golfcondities als eerder gebruikt in Hoofdstuk 2.



Figuur F.3 Maximaal gemiddeld overslagdebiet waarbij personen de dijk nog kunnen betreden (maximaal overslagvolume van 600 l/m bij een stormduur van 6 uur)

In Figuur F.3 is te zien dat bij golfcondities met een significante golfhoogte van 2 m, de kruinhoogte van de dijk zodanig hoog moet zijn dat het gemiddeld overslagdebiet maximaal orde 0,1 l/m/s is wanneer personen veilig de dijk moeten kunnen betreden. Bij golfcondities met een significante golfhoogte van 1 m moet de kruinhoogte zodanig zijn dat het maximaal gemiddeld golfoverslagdebiet orde 0,5-2 l/s/m is. Bij een significante golfhoogte van 0,5 m is de dijk echter nog wel begaanbaar voor personen bij een maximaal gemiddeld overslagdebiet van ongeveer 5 l/s/m.



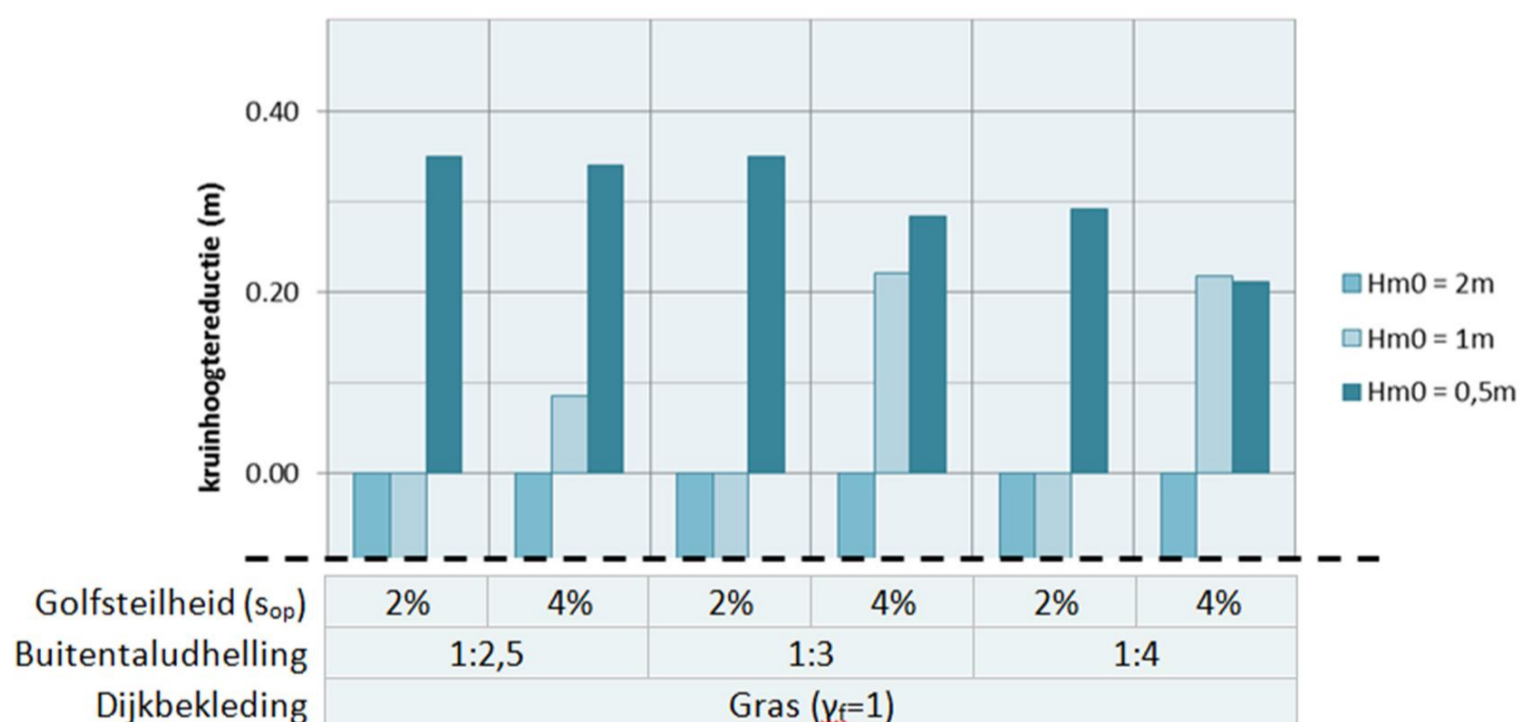
Figuur F.4 Maximaal gemiddeld overslagdebiet waarbij voertuigen de dijk nog kunnen betreden (maximaal overslagvolume van 2000 l/m bij een stormduur van 6 uur)

Wanneer het voldoende is om alleen voertuigen toe te laten op de dijk kan een lagere kruinhoogte van de dijk volstaan met grotere gemiddelde overslagdebieten. Figuur F.4 laat zien dat wanneer de maatgevende golfcondities een significante golfhoogte van 1 m of lager

hebben de dijk nog steeds begaanbaar is voor voertuigen bij een kruinhoogte zodanig dat het gemiddeld overslagdebiet 10 l/s/m is. Bij hogere golven, zoals de golfcondities met een significante golfhoogte 2 m, is het maximaal toelaatbare gemiddelde overslagdebiet lager (orde 1-5 l/s/m) wanneer de dijk begaanbaar moet blijven voor voertuigen.

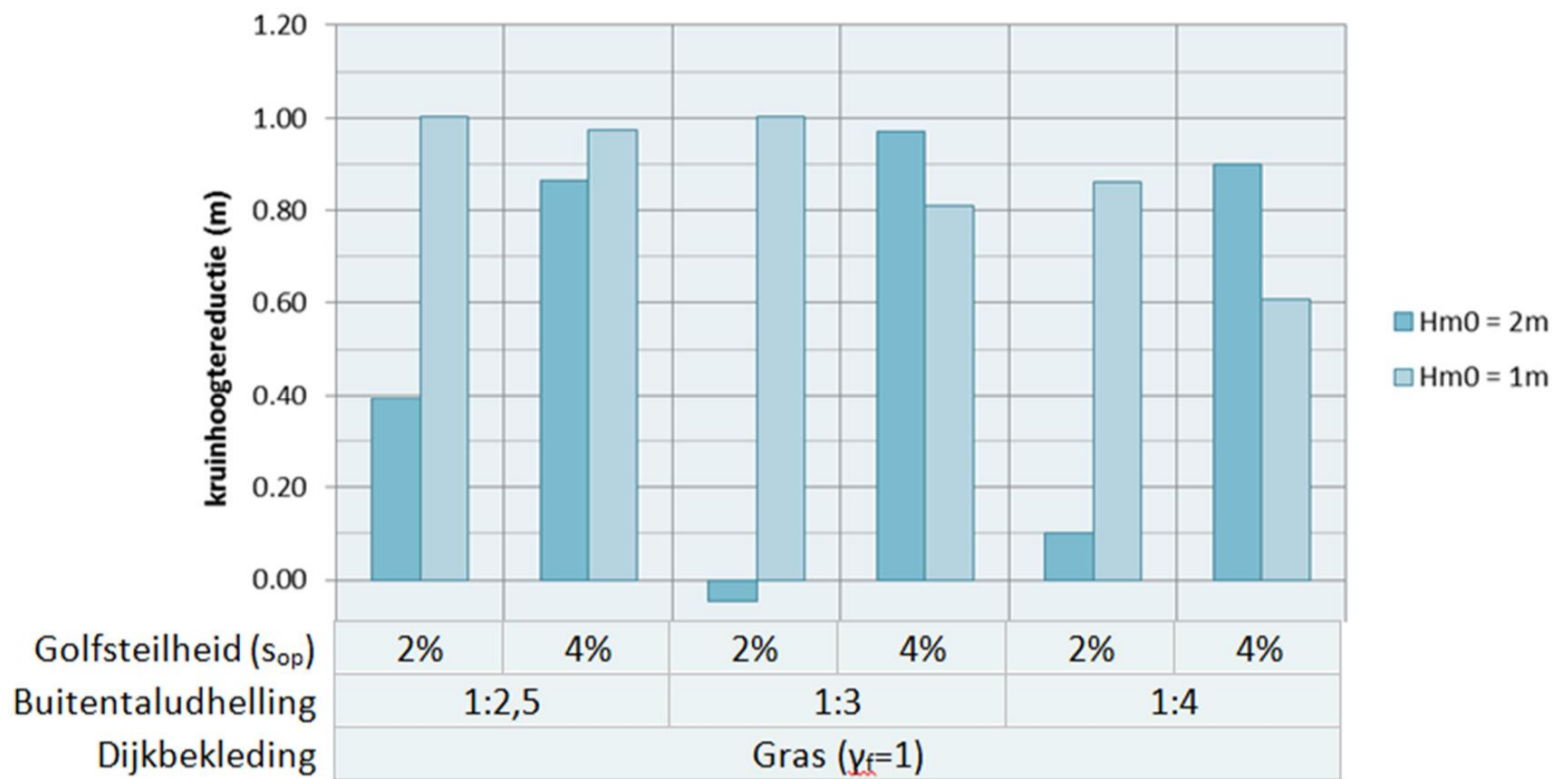
Dit betekent dat wanneer er een begaanbaarheidseis is voor personen en/of voertuigen op de dijk, de kruinhoogtereductie zoals gegeven in Hoofdstuk 2 wordt begrensd. De reductie in kruinhoogte die mogelijk is als het toelaatbare overslagdebiet wordt verhoogd naar 5 l/s/m of het maximaal toelaatbare debiet met betrekking tot de begaanbaarheidseis voor personen (het kleinste debiet van beide) is weergegeven in Figuur F.5. Een negatieve reductie in kruinhoogte betekent dat de dijk al niet meer begaanbaar is voor personen bij een gemiddeld overslagdebiet van 1 l/s/m (het referentiedebiet).

Uit Figuur F.5 blijkt dat er nog een kruinhoogtereductie mogelijk is in de orde van 0,1 – 0,35 m, wanneer de maatgevende golfcondities een relatief lage significante golfhoogte hebben (lager dan orde 1 m) en een relatief grote golfsteilheid (orde 4%). Gezien deze condities kenmerkend zijn voor rivierdijken, geeft dit aan dat het mogelijk is om de kruinhoogte van rivierdijken te verlagen door een hoger overslagdebiet toe te staan zonder het verlies van begaanbaarheid van de dijk voor personen (en voertuigen).



Figuur F.5 Reductie in benodigde kruinhoogte bij verhogen van het gemiddeld overslagdebiet van 1 l/s/m naar maximaal 5 l/s/m rekening houdend met begaanbaarheidseis personen (maximaal overslagvolume van 600 l/m bij een stormduur van 6 uur)

De reductie in kruinhoogte die mogelijk is als het toelaatbare overslagdebiet wordt verhoogd naar 10 l/s/m of het maximaal toelaatbare debiet met betrekking tot de begaanbaarheidseis voor voertuigen (het kleinste debiet van beide) is weergegeven in Figuur F.6. Een negatieve reductie in kruinhoogte betekent dat de dijk al niet meer begaanbaar is voor voertuigen bij een gemiddeld overslagdebiet van 1 l/s/m (het referentiedebiet).



Figuur F.6 Reductie in benodigde kruinhoogte bij verhogen van het gemiddeld overslagdebiet van 1 l/s/m naar maximaal 10 l/s/m rekening houdend met begaanbaarheidseis voertuigen (maximaal overslagvolume van 2000 l/m bij een stormduur van 6 uur)

Uit Figuur F.6 blijkt dat er nog een kruinhoogtereductie mogelijk is tot 1 m, wanneer de maatgevende golfcondities een significante golfhoogte lager dan 2 m hebben. Gezien kenmerkende golfcondities voor overslag bij zee- en rivierdijken hier doorgans binnen vallen, geeft dit aan dat het mogelijk is om de kruinhoogte van zee- en rivierdijken te verlagen door een hoger overslagdebiet toe te staan zonder het verlies van begaanbaarheid van de dijk voor voertuigen (niet noodzakelijk ook begaanbaar voor personen).

G. Eisen aan de uiterste grenstoestand en bruikbaarheidsgrenstoestand bij dijken met stabiliteitsverhogende constructieve elementen

G.1 Inleiding

In deze bijlage wordt achtergrondinformatie gegeven over de eisen die worden gesteld aan dijken met stabiliteitsverhogende constructieve elementen. Stabiliteitsverhogende constructies zijn bijvoorbeeld diepwanden en damwanden. Deze constructies worden toegepast wanneer de binnenwaarts macrostabiliteit onvoldoende is en er bijvoorbeeld weinig ruimte is voor oplossingen in grond. De constructies bevinden zich vaak in de binnenteen of binnenkruin van de dijk om hier de kruin dan wel de kruin en het binnentalud te ondersteunen. De hoogte van de dijk wordt in dit geval niet door de constructie verzorgd, maar door het grondlichaam. Er vinden op dit moment ontwikkelingen plaats ten aanzien van de te stellen eisen in de uiterste grenstoestand (UGT) en de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT).

De eisen komen voort uit de Waterwet met de achterliggende Grondslagen voor Hoogwaterbescherming [19]. Naar aanleiding van vragen vanuit de POVM en een juridische studie wordt in de herziene druk van de Grondslagen van november 2017 gesteld dat deze constructies eveneens moeten voldoen aan het Bouwbesluit en de Eurocode. Dit kan gevolgen hebben voor de benodigde sterkte en stijfheid van de constructie, omdat deze eisen op sommige punten, met name vervorming, strenger kunnen zijn dan volgt uit de Waterwet.

Opgemerkt wordt dat ook bij groene dijken eisen kunnen worden gesteld ten aanzien van de bruikbaarheidsgrenstoestand. Deze eisen zijn niet herleidbaar vanuit de Waterwet, maar komen voort uit eisen ten aanzien van wateroverlast, zoutbezwaar en begaanbaarheid/inspecteerbaarheid en vanuit nevenfuncties van de waterkering,. Over eisen aanvullend op die uit de Waterwet is een KPR –Factsheet geschreven: ‘UGT en BGT bij het ontwerpen van waterkeringen (discussiestuk)’ [26] (KPR = Kennisplatform Risicobenadering). Uit het POVM Rekentechnieken onderzoek [37] blijkt dat de vervormingen bij groene dijken tijdens hoogwater relatief beperkt blijven, waardoor vervormingseisen voor de BGT waarschijnlijk niet maatgevend zijn ten opzichte van de eisen uit de UGT, zoals dit bij stabiliteitsverhogende langsconstructies wel het geval kan zijn.

In dit hoofdstuk wordt gekeken in hoeverre de keuze van de kruinhoogte van invloed is op de uitwerking van de gestelde eisen tot een ontwerp van stabiliteitsverhogende langsconstructies. Achtereenvolgens wordt beschreven hoe hiermee wordt omgegaan in WBI, OI2014 en welke ontwikkeling er op dit moment nog gaande is.

G.2 WBI2017

De hoogte van dijken met stabiliteitsverhogende langsconstructies, waarbij de hoogte wordt verzorgd door het grondlichaam, wordt getoetst conform die van een groene dijk, via het spoor gras erosie kruin en binnentalud.

Voor de beoordeling van de stabiliteit en stijfheid van de stabiliteitsverhogende langsconstructies wordt verwezen naar de ontwerprichtlijnen van Deltares voor langsconstructies [1]: OSPW = Ontwerp Stabiliteitsschermen in Primaire Waterkeringen en

[7]. In deze documenten komt de ontwerphoogte of het ontwerp golfoverslagdebiet niet aan bod. Wel worden eisen gesteld aan de vervorming leidend tot kruindaling. Bij het belasten van de constructie bij een hoge waterstand, zal de constructie richting de polder uitbuigen dan wel enigszins kantelen. Deze vervorming richting de polder zorgt dus voor een horizontale verplaatsing van de constructie en het grondlichaam, maar ook voor een verticale verplaatsing van de kruin die in de richting van de uitbuigende constructie nazakt. Eisen hierover, overgenomen uit [37]:

- “BGT” vervormingseisen. Volgens § 5.1.3 van de OSPW [1] worden voorlopige vervormingseisen gesteld aan de kruinzakking (over een breedte van minimaal 3 meter) en aan de horizontale verplaatsing van een onverankerde langsconstructie. Dit vindt plaats bij maatgevende omstandigheden voor het stijghoogteverloop en bij karakteristieke waarden voor de grondsterkte (in de OSPW benoemd als “BGT”). Voor zowel verticale kruinverplaatsing als horizontale damwandverplaatsing is de eis: minder 0,1m.
- UGT vervormingseis. Aanvullend wordt voor een onverankerde damwand bij UGT (gereduceerde grondsterkte) als voorlopige eis een maximaal toelaatbare horizontale vervorming van 2 % van de damwandlengte voorgeschreven, met een maximum van 0,5m.

De gevolgen van de uitbuiging van de constructie en de vervormingen van de dijk op de bekleding en de zakking van de kruin op het overslagdebiet worden niet expliciet in rekening gebracht. Het is niet denkbeeldig dat de bekleding bij deze uitbuiging rondom overgangen tussen het grondlichaam en de constructie gescheurd zal zijn. Ook een kruindaling van 0,1 m kan de kans op golfoverslag in gevallen met een kleine decimeringshoogte mogelijk significant beïnvloeden.

Damwanden worden vaak geplaatst langs de binnenkruin van de dijk, waarbij de stabiliteit van het binnentalud, dat niet wordt gesteund door de wand, onder de norm is. Er bij de beoordeling van de constructie vanuit gegaan dat dit talud onder maatgevende omstandigheden afschuift, waardoor er aan de binnenzijde van de wand een beperkte grondhoogte aanwezig is, namelijk 1/3 van de kerende hoogte. Hiermee wordt zowel de afschuiving verdisconteerd, als de afgenomen schuifsterkte van de afgeschoven grond (zogenaamde remolded strength). Door de afschuiving is er aan de binnenkant van de wand geen sprake meer van een bekleding, waardoor dit profiel gevoelig kan zijn voor erosie door golfoverslag. Hier wordt niet expliciet rekening mee gehouden.

G.3 OI2014v4

In het OI2014v 4 wordt in aanvulling op het WBI2017 aangegeven hoe moet worden omgegaan met de ontwerp-kruinhoogte en het bijbehorende golfoverslagdebiet en de geotechnische stabiliteit van het binnentalud. Dit is beschreven in paragraaf 4.2.2 en 4.3.1.

Verder wordt verwezen naar dezelfde documenten als bij het WBI, namelijk de OSPW [1] en [7].

De eisen aan vervormingen worden in het OI2014v4 expliciet genoemd. De kruinzakking dient tot maximaal 0,10 m te worden beperkt, evenals de horizontale verplaatsing van een onverankerde constructie ($\leq 0,10$ m) en de horizontale vervorming van de constructie (\leq

1/50-L in UGT) onder invloed van de ontwerpbelastingen. Deze eisen komen overeen met die in het OSPW.

Evenals in het WBI2017 wordt niet expliciet ingegaan op de gevolgen van deze vervormingen voor de bekleding en het golfoverslagdebiet.

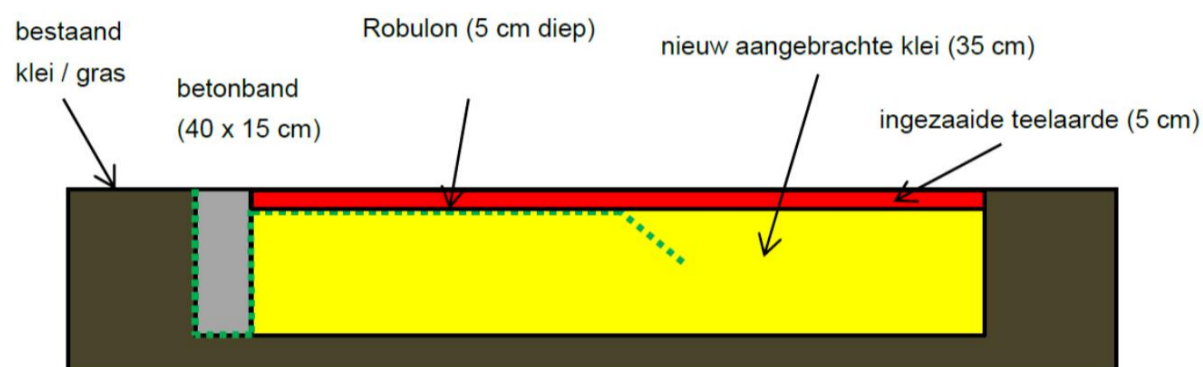
G.4 Ontwikkeling POVM Rekentechnieken

Binnen de POVM Rekentechnieken wordt onderzoek gedaan naar het gebruik van de Eindige Elementenmethode voor het berekenen van de stabiliteit en vervormingen van stabiliteitsverhogende constructies. In het kader hiervan wordt ook een voorstel gedaan voor te stellen eisen, waarbij de wettelijke kaders worden beschouwd [37]. Het voorstel houdt enerzijds vast aan de vervormingseis zoals eveneens is aangehouden in [1], WBI en OI2014v4, namelijk een horizontale uitbuiging van maximaal 0,1 m en een verticale kruindaling van maximaal 0,1 m over 3 m.

Bijlage B uit [37] geeft daarnaast handvatten om te ontwerpen op grotere vervormingen, waarbij expliciet rekening wordt gehouden met de effecten van de vervormingen op de bekleding en golfoverslag en daarmee op de kruinhoogte. Deze mogelijke verruiming van de vervormingseisen geeft echter alleen invulling aan de eisen die voortkomen uit de Waterwet.

H. Impressie pilotproject met versterkte overgangsconstructies

Mogelijkerwijs kunnen overgangen worden versterkt. Hiermee is in de praktijk nog weinig ervaring opgedaan. In het kader van een onderzoekstraject zijn er in 2016 en 2017 verschillende kunstmatige overgangen in een dijkbekleding op het binnentalud van de waddenzeedijk aangelegd. Deze kunstmatige overgangen bestaan uit ingegraven betonbanden in de dijkbekleding waardoor een overgang ontstaat tussen een 'hard lijnobject' en de grasbekleding. In dat project zijn er verschillende van deze overgangen versterkt met doorgroeibare textielen of verborgen bekledingen. Een impressie van dat onderzoek is weergegeven in de onderstaande figuren. Voor meer informatie over dit pilotproject wordt verwezen naar Deltares (2016, 2017, [10], [11]).



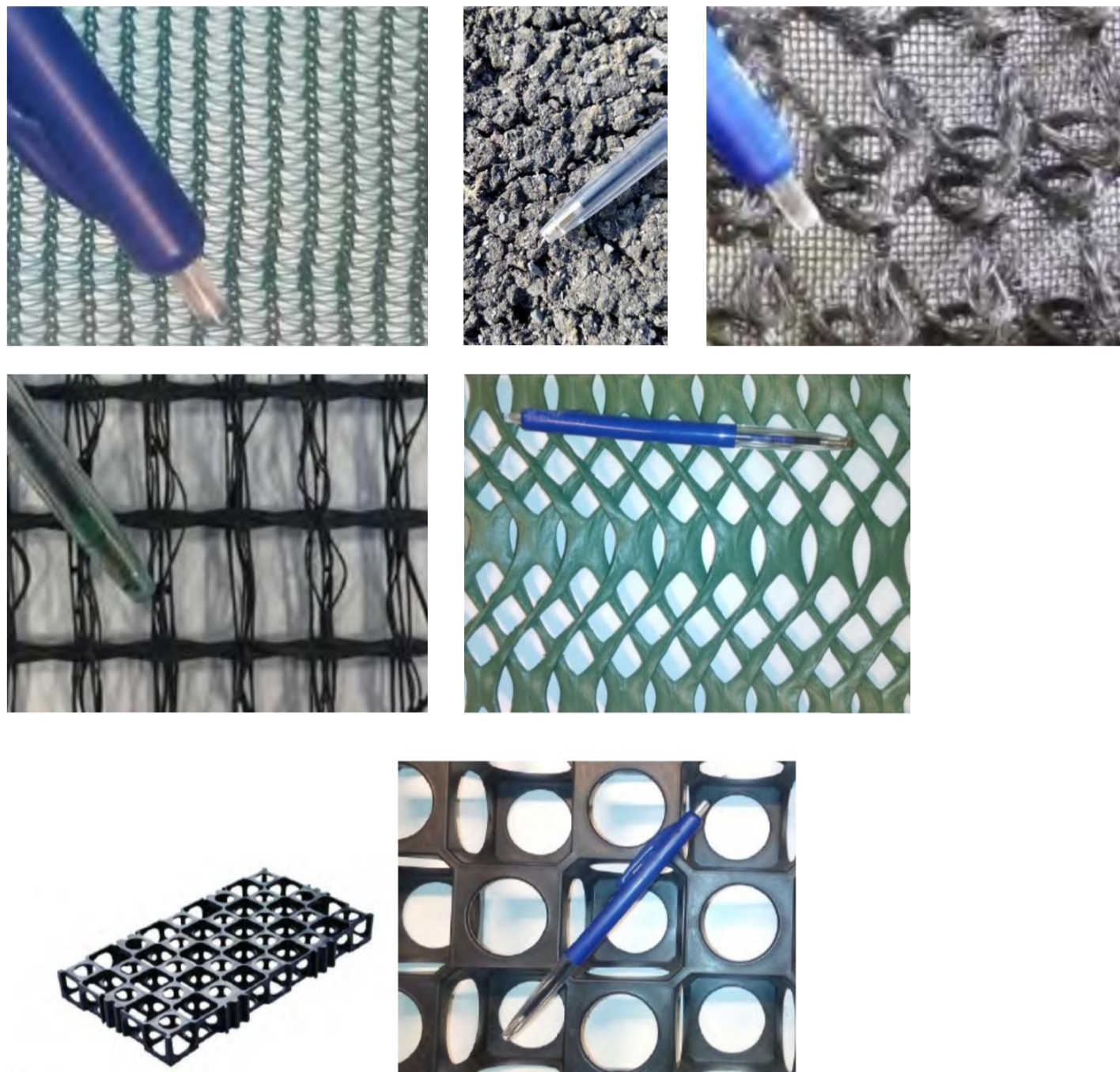
Figuur H.1 Schematische weergave van de testopstelling op de Waddenzeedijk (in het hier gegeven voorbeeld is 'Robulon' het doorgroeibare textiel, er zijn echter meerdere opstellingen met meerdere typen versterkingsmaatregelen aangelegd).



Figuur H.2 Impressie van aangebrachte doorgroeibare materialen in de pilotsectie op het binnentalud van de Waddenzeedijk ([10], [11])



Figuur H.3 Impressie van aanleg pilotsecties met verticale overgangen. Hierna dient het gras hier doorheen te groeien ([10], [11])



Figuur H.4 Impressie van gebruikte doorgroeibare materialen ([10], [11])



Figuur H.5 Impressie van horizontale overgangen (links) en een deel van de verticale overgangen (rechts) circa een jaar na aanleg. De doorgroeitextielen zijn nu niet meer zichtbaar vanwege de al enigszins ontwikkelde grasmatt ([10], [11])

Hoewel de aangelegde versterkingsmaatregelen veelbelovend lijken dient opgemerkt te worden dat deze nog niet onder een hydraulische belasting zijn getest. In de komende jaren worden de versterkingen gemonitord en mogelijk hydraulisch getest met behulp van een golfoverslagsimulator, golfoploopsimulator of Deltagoot (zie Figuur H.6).



Figuur H.6 Impressie van de golfoploosimulator (links), de golfoverslagsimulator (midden) en de Deltagoot (rechts)

I. Overgangen: op- en afritten

I.1 Inleiding

Op- en afritten op het binnentalud verdienen aandacht in het ontwerpproces. Een op/afrit kan een verkeerskundige functie hebben (waarbij de weg de dijk op loopt). Dit type oprit is veelal uitgevoerd in asfalt en soms in klinkers of doorgroeistenen. Tevens zijn er op- en afritten voor grasbeheer of calamiteiten. Deze zijn vaak in grasbetontegels uitgevoerd.

I.2 Bezwijkmechanismen

Een oprit zal veelal tientallen meters lang zijn. Het is denkbaar dat het overslaande water langs de oprit zal stromen (in plaats van dwars over de oprit). Als voorbeeld wordt een denkbeeldige oprit met een lengte van 50 m genomen en een situatie waarbij het golfoverslagdebiet gelijk is aan 10 l/s/m. Indien het water langs de oprit afstroomt dan zal aan de onderzijde van de oprit een debiet optreden van (10 l/s/m x 50 m =) 500 liter per seconde. Dit is een aanzienlijk debiet wat tot schade kan leiden aan het binnentalud.

Daarnaast zijn er bij de op- en afrit verschillende overgangen. Zo is er een knik aan beide zijden van de oprit en is er een overgang van de grasbekleding naar de oprit zelf aan beide zijden van de oprit. Dit zijn belangrijke aandachtspunten welke worden behandeld in Paragraaf 5.3.1 en Bijlage J.

I.3 Oplossingsrichtingen

In de vorige paragraaf zijn twee bezwijkmechanismen benoemd: afstromen van overslaand water langs de oprit en de verschillende overgangen tussen de oprit en de bekleding aan weerszijden van de oprit. Oplossingsrichtingen voor de laatstgenoemde overgangen worden beschreven in Paragraaf 5.3.1 en Bijlage J (Wegen). Oplossingsrichtingen voor het afstromen worden hieronder beschreven. Dit wordt gedaan aan de hand van een generiek voorbeeld met de volgende condities:

- Maatgevende significante golfhoogte: $H_{m0} = 1$ m.
- Maatgevende spectrale golfperiode $T_{m-1,0} = 4$ s (resulterende in een golfsteilheid van $s_{m-1,0} = 0.04$ en een gemiddelde golfperiode van $T_m = 3,66$ s).
- Buitentalud met 1:3 helling bestaande uit gras of een ander relatief glad materiaal (invloedsfactor voor ruwheid is gelijk aan $\gamma_f = 1,0$).
- Toegestaan golfoverslagdebiet van $q = 10$ l/s/m. Hieruit volgt (door middel van gebruikmaking van het programma PC-Overslag) een benodigde kruinhoogte van 1,59 m ten opzichte van de beschouwde stilwaterlijn.

Oplossingsrichting 1: niet toestaan van de oprit.

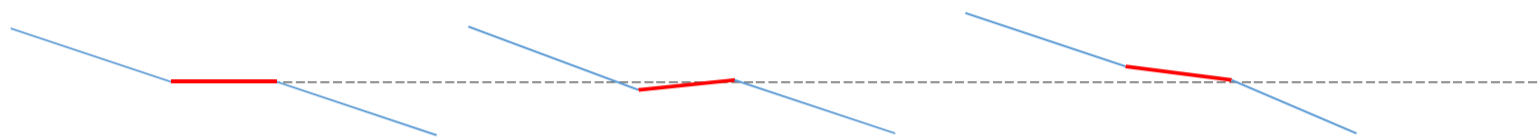
Er kan worden overwogen om de eis met betrekking tot de minimale onderlinge afstanden van de onderhoudspaden te verruimen (bijvoorbeeld iedere kilometer in plaats van iedere 500 meter).

Oplossingsrichting 2: lokaal verhogen van de kruinhoogte ter plaatse van de oprit.

Indien wordt gekozen voor een toegestaan golfoverslagdebiet van 0,1 l/s/m of 1 l/s/m in plaats van 10 l/s/m als uitgangspunt, dan dient in het gegeven voorbeeld de kruin ter plaatse van de oprit verhoogd te worden met respectievelijk 1,78 m en 0,89 m.

Oplossingsrichting 3a: ontwerp zodanig dat water dwars over de oprit stroomt

Het ontwerp dient zodanig te zijn dat het water niet langs de oprit zal afstromen. Dit is geïllustreerd in Figuur I.1. De oprit dient dus altijd een minimaal verval (ook na zetting, klink et cetera in de planperiode) te hebben zodat het water dwars op de oprit afstroomt. In dit geval dient de oprit gezien te worden als een aaneensluiting van overgangen (doorgaans twee knikken, een overgang van gras naar de oprit en een overgang van de oprit naar het gras). Iedere individuele overgang dient in het ontwerp te worden beschouwd (zie Paragraaf 5.3.1 en Bijlage J waarin wegen worden behandeld).

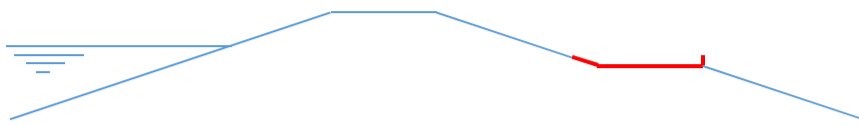


Figuur I.1: doorsnede van oprit zonder verval (links) met negatief verval waardoor het water langs de oprit zal afstroming (midden) en met positief verval waardoor het water dwars over de oprit zal afstromen (rechts)

Oplossingsrichting 3b: afvoeren overslaande water in geul langs de oprit.

Het gemiddelde golfoverslagdebiet wordt gevormd door de individuele overslaande golven. Hier zijn kleine en grote volumes aanwezig. Uit de berekening met het eerder gegeven voorbeeld blijkt dat 31% van de golven over de kruin slaat. 10% van de golven heeft een golfoverslagvolume welke groter is dan 300 liter per meter (per golf) en 1% van de golven heeft een golfoverslagvolume welke groter is dan 750 liter per meter (per golf). Stel dat de 1% waarde als uitgangspunt wordt genomen: in dit geval dient de afvoergeul een buffercapaciteit te hebben van $0,75 \text{ m}^3/\text{m}$. Een dergelijke geul zou bijvoorbeeld een afmeting kunnen hebben van 2 meter breed en 0,40 m diep. Er kan overwogen worden om het ontwerp van de afvoergeul te integreren met het ontwerp van de weg op de oprit (de weg zelf wordt dan de afvoergeul). Aangenomen dat de weg een breedte van 5 m heeft, dan is de benodigde effectieve hoogte van de afvoergeul in theorie gelijk aan 0,15 m. Bij dergelijke afmetingen dient wel, middels nader onderzoek, uitgesloten te worden dat het water over deze geul heen stroomt en dat de afvoercapaciteit van de afvoergeul groot genoeg is. Een schematische weergave van een dergelijke geul is weergegeven in Figuur I.2.

Het idee van dergelijke geulen is niet nieuw. In een eerder (afstudeer)onderzoek ([40]) is de effectiviteit van een geul op de kruin van een dijk beschouwd. In dat onderzoek, waarin een numeriek model is geverifieerd aan de hand van golfgootproeven, zijn twijfels geplaatst bij de effectiviteit van een dergelijke geul omdat zowel de geul als de benodigde afvoercapaciteit relatief groot moest zijn. Indien de afvoergeul integraal met de weg kan worden ontworpen is het echter denkbaar dat dit een effectieve maatregel kan zijn. Daarbij dient wel te worden beseft dat deze weg dan niet meer toegankelijk is onder omstandigheden waarbij er overslag plaatsvindt.



Figuur 1.2 Impressie van oplossingsrichting 3b waarbij het overslaande water in een afvoergeul wordt verzameld en afgevoerd. Hierbij zijn de oprit en de geul geïntegreerd ontworpen.

I.4 Samenvatting en conclusie

Een op- of afrit kenmerkt zich door het mogelijk afstromen van het water langs de afrit wat kan leiden tot een verhoogde belasting van het binnentalud en het mogelijk falen of bezwijken van de dijk. Hiertoe zijn een aantal maatregelen beschreven:

- Het niet toestaan van op- en afritten op de dijk. Deze oplossingsrichting wordt niet realistisch geacht.
- Het lokaal verhogen van de kruin van de dijk ter plaatse van de op- en afritten.
- Het afvoeren van het overslaande water middels een geul welke integraal met de weg wordt ontworpen. De consequentie is dat de weg tijdens overslagomstandigheden niet toegankelijk is. Deze oplossingsrichting zal naar verwachting niet snel worden toegepast gezien de grote ontwerpconsequenties die dit heeft.
- De op- en afritten zodanig ontwerpen dat het water niet langs de afrit zal stromen.

Naast bovengenoemde punten dienen de op- en afritten ook beschouwd te worden als een weg, welke in Paragraaf 5.3.1 en Bijlage J wordt behandeld.

J. Overgangen: wegen

J.1 Inleiding

In dit voorbeeld wordt een weg op de binnenberm beschouwd. In deze situatie zijn er in theorie vier overgangen te beschouwen (zie Figuur J.1):

- 1 Overgang 1: de knik van het boventalud naar de berm
- 2 Overgang 2: de overgang van het gras op het boventalud naar het asfalt
- 3 Overgang 3: de overgang van het asfalt naar het gras
- 4 Overgang 4: de knik van de berm naar het ondertalud



Figuur J.1 Schematische weergave van de verschillende overgangen bij een weg op de binnenberm van een dijk.

In het ontwerp van de weg op de dijk dient met alle vier deze overgangen expliciet rekening te worden gehouden. In sommige gevallen liggen de overgang 1,2 en 3,4 vrijwel op elkaar en ervaart men dit als één overgang.

Naast de hydraulische belastingen (golfoverslag) dient ook rekening te worden gehouden met andere belastingen waarbij gedacht kan worden aan onder andere verkeer (auto's, vrachtwagens) en schapen. Tot slot zijn de genoemde overgangen lastiger te onderhouden doordat maaimachines hier moeilijker bij kunnen komen. Een slechter onderhoud leidt tot een lagere graskwaliteit wat mogelijk leidt tot een lagere stabiliteit.

J.2 Bezwijkmechanismen

Bij de genoemde overgangen kan sneller schade optreden door:

- hogere belasting (bijvoorbeeld meer turbulentie als gevolg van het verschil in ruwheid tussen asfalt en gras of door richtingverandering van de stroombaan van de overslaande golftong)
- lagere sterkte (doordat de zode is onderbroken)
- secundaire effecten (lagere kwaliteit zode door beschadigingen van de zode als gevolg van rijsporen, schapen, slechter onderhoud et cetera).

Het bovenstaande is voor de vier genoemde overgangen schematisch weergegeven in Tabel J.1.

Tabel J.1 Overzicht mogelijke oorzaken falen van overgangen bij een weg, zie Figuur J.1 voor een impressie van de genoemde overgangen

Oorzaak van falen	Overgang 1	Overgang 2	Overgang 3	Overgang 4
Hogere belasting (HB)	HB1 Door knik hogere impact. §J.2.1	HB2 n.v.t.	HB3 Door ruwheidsverschil meer turbulentie. §J.2.3	HB4 Water komt los van talud → 'plonsbelasting' §J.2.4
Lagere sterkte (LS)	LS1 n.v.t.	LS2 zode is onderbroken, §J.2.2	LS3 zode is onderbroken §J.2.2	LS4 n.v.t.
Secundair effect (SE)	SE1 Onderhoud §5.6	SE2 Onderhoud §5.6 Bandensporen §J.3.5 Schapen §5.4 Uitspoelend zand §5.5	SE3 Onderhoud §5.6 Bandensporen §J.3.5 Schapenpaden §5.4 Uitspoelend zand §5.5	SE4 Onderhoud §5.6

Er wordt benadrukt dat de in Tabel J.1 gegeven oorzaken mogelijke oorzaken zijn. De oorzaak hoeft niet noodzakelijk aanwezig te zijn en het gevolg hoeft niet noodzakelijkerwijs falen van de bekleding te zijn. In de onderstaande paragrafen zijn de verschillende aspecten op meer detailniveau uitgewerkt. Sommige aspecten zoals onderhoud, schapen en uitspoelend zand zijn van toepassing op meerdere typen overgangen en worden daarom generiek behandeld (en niet in de onderliggende paragrafen welke specifiek voor wegen van toepassing zijn).

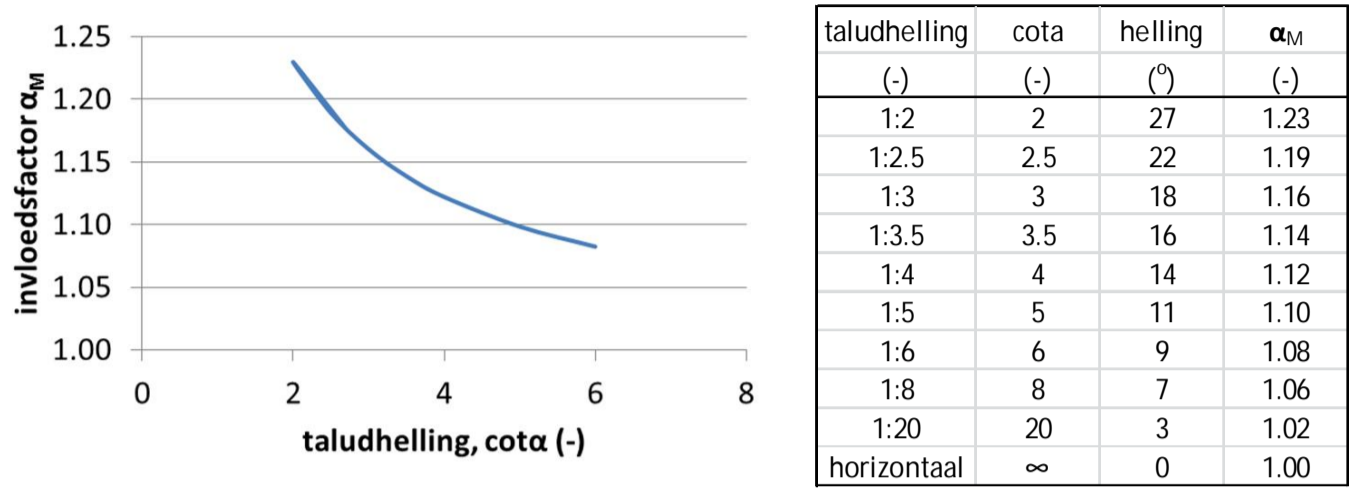
J.2.1. Overgang 1: Hogere belasting bij een holle knik (HB1)



Bij een knik treedt mogelijk een zwaardere belasting op doordat de overgeslagen golf een impact geeft op de grasbekleding direct onder de knik. Dit is nader beschouwd in Hoffmans et al (2015, [23]) waarin ook een eerste aanzet is gegeven hoe dit kan worden gekwantificeerd door dit effect mee te nemen in de cumulatieve overbelastingsmethode (zie ook Paragraaf B.4). In die methode is de belastingsfactor (α_M , welke een maat is voor de 'verzwaring' van de belastingsparameter U in de cumulatieve overbelastingsmethode) afhankelijk van de taludhelling van het boventalud:

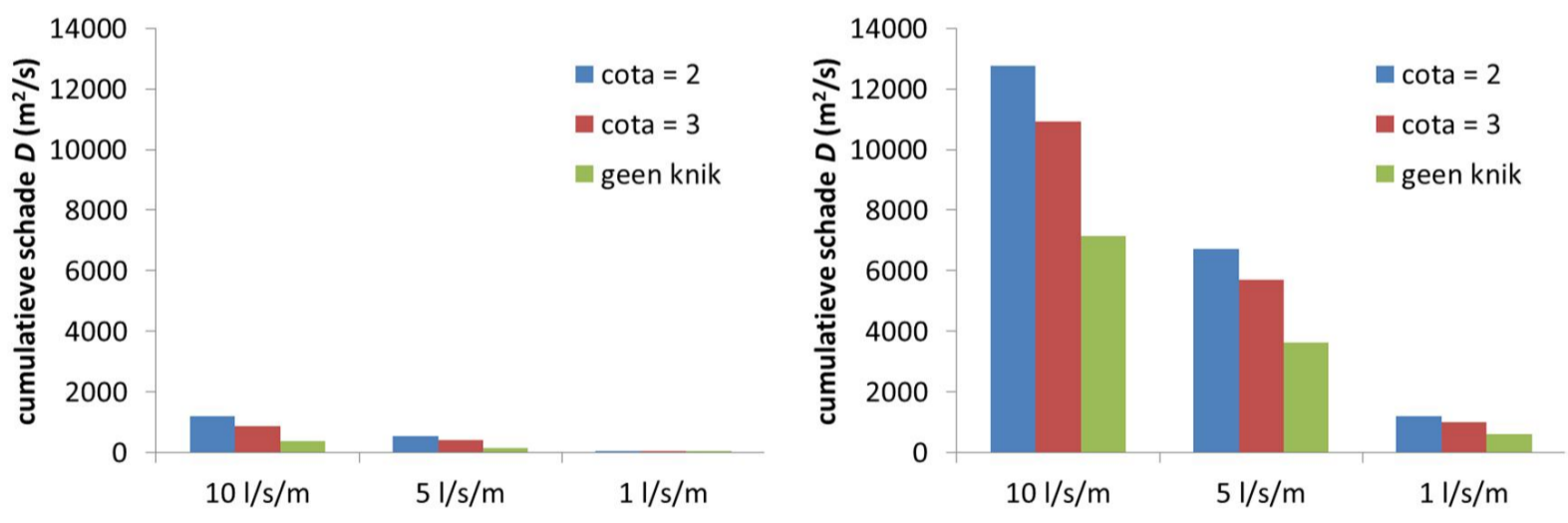
$$\alpha_M = 1 + \sin \frac{1}{2} \theta$$

Dit verband is tevens grafisch weergegeven in Figuur J.2.



Figuur J.2 Invloedsfactor voor de belasting α_M als gevolg van een holle knik als functie van de taludhelling.

Er wordt benadrukt dat de bovenstaande methode beperkt is gevalideerd. Met behulp van de cumulatieve overbelastingmethode kan een eerste inschatting worden gemaakt van de invloed van deze knik. In Figuur J.3 is een resultaat weergegeven van de mate van schade (uitgedrukt in de schadeparameter D) voor verschillende hellingshoeken van het binnentalud en voor verschillende golfoverslagdebieten. Hierbij is een situatie aangenomen waarbij de significante golfhoogte gelijk is aan $H_{m0} = 1,0$ m, de piekperiode is gelijk aan $T_p = 4,4$ s en de belastingsduur is gelijk aan 6 uur. Het buitentalud is een uniform 1:3 talud en de kruin is dermate hoog aangelegd dat er een overslagdebiet van 1 l/s/m, 5 l/s/m en 10 l/s/m optreedt. Als rekenwaarde is een kritieke stroomsnelheid van $U_c = 5,6$ m/s gehanteerd.

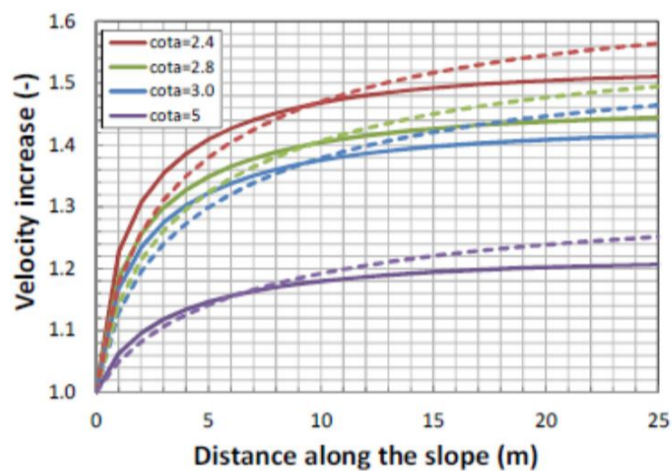


Figuur J.3 Resultaten van een rekenkundig voorbeeld waarbij de invloed van een knik is meegenomen ($H_{m0} = 1$ m, $T_p = 4,4$ s, belastingsduur = 6 uur, 1:3 buitentalud, $U_c = 5,6$ m/s). Links: geen versnellingsfactor (kruin) Rechts: een versnellingsfactor van 1,4 (binnentalud). Falen van de bekleding treedt op bij een waarde van $D = 7000$ m²/s

Er zijn twee berekeningen weergegeven:

- 1 situatie waarbij er geen versnelling van het water op het binnentalud is meegenomen. Dit betreft overgangen op de kruin van de dijk
- 1 situatie waarbij een versnelling van de overslaande tong is meegenomen. Hierbij is aangenomen dat de snelheid een factor 1,4 is versneld vanwege het schuin aflopende talud waarover het water afstroomt. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij een 5 m lang talud en een taludhelling van circa 1:2,4 (zie ook Figuur J.4).

In de linker grafiek van Figuur J.3 valt te zien dat de cumulatieve schade (parameter D) bij de verschillende overslagdebieten en verschillende knikken lager is dan $7000 \text{ m}^2/\text{s}$ (definitie van falen conform de cumulatieve overbelastingmethode). Van deze theorie uitgaande valt er dus nog geen significante schade te verwachten bij deze overgang indien deze op de kruin ligt. Indien er een versnelling van het water optreedt (rechterfiguur), is er bij 5 l/s/m nog net geen falen van de bekleding en bij 10 l/s/m faalt de bekleding (onafhankelijk of er een knik aanwezig is). Strikt genomen kan voor dit voorbeeld worden gesteld dat er geen invloed van de overgang is: of de bekleding wel of niet faalt is vooral afhankelijk van de versnellingsfactor en in mindere mate van de overgang. Er wordt echter benadrukt dat de gehanteerde theorie beperkt is gevalideerd.

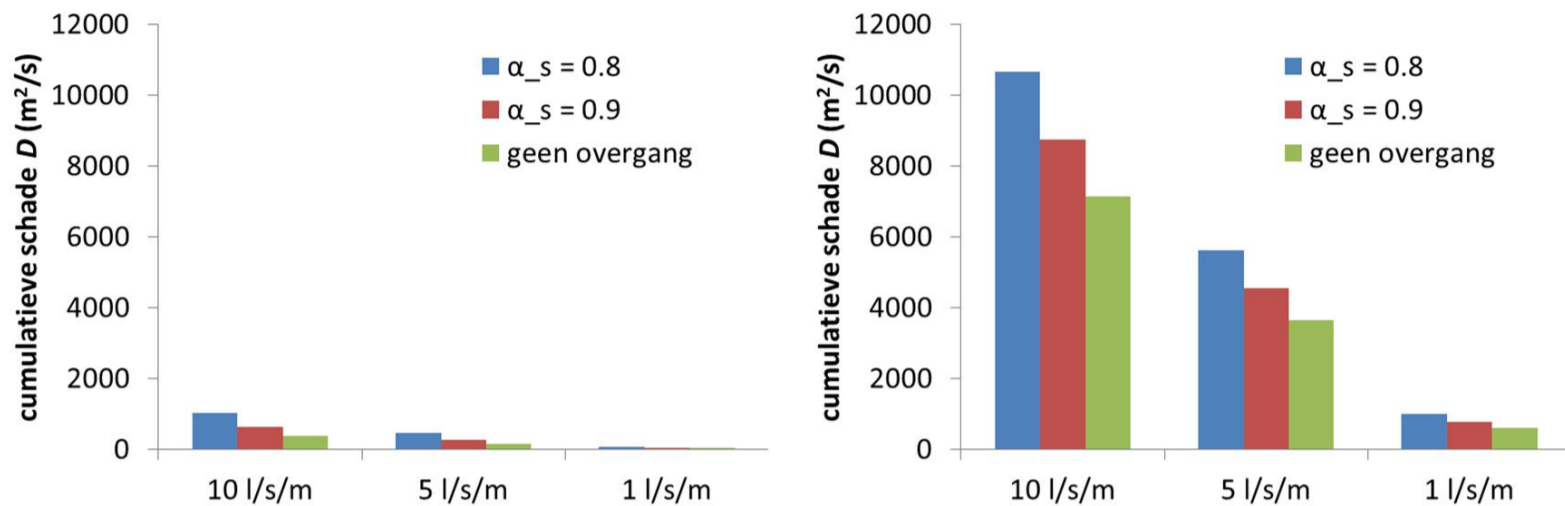


Figuur J.4 Versnelling van de overslaande golfhoogte als functie van de afstand op het talud en de taludhelling waarover het water afstroomt. Doorgetrokken lijn: $U_0 = 4 \text{ m/s}$, onderbroken lijn: $U_0 = 6 \text{ m/s}$ (bron: Deltares, 2015)

J.2.2. Overgang 2 en 3: Lagere sterkte door onderbroken zode (LS2 en LS3)



Een onderbroken zode heeft een lagere sterkte doordat er minder samenhang in de zode aanwezig is. In de cumulatieve overbelastingmethode kan dit tot uiting worden gebracht door de kritieke stroomsnelheid (U_c) te verlagen. Dit kan rekenkundig worden gedaan met behulp van de sterkteparameter α_s . In Hoffmans et al (2015, [23]) is een waarde van $\alpha_s = 0,9$ toegekend, dit is echter nog niet goed gevalideerd. Hiermee zijn oriënterende berekeningen uitgevoerd waarvan de resultaten zijn weergegeven in Figuur J.5.



Figuur J.5 Resultaten van een rekenkundig voorbeeld waarbij de invloed van het onderbreken van een graszode is meegenomen ($H_{m0} = 1$ m, $T_p = 4,4$ s, belastingsduur = 6 uur, 1:3 buitentalud, $U_c = 5,6$ m/s) Links: geen versnellingsfactor (kruin) Rechts: een versnellingsfactor van 1,4 (binnentalud). Falen van de bekleding treedt op bij een waarde van $D = 7000$ m²/s

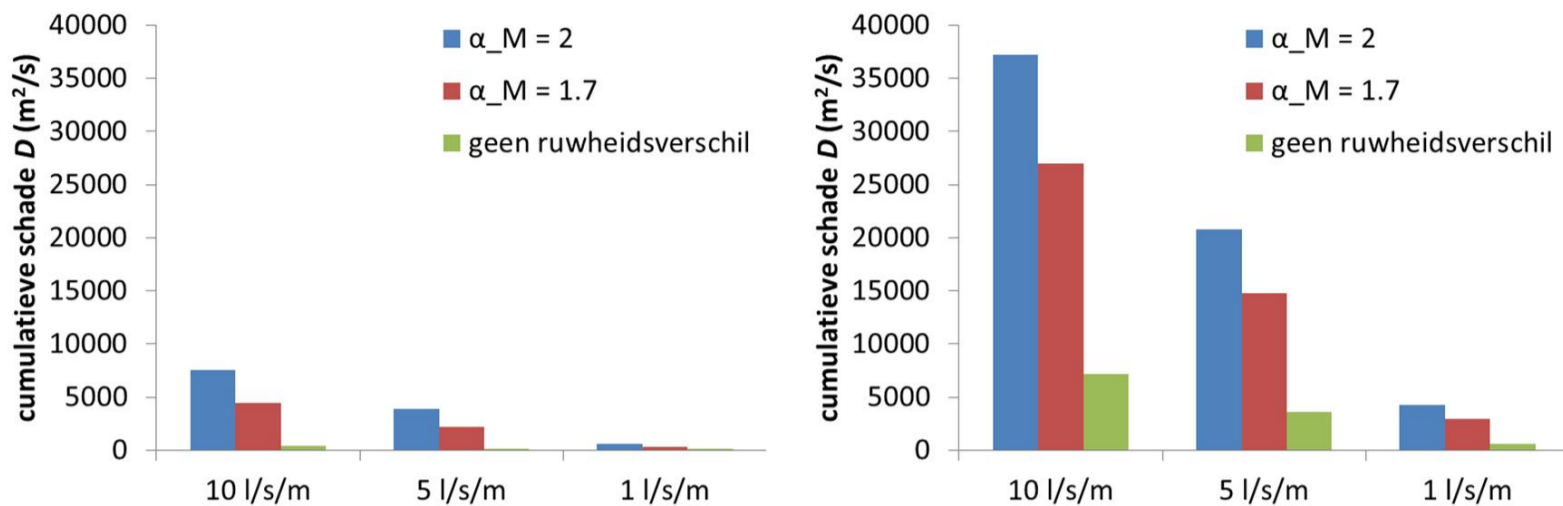
Er valt te zien dat de cumulatieve schade D bij de verschillende berekeningen lager is dan 7000 m²/s² (definitie van falen conform de cumulatieve overbelastingsmethode) indien de overgang op de kruin aanwezig is. Indien de overgang op het binnentalud aanwezig is en er een versnellingsfactor van 1,4 valt te verwachten dan faalt de overgang niet bij 5 l/s/m maar wel bij 10 l/s/m (onafhankelijk of er wel of geen overgang aanwezig is). Er wordt benadrukt dat de gehanteerde theorie beperkt is gevalideerd.

Tevens wordt opgemerkt dat er bij overgang 3 niet alleen sprake is van een onderbroken zode maar ook van een ruwheidsverschil door meer turbulentie (waardoor de belasting hoger is). Dit is in het bovenstaande nog niet in rekening gebracht.

J.2.3. Overgang 3: door ruwheidsverschil meer turbulentie

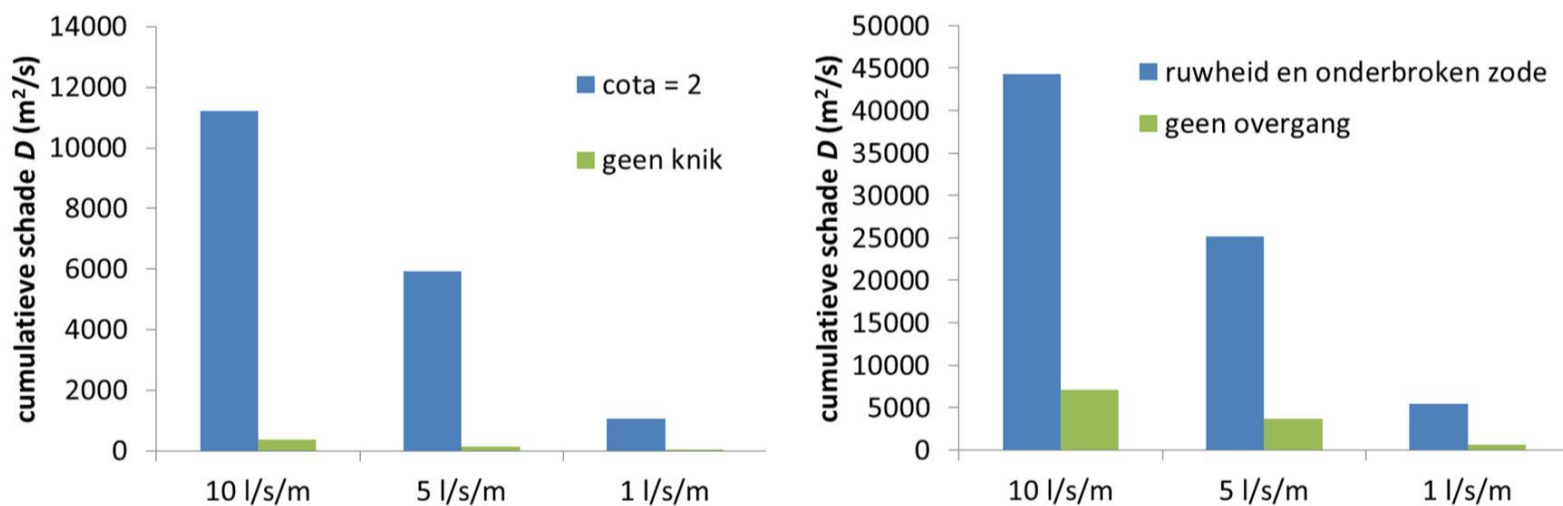


Door het ruwheidsverschil tussen een relatief gladde ondergrond en een relatief ruwe ondergrond zoals gras ontstaat turbulentie wat zal leiden tot een hogere belasting op de grasbekleding. Om dit te kwantificeren is in Hoffmanns et al (2015, [23]) een methodiek weergegeven om in de cumulatieve overbelastingsmethode te implementeren. In het daar gegeven voorbeeld is afgeleid dat er bij een overgang van asfalt naar gras een waarde van $\alpha_s = 1,7$ a $1,8$ gehanteerd dient te worden maar het is tevens denkbaar dat deze waarde gelijk dient te zijn aan 2. De waarde is echter niet goed gevalideerd. In Figuur J.6 zijn de resultaten van een oriënterende berekening weergegeven voor verschillende waarden van α_M .



Figuur J.6 Resultaten van een rekenkundig voorbeeld waarbij de invloed het ruwheidsverschil is meegenomen ($H_{m0} = 1$ m, $T_p = 4,4$ s, belastingsduur = 6 uur, 1:3 buitentalud, $U_c = 5,6$ m/s) Links: geen versnellingsfactor (kruin). Rechts: een versnellingsfactor van 1,4 (binnentalud). Falen van de bekleding treedt op bij een waarde van $D = 7000$ m²/s

Bij de kruin (linker grafiek) bezwijkt de bekleding niet wanneer er een debiet van 1 l/s/m of 5 l/s/m wordt gehanteerd. Wanneer 10 l/s/m wordt gehanteerd bezwijkt deze mogelijk wel. Indien een versnellingsfactor van 1,4 wordt gehanteerd dan bezwijkt de bekleding niet bij 1 l/s/m maar wel bij 5 l/s/m of hoger. Bij deze conclusies is geen rekening gehouden met het feit dat de zode ook is onderbroken. Om die reden is ook een berekening gemaakt waarbij deze twee factoren zijn gecombineerd (onderbroken zode: $\alpha_s = 0,8$ en turbulentie door ruwheidsverschillen: $\alpha_M = 2,0$). De resultaten zijn weergegeven in Figuur J.7.



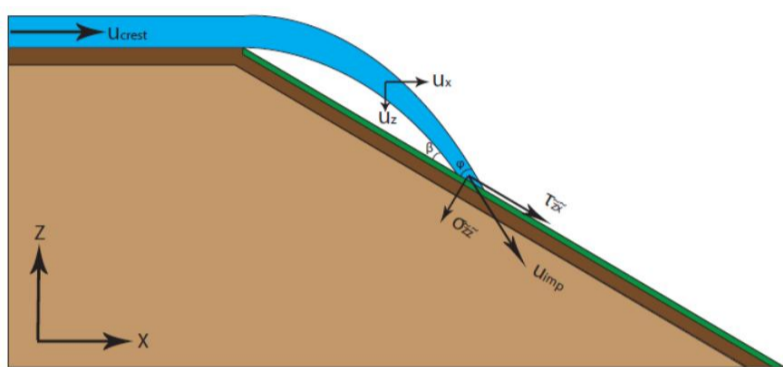
Figuur J.7 Resultaten van een rekenkundig voorbeeld waarbij de invloed het ruwheidsverschil en de onderbroken zode is meegenomen ($H_{m0} = 1$ m, $T_p = 4,4$ s, belastingsduur = 6 uur, 1:3 buitentalud, $U_c = 5,6$ m/s) Links: geen versnellingsfactor (kruin). Rechts: een versnellingsfactor van 1,4 (binnentalud). Falen van de bekleding treedt op bij een waarde van $D = 7000$ m²/s

Er wordt benadrukt dat de gehanteerde theorie beperkt is gevalideerd.

J.2.4. Overgang 4: Hogere belasting door plonsbelasting (HB 4)

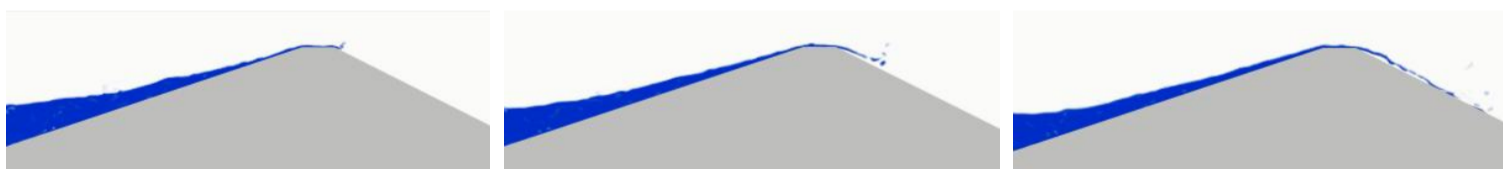


Het is denkbaar dat water dat met een hoge snelheid over het binnentalud stroomt, bij een bolle knik loskomt van het talud en verder op het talud neerkomt. Dit resulteert in een zogenoemde plonsbelasting. Dit mechanisme is beschreven in Ponsioen (2016, [30]) en schematisch weergegeven in Figuur J.8.



Figuur J.8 Schematische weergave van een plonsbelasting (ontleend aan Ponsioen, 2016)

Bij een dergelijk mechanisme zal de schade niet bij de overgang zelf plaatsvinden maar bij de 'landing' van de loskomende golftong lager op het talud. Een dergelijk mechanisme is nog niet eerder waargenomen bij de fysieke experimenten met de golfoverslagsimulator. Bij verkennende numerieke experimenten ([15]) is bij zware golfoverslagcondities (50 l/s/m) een dergelijk mechanisme enigszins waargenomen bij de kruin van de dijk (er is geen studie uitgevoerd naar het binnentalud). Een impressie van de resultaten van die studie is weergegeven in Figuur J.9.



Figuur J.9 Impressie van loskomende golf bij een 'bolle' knik. Numerieke simulatie ([15])

Bij de hierboven weergegeven simulatie (bij de kruin van de dijk) lijkt de loskomende golftong mee te vallen. De simulatie is bij een golfoverslagdebiet van 50 l/s/m en de figuren zijn bij een relatief extreme situatie binnen het berekende tijdsinterval weergegeven. Bij het binnentalud zijn de snelheden echter toegenomen (bij bijvoorbeeld een 1:3 talud is de snelheid na 10 m met circa een factor 1,4 toegenomen). Om na te gaan of de golftong dan daadwerkelijk loskomt bij de berm en of dit daadwerkelijk kan leiden tot bezwijken van de bekleding is aanvullend onderzoek benodigd.

J.3 Oplossingsrichtingen

In de vorige paragraaf zijn de verschillende overgangen bij wegen besproken en welke potentiële problemen kunnen optreden. In deze paragraaf worden potentiële oplossingsrichtingen beschreven.

Oplossingsrichting 1: niet toestaan van de weg.

Hoewel dit theoretisch een effectieve oplossingsrichting is, zal deze in de praktijk veelal niet aan de gebruikerseisen voldoen.

Oplossingsrichting 2: lokaal verhogen van de kruinhoogte ter plaatse van de weg.

Hoewel dit theoretisch een effectieve oplossingsrichting is, zal deze in de praktijk veelal niet aan de eisen voldoen.

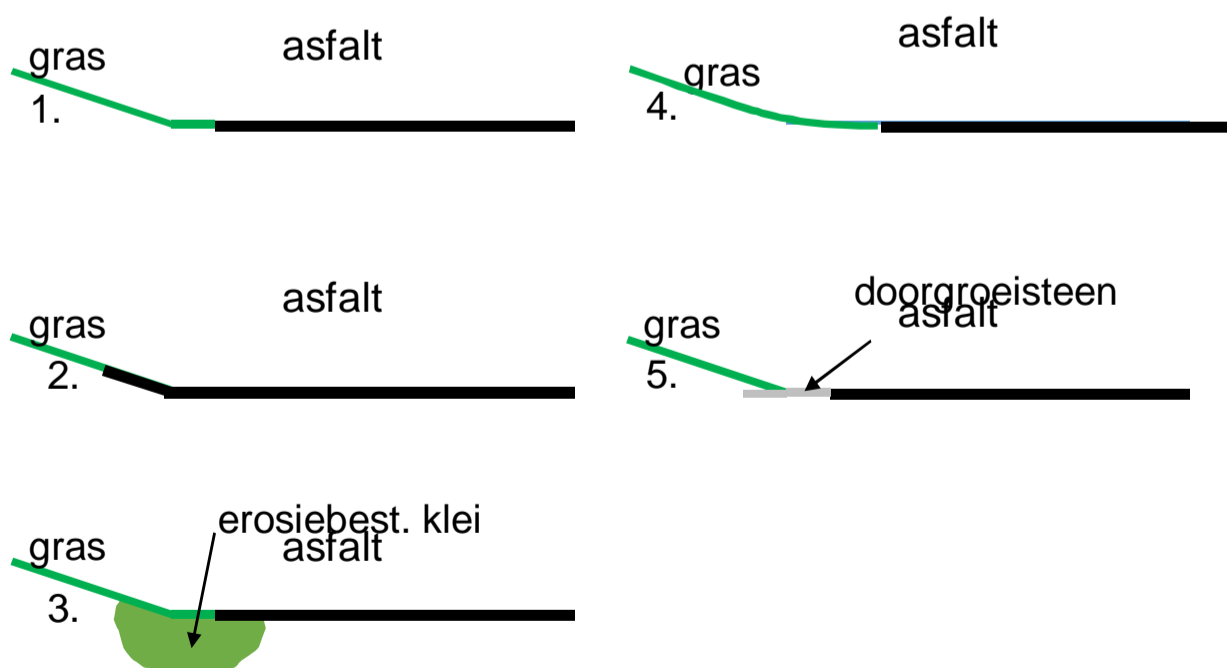
Oplossingsrichting 3: oplossingen in het ontwerp van de overgangen

In de voorgaande paragrafen is geïllustreerd dat er bij een weg in theorie vier soorten overgangen aanwezig zijn. Elk van deze overgangen heeft zijn eigen specifieke oorzaak welke kan leiden tot een lagere sterkte en/of een hogere belasting wat weer leidt tot een minder stabiele bekleding. Indien uit een analyse blijkt dat de overgang niet afdoende stabiel is dan kan er voor worden gekozen om de overgang te versterken.

In de volgende paragrafen worden mogelijkheden gegeven van oplossingen in het ontwerp van overgangen (oplossingsrichting 3).

J.3.1. Maatregel m.b.t. tot holle knik (HB 1)

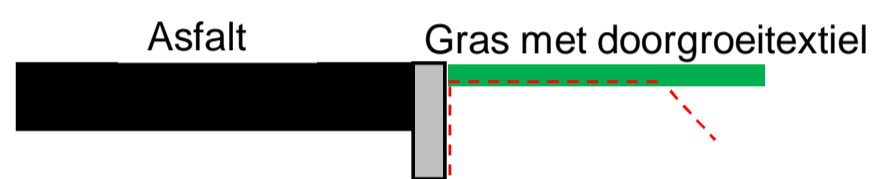
Indien de knik van significante invloed blijkt te zijn dan kan deze constructief worden aangepast. Dit kan worden gedaan door deze knik af te ronden en een relatief grote boogstraal te kiezen of door deze te versterken. Hierbij kan worden gedacht aan het verharden van deze knik met bijvoorbeeld asfalt, doorgroei stenen of een ander type bekleding. Daarbij kan tevens worden overwogen om deze onder de graszode aan te brengen om tegemoet te komen aan andere (architectonische of verkeerskundige) eisen. Tot slot kan worden overwogen om de overgang 'in te pakken' in een erosiebestendige kleilaag. Deze mogelijkheden zijn in onderstaande figuur geschetst.



Figuur J.10 Principe oplossing m.b.t. een holle knik. 1) Basis. 2) Doortrekken van het asfalt voorbij de knik. 3. Inbedding van overgang in erosiebestendige klei. 4. Afronding van de knik. 5) doorgroei stenen aanbrengen tot voorbij de knik.

J.3.2. Maatregel m.b.t. onderbroken zode (LS2 en LS3)

De onderbroken zode leidt tot een lagere sterkte. Indien dit specifieke probleem opgelost dient te worden kan deze overgang versterkt worden. Bij dergelijke versterkingen kan worden gedacht aan doorgroeibare materialen zoals doorgroeitextielen. Hiermee is in de praktijk nog weinig ervaring opgedaan. In het kader van een onderzoekstraject zijn er in 2016 en 2017 verschillende kunstmatige overgangen in een dijkbekleding op het binnentalud van de waddenzeedijk aangelegd. Deze kunstmatige overgangen bestaan uit ingegraven betonbanden in de dijkbekleding waardoor een overgang ontstaat tussen een 'hard lijnobject' en de grasbekleding. In dit project zijn er verschillende van deze overgangen versterkt met doorgroeibare textielen. Een impressie van dit onderzoek is weergegeven in Bijlage H.



Figuur J.11 Schematische en conceptuele weergave van een aangebracht doorgroeitextiel

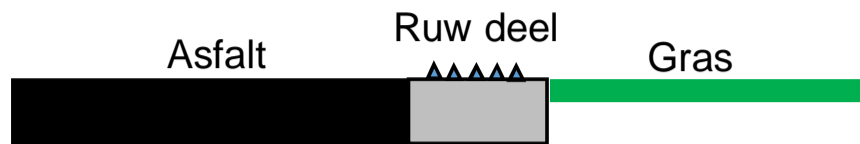


Figuur J.12 Impressie van het aanbrengen van een doorgroeitextiel bij de pilotsectie op het binnentalud van de Waddenzeedijk

Hoewel de aangelegde versterkingsmaatregelen veelbelovend lijken dient opgemerkt te worden dat deze nog niet onder een hydraulische belasting zijn getest. In de komende jaren worden de versterkingen gemonitord en mogelijk hydraulisch getest met behulp van een golfoverslagsimulator, golfoploopsimulator of Deltagoot. Vooralsnog zijn er dus nog geen gevalideerde maatregelen beschikbaar om een onderbroken zode te versterken.

J.3.3. Maatregel m.b.t. ruwheidsverschillen (HB 3)

Om ruwheidsverschillen tussen de weg en het gras op te lossen dient er een overgang te zijn waarbij het 'harde' gedeelte een bepaalde mate van ruwheid heeft. Dit is schematisch weergegeven in Figuur J.13.



Figuur J.13 Schematische weergave van maatregel om ruwheidsverschillen op te lossen

Het ruwe deel zou kunnen worden gevormd door gras. Echter, het gras dient dan gefixeerd te zijn (bijvoorbeeld door middel van doorgroeibare stenen of doorgroeitextielen). In het geval van wegen is het aannemelijk dat dit gedeelte van het gras zal worden kapotgereden door auto's en vrachtwagens. Een andere optie is om het ruwe gedeelte uit te voeren met hard materiaal zoals beton. Het is echter onzeker of een dergelijke oplossing op de langere termijn leidt tot hoge onderhoudskosten in verband met verwerking of schade. Daarnaast dient het ruwe gedeelte zodanig ontworpen te worden dat dit niet conflicteert met de eisen aan de weg (o.a. verkeersveiligheid). Mogelijk dat de verruwing integraal kan worden ontworpen met een verkeerskundige waarschuwingstrook zoals ribbels welke leiden tot het trillen van een auto.

Het is vooralsnog niet bekend wat de lengte van het ruwheidselement dient te zijn.

J.3.4. Maatregel m.b.t. plonsbelasting (HB 4)

Indien de zogenoemde plonsbelasting maatgevend is, en mogelijk tot schade aan de grasbekleding kan leiden, dan kan worden overwogen om de locatie waar dit optreedt te vervangen door een harde bekleding (waardoor er nieuwe overgangen worden gecreëerd). Deze harde bekleding kan al dan niet worden ontworpen met een leeflaag van gras daarboven.

J.3.5. Maatregel m.b.t. secundair effect: bandensporen (SE 2 en SE 3)

Bandensporen dienen aan beide zijden van de weg te worden voorkomen. Hiervoor dienen maatregelen aangedragen te worden welke ook voldoen aan de verkeerskundige en architectonische eisen.

Veelal worden doorgroeistenen aangebracht langs wegen. Voor het voorkomen van bandensporen heeft dit alleen zin als het rijden op doorgroeistenen een schrikreactie (bijvoorbeeld door het trillen van de auto) geeft bij de automobilist. Indien dit niet het geval is, dan is het nog steeds goed denkbaar dat de automobilist ook voorbij de doorgroeistenen zal rijden en in het gras terecht zal komen en bandensporen zal veroorzaken.

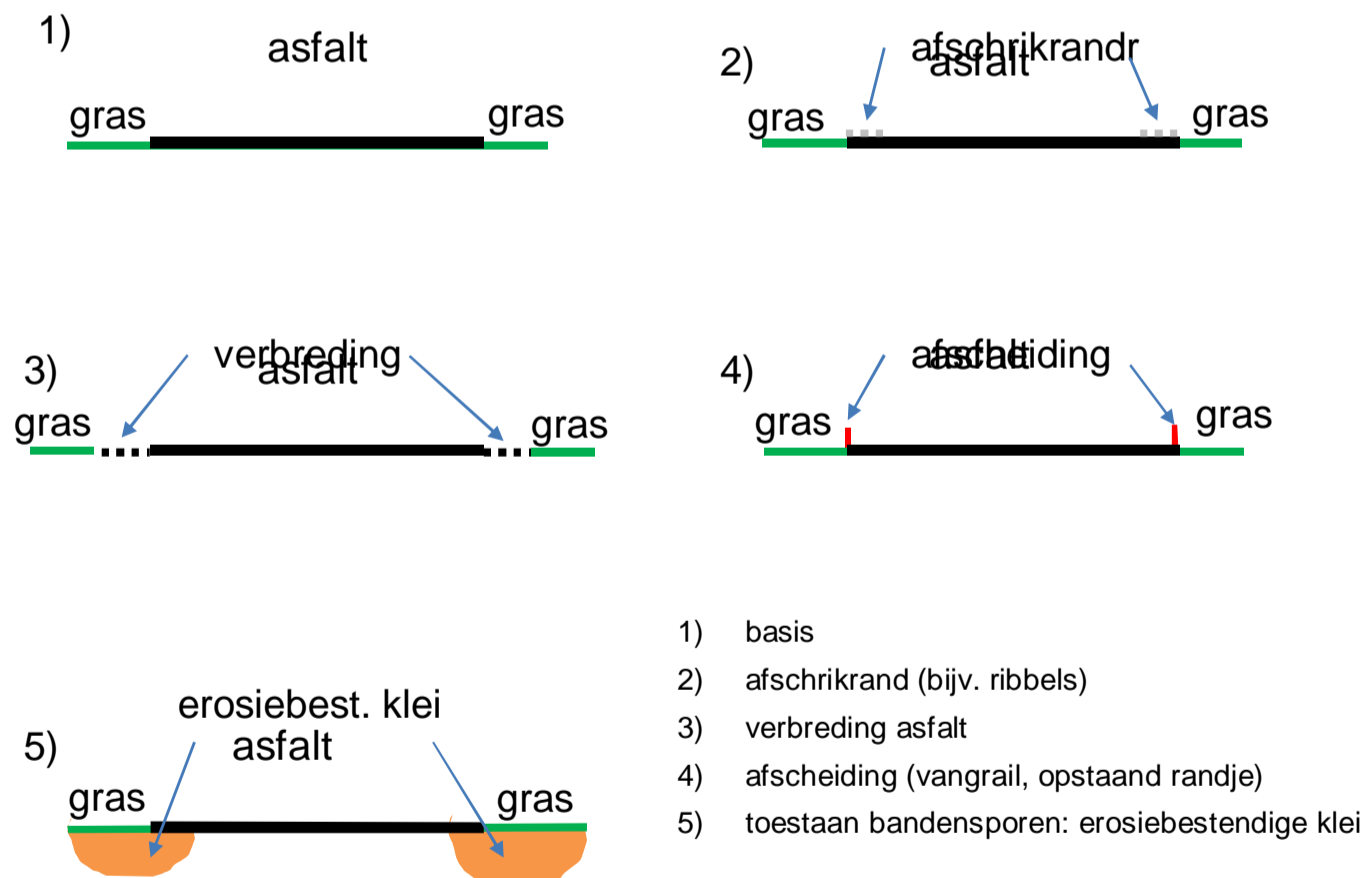
Er wordt onderscheid gemaakt in de volgende principeoplossingen:

- **Het verbreden van de weg**
Indien de weg kan worden verbreed, dan zal men doorgaans minder geneigd zijn om in de berm te gaan rijden. Veelal is deze ruimte echter niet beschikbaar. Daarnaast leiden bredere wegen tot (ongewenste) hogere snelheden van het verkeer wat kan conflicteren met de verkeerskundige eisen.
- **Creëren van een waarschuwingstrook**
Indien er een waarschuwingstrook kan worden aangelegd dan zal een automobilist minder snel in de berm gaan rijden. Met een waarschuwingstrook kan worden gedacht aan ribbels (waardoor de auto gaat trillen), belijning, kleuren et cetera. Voor een dergelijk ontwerp is een verkeerskundig expert noodzakelijk.

- **Fysiek afzetten van de zijkanten van de weg**
De berm kan ontoegankelijk gemaakt worden voor het verkeer. Hierbij kan worden gedacht aan een opstaand randje of een vangrails.
- **Toestaan van bandensporen**
Er kan voor worden gekozen om bandensporen toe te staan. Dit kan alleen indien is aangetoond dat een dijk welke is beschadigd door bandensporen niet faalt onder maatgevende condities. Dit kan bijvoorbeeld worden gerealiseerd door de overgangen 'in te pakken' in een erosiebestendig kleipakket.

Bij het ontwerp dient integraal rekening te worden gehouden met de waterbouwkundige eisen, architectonische eisen en eisen vanuit de verkeersfunctie van de weg. Een waterbouwkundige eis kan zijn dat het ontwerp zodanig dient te zijn dat er geen bandensporen (beschadiging gras) kunnen ontstaan. Een mogelijke eis vanuit het oogpunt van verkeersveiligheid kan zijn dat het ontwerp van de weg zodanig vormgegeven is dat het de automobilist demotiveert om te hard te gaan rijden. Uit de praktijk blijkt dat het gebruik van doorgroei stenen leidt tot hogere rij snelheden op de weg ([53]). Daarnaast dienen uiteraard verdere eisen vanuit de verkeersveiligheid in acht genomen te worden.

In Figuur J.14 zijn een aantal suggesties voor principe oplossingen aangedragen voor overgangen van het type 2 en 3.



Figuur J.14 Potentiele principeoplossingen voor overgangen tussen de weg en het gras

J.3.6. Samenvatting en conclusies

Een weg op een dijkbekleding bestaat in potentie uit vier overgangen: twee knikken en twee onderbrekingen van de graszode.



Bij een weg op de kruin is er geen sprake van overgang 1.

De vier overgangen zijn beschreven en er is met een rekenkundig voorbeeld aangegeven wat de invloed van deze overgangen zijn bij verschillende overslagdebieten. Dit is samengevat in Tabel J.2 en Tabel J.3. Deze conclusies zijn alleen van toepassing op het gehanteerde voorbeeld.

Tabel J.2 *Indicatie of maatregelen nodig zijn (situatie waarbij de weg op de kruin ligt). Dit is alleen van toepassing op het gegeven voorbeeld*

q (l/s/m)	Type overgang				
	1	2	3	4	Geen overgang
1	n.v.t.	niet	niet	n.t.b.	niet
5	n.v.t.	niet	niet	n.t.b.	niet
10	n.v.t.	niet	wel	n.t.b.	niet

Tabel J.3 *Indicatie of maatregelen nodig zijn (situatie waarbij de weg op de binnenberm ligt en een versnellingsfactor van 1,4 is aangenomen). Dit is alleen van toepassing op het gegeven voorbeeld*

q (l/s/m)	Type overgang				
	1	2	3	4	Geen overgang
1	niet	niet	niet	n.t.b.	niet
5	niet	niet	wel	n.t.b.	niet
10	wel	wel	wel	n.t.b.	wel

Te zien valt dat met name aandacht dient te worden besteedt aan overgang 3 (de landwaartse overgang tussen de weg en het gras. Hier zijn twee aandachtspunten: er is sprake van turbulentie en er is een onderbroken zode.

De hierboven gegeven analyse is van toepassing op een nette overgang waarbij de zode goed aansluit op de weg. In de praktijk blijkt dit lastig te realiseren doordat auto's soms van de weg geraken en het gras beschadigen (bandensporen).

Indien de weg op de kruin ligt zal er doorgaans geen noodzaak zijn om maatregelen te treffen rondom de overgangen bij de weg aannemende dat er een gesloten zode en een goede kleilaag aanwezig is en er geen zand kan uitspoelen. Hier is het waarschijnlijk tevens belangrijk dat er geen bandensporen aanwezig zijn. Dit is echter niet eenvoudig te realiseren aangezien het ontwerp zowel aan de waterbouwkundige eisen als aan de eisen vanuit de verkeersfunctie van de weg en architectonische eisen dient te voldoen.

K. Berekeningen macrostabiliteit binnenwaarts

K.1 Inleiding

Deze bijlage bevatten de aannames en uitgangpunten voor het uitvoeren van de berekeningen naar de binnenwaartse macrostabiliteit. De berekeningen hebben betrekking op een fictieve case, welke representatief is voor (delen van) de dijken tussen Gorinchem en Tiel ten aanzien van hoogteligging en grondopbouw.

Het doel van de berekeningen is om inzichtelijk te maken welke invloed de eisen vanuit het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts hebben op het benodigde ruimtebeslag van het dwarsprofiel. Dit is gedaan door voor één fictieve, maar representatieve case, binnen het dijktraject Tiel - Gorinchem ontwerpberekeningen te maken voor een ontwerp overslagdebiet van 1 l/s/m en 10 l/s/m.

De belangrijkste referenties bij dit werk waren:

- Voorlopige werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4 ([27])
- Verkenning dijkversterking Tiel – Waardenburg Geotechnische onderbouwing dijkontwerp ([42])

K.2 Principe dijkverbetering

Er is uitgegaan van een ontwerp overslagdebiet van 1 en van 10 l/s/m. Voor het dijktraject 43-6, de dijkvakken nabij Opijnen – Heesselt gelden dan ongeveer de volgende hydraulische belastingniveaus:

- NAP +11,6 m bij ontwerp golfoverslagdebiet van 1 l/s/m.
- NAP +10,9 m bij ontwerp golfoverslagdebiet van 10 l/s/m

In principe wordt een taludhelling van 1:3 aangehouden, zowel binnen- als buitenwaarts. De helling van 1:3 is eveneens voldoende om aan de eisen te voldoen die volgen uit het mechanisme GABI (Grasbekleding Afschuiven Binnentalud), indien wordt versterkt met klei die kan worden geclassificeerd als 'stevige klei' ([33]).

De buitenwaartse macrostabiliteit is buiten de scope van het project gehouden, hier zijn verder geen berekeningen aan gedaan. Binnenwaarts is rekenkundig een berm aangebracht met een afschot van 1:20 en is deze zodanig verlengd totdat werd voldaan aan de gestelde faalkanseis. Het op deze wijze berekende dwarsprofiel is de hoofduitkomst van deze studie.

De dijkversterking wordt vierkant uitgevoerd. De kruinbreedte blijft gelijk en wordt zonder as-verschuiving verhoogd. Het maaiveld ligt op NAP +3,5 m en de huidige kruin ligt op NAP +10,8 m. De kruinbreedte is ca. 6,5 m. Het huidige binnentalud heeft een helling van 1V:2,8H en een buitentalud met een helling 1V:1,8H. Zie voor een dwarsprofiel Figuur K.9.

K.3 Werkwijze

De werkwijze uit het bovengenoemde KPR memo is gevolgd. De eisen zijn samengevat in Tabel K.1. De eisen gelden zowel voor een ontwerp-golfoverslagdebiet van 1 l/s/m als van 10 l/s/m.

Tabel K.1 Eisen stabiliteit binnenwaarts, het dwarsprofiel moet aan beide eisen voldoen

	Eis 1 Reguliere berekening	Eis 2 Berekening met golfoverslag
Buitenwaterstand	Ontwerppeil NAP +10,3 m	Peil illustratiepunt NAP +9,5 m
Waterspanningen in zandpakket	Schematisering overeenkomstig buitenwaterstand, binnendijks begrensd op NAP +7,1 m ivm opdrijven.	Schematisering overeenkomstig buitenwaterstand, binnendijks begrensd op NAP +7,1 m ivm opdrijven.
Waterspanningen in de dijk	Geen significante golfoverslag, freatisch vlak op basis van indringing door buitentalud en dijk.	Rekening houden met golfoverslag, schematisering freatisch vlak net onder maaiveld.
Schadefactor γ_n	$\gamma_n = 0,15\beta_{T,stbi,q} + 0,41$ $\beta_{eis,dsn,stbi} = -\Phi^{-1}(P_{eis,dsn,stbi})$ $P_{eis,dsn,stbi} = \frac{f_{stbi} \cdot P_{max}}{(1 + aL/b)}$ $P_{eis,dsn,stbi} = 1,3 \cdot 10^{-7}$ $\gamma_n = 1,18 (-)$	$\gamma_n = 0,15\beta_{T,stbi,q} + 0,41$ $\beta_{T,stbi,q} = -\Phi^{-1}(P_{T,stbi,q})$ $P_{T,stbi,q} = \frac{P_{eis,dsn,stbi}}{P(q \geq 1 \text{ l/s/m})}$ $P_{eis,dsn,stbi} = \frac{f_{stbi} \cdot P_{max}}{(1 + aL/b)}$ $P_{T,stbi,1\text{l/s/m}} = 1,6 \cdot 10^{-2}$ $P_{T,stbi,10\text{l/s/m}} = 2,3 \cdot 10^{-3}$ $\gamma_{n,1 \text{ l/s/m}} = 0,73 (-)$ $\gamma_{n,10 \text{ l/s/m}} = 0,83 (-)$

De kans op een golfoverslagdebiet groter dan 1 l/s/m is gelijk aan de kans-eis voor een ontwerpkuinhoogte van 1 l/s/m. Met hydra-NL is berekend dat de kans op het optreden van een overslagdebiet groter dan 1 l/s/m bij een ontwerpkuinhoogte van 10 l/s/m circa 7 keer groter is dan de kans-eis.

K.4 Eis semi probabilistische stabiliteitsberekening

Er zijn semi-probabilistische stabiliteitsberekeningen gemaakt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van partiële veiligheidsfactoren die er samen voor zorgen dat wordt voldaan aan de faalkanseis voor macrostabiliteit binnenwaarts. Er is uitgegaan van de volgende partiële factoren:

- Materiaalfactor (voor CSSM) 1,0 ([35])
- Modelfactor LiftVan 1,06 ([35])
- Schematiseringsfactor 1,2 ([42])
- Schadefactor afhankelijk van scenario zie Tabel K.1

De materiaalfactor is verwerkt in de rekenwaarde van de wrijvingseigenschappen van de grondlagen die in het glijvlakmodel worden ingevoerd. De door het glijvlakmodel berekende stabiliteitsfactor SF (-) moet worden getoetst aan het product van de modelfactor, de schematiseringsfactor en de schadefactor:

- Scenario reguliere berekening eis SF 1,50 (-)
- Scenario golfoverslag 1 l/s/m eis SF 0,93 (-)
- Scenario golfoverslag 10 l/s/m eis SF 1,06 (-)

Uit de werkwijze volgens het KPR memo ([27]) volgen dus veel minder strenge eisen bij het scenario waarbij rekening wordt gehouden met golfoverslag. De redenering hierbij is dat de kans op golfoverslag relatief klein is.

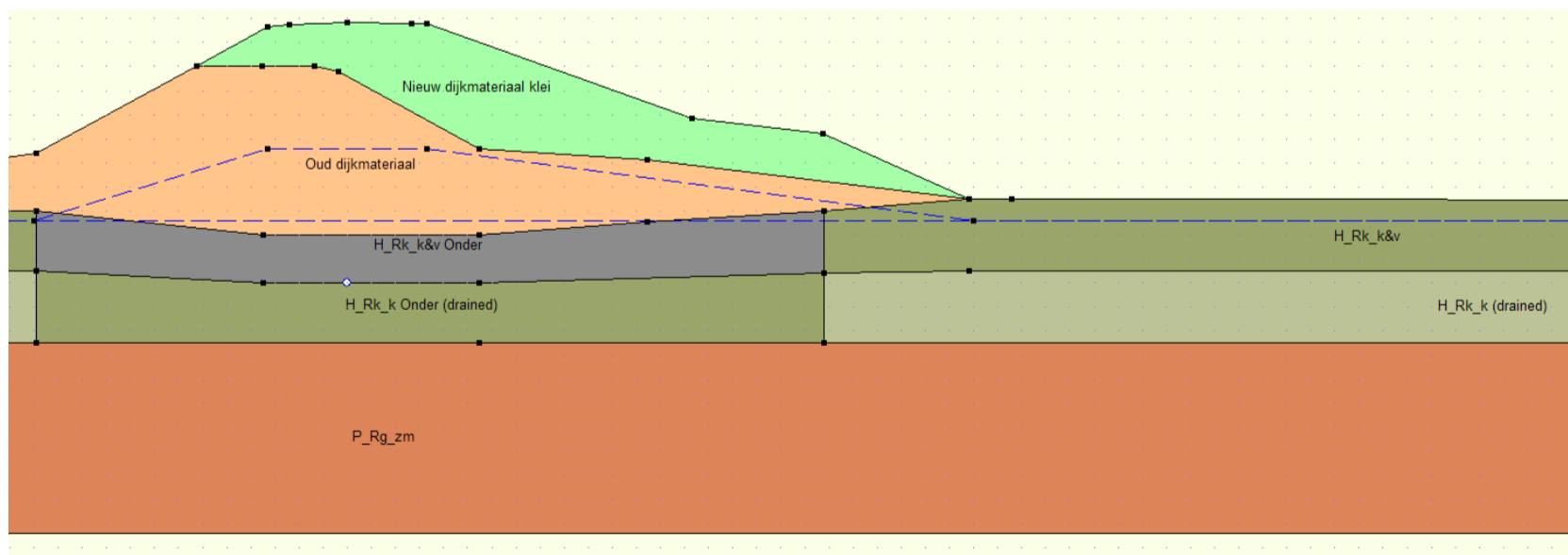
K.5 Grondopbouw

De grondlaagopbouw is gebaseerd op een globaal beeld vanuit de SOS (Stochastische Ondergrond Schematisering) en de geotechnische lengteprofielen voor de dijktrajecten Gorinchem - Waardenburg en Tiel - Waardenburg.

Gekozen is voor een holoceen slappe lagenpakket van 6 m dikte op een zandpakket dat in contact staat met het buitenwater. De globale tendens in de dikte van de holocene deklaag is een afname van Gorinchem (ca. 8 m) in de richting van Tiel (enkele meters). Er is echter veel variatie in zowel de dikte als de samenstelling van de deklaag. Deze varieert van humeuze klei en veenlagen tot zandige kleilagen en holocene geulopvullingen met slechts een heel beperkte deklaag van klei. De gekozen laagopbouw is één van de in het SOS aangetroffen scenario's van een laag klei en veen (code H_Rk_k&v) op een kleilaag (code H_Rk_k) op het pleistocene zandpakket (code P_Rg_zm). De gekozen grondlaagopbouw zou bijvoorbeeld kunnen voorkomen tussen Opijnen en Heesselt.

Bekend is dat de oude dijk bestaat uit klei, echter dat daarna in diverse varianten van klei of zand met een kleibekleding is versterkt. Voor deze case is gekozen voor een dijkopbouw volledig bestaande uit klei.

De geschematiseerde grondopbouw voor de huidige situatie wordt gegeven in Figuur K.1. De grondlaag 'Nieuw dijkmateriaal klei' is een voormalige dijkverbetering.



Figuur K.1 Geschematiseerde grondopbouw bestaande situatie

Er is gekozen voor een deterministische grondlaagopbouw, dus niet voor een scenarioaanpak zoals met het SOS. Onzekerheden in de schematisering van onder andere de grondlaagopbouw worden verdisconteerd in de schematiseringsfactor van 1,2 (-), welke in dit geval is ontleend aan [42]. Normaliter wordt deze waarde onderbouwd en kan deze

worden aangescherpt, echter voor het doel van deze studie is dat niet noodzakelijk. Immers alleen het verschil in de benodigde bermhoogte als functie van de keuze voor een ontwerp-kruinhoogte is van belang. Het maakt daarbij waarschijnlijk nauwelijks uit of de waarde iets meer of minder dan 1,2 zou moeten zijn.

K.6 Grondeigenschappen

De grondlaageigenschappen zijn gekozen aan de hand van het rapport [42] en zijn dus niet exact gelijk aan de in dat rapport gehanteerde eigenschappen. Het is ook de bedoeling om een representatieve case te berekenen niet een specifiek bestaand profiel.

Een samenvatting wordt gegeven in Tabel K.2. Dit betreft de rekenwaarden van de eigenschappen. Hierin is verdisconteerd dat het gaat om karakteristieke waarden gedeeld door de materiaalfactor (welke gelijk is aan 1).

Tabel K.2 Samenvatting gekozen rekenwaarden van de grondeigenschappen ('klei dijkverbetering' is de grond waarmee in de ontwerpberekeningen de versterking wordt gemaakt)

Grondlaag	gewicht boven freatisch vlak (kN/m ³)	gewicht onder freatisch vlak (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	S (-)	POP (kPa)
Klei dijkverbetering	17	17	0	30.1	-	-
Nieuw dijkmateriaal klei	18	18	0	32	-	-
Oud dijkmateriaal	18	18	0	30.7	-	-
H_Rk_k&v	14.5	14.5	-	-	0.24	23
H_Rk_k&v onder	15	15	-	-	0.24	17
H_Rk_k (drained)	17	17	0	29.3	-	-
H_Rk_k onder (drained)	17.5	17.5	0	29.3	-	-

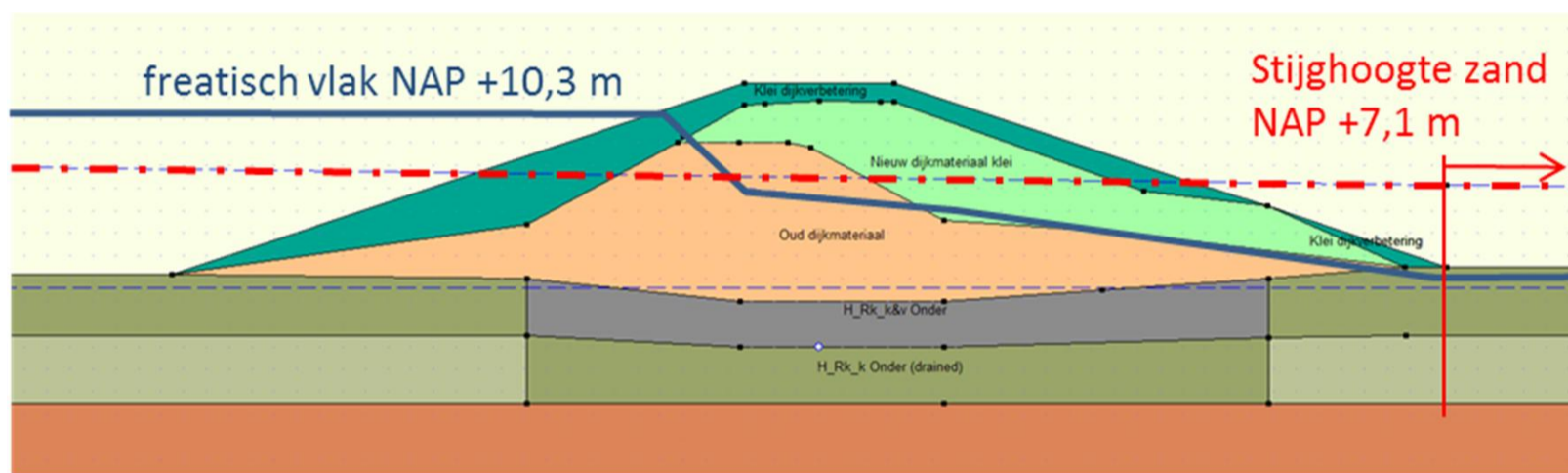
Alleen de laag klei en veen wordt verondersteld zich ongedraineerd te gedragen tijdens afschuiven. De onderste kleilaag H_Rk_k is als gedraineerd gemodelleerd. Dit is overgenomen uit [42].

K.7 Waterspanningen

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de waterspanningen in het zand, in de dijk en in het slappe lagenpakket.

In de dijk worden de waterspanningen beschreven door het freatisch vlak met daar onder een hydrostatisch drukverloop. Onder dagelijkse omstandigheden is er een opbolling tot NAP +5,6 m (maaiveld NAP +3,5 m). Onder maatgevende omstandigheden is op het oog een freatisch vlak geschematiseerd dat lijkt op het in [42]aangehouden verloop (Figuur K.2). Globaal verloopt het freatisch vlak van de buitenwaterstand ter plaatse van het buitentalud tot vlak onder het maaiveld aan de binnenteen. Het grootste verval treedt op aan de buitenzijde van de dijk. De verhoging van het freatisch vlak ter plaatse van de binnenkruin is ca. 0,5 m.

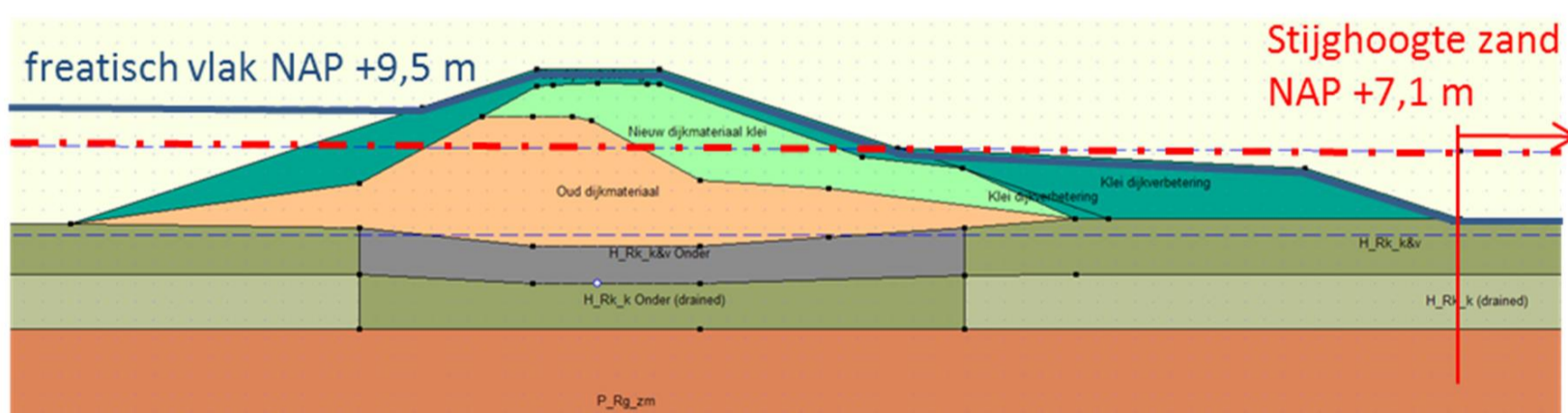
De waterspanning in het zand wordt geschematiseerd door een stijghoogte die geldt voor het zandpakket. De waterspanning is hydrostatisch ten opzichte van het geschematiseerde stijghoogteverloop. Op circa 100 m buitendijks is de stijghoogte gelijk aan de buitenwaterstand. Binnendijks wordt de stijghoogte begrensd door de opdrijfpotentiaal, welke in dit geval gelijk is aan NAP +7,1 m (Figuur K.2). De hierbij behorende waterdruk is dan net in evenwicht met het grondgewicht van de deklaag. De effectieve spanning op de grens tussen de deklaag en het zandpakket is dan 0 kPa.



Figuur K.2 Geschematiseerd freatisch vlak en stijghoogte in het zand voor het geval van een ontwerpkuinhoogte van NAP +11,6 m (1 l/s/m) en enkel taludverflauwing naar 1:3. Scenario hoogwater, zonder golfoverslag.

De hoge stijghoogte in het zand plant zich binnen een hoogwater beperkt voort in het slappe lagenpakket. In dit geval 3 m, tot aan de bovenkant van de grondlaag H_Rk_k. Aan de bovenzijde van deze laag wordt de waterdruk berekend uit een stijghoogte van NAP +2,6 m, wat ongeveer gelijk is aan de stijghoogte in het zand onder dagelijkse omstandigheden.

Bij het scenario waarbij wel golfoverslag wordt meegenomen is het freatisch vlak verhoogd tot net onder het maaiveld. De buitenwaterstand is in dit geval lager NAP +9,5 m. De stijghoogte in het zand start op 100 m van de dijk iets lager (NAP +9,5 m ipv NAP +10,3 m), echter binnendijks geldt nog steeds de begrenzing door opdrijven van NAP +7,1 m. Een en ander schematisch weergegeven in Figuur K.3.



Figuur K.3 Geschematiseerd freatisch vlak en stijghoogte in het zand voor het geval van een ontwerpkuinhoogte van NAP +11,6 m (1 l/s/m) en taludverflauwing naar 1:3 met steunberm. Scenario met golfoverslag.

K.8 Rekenresultaten

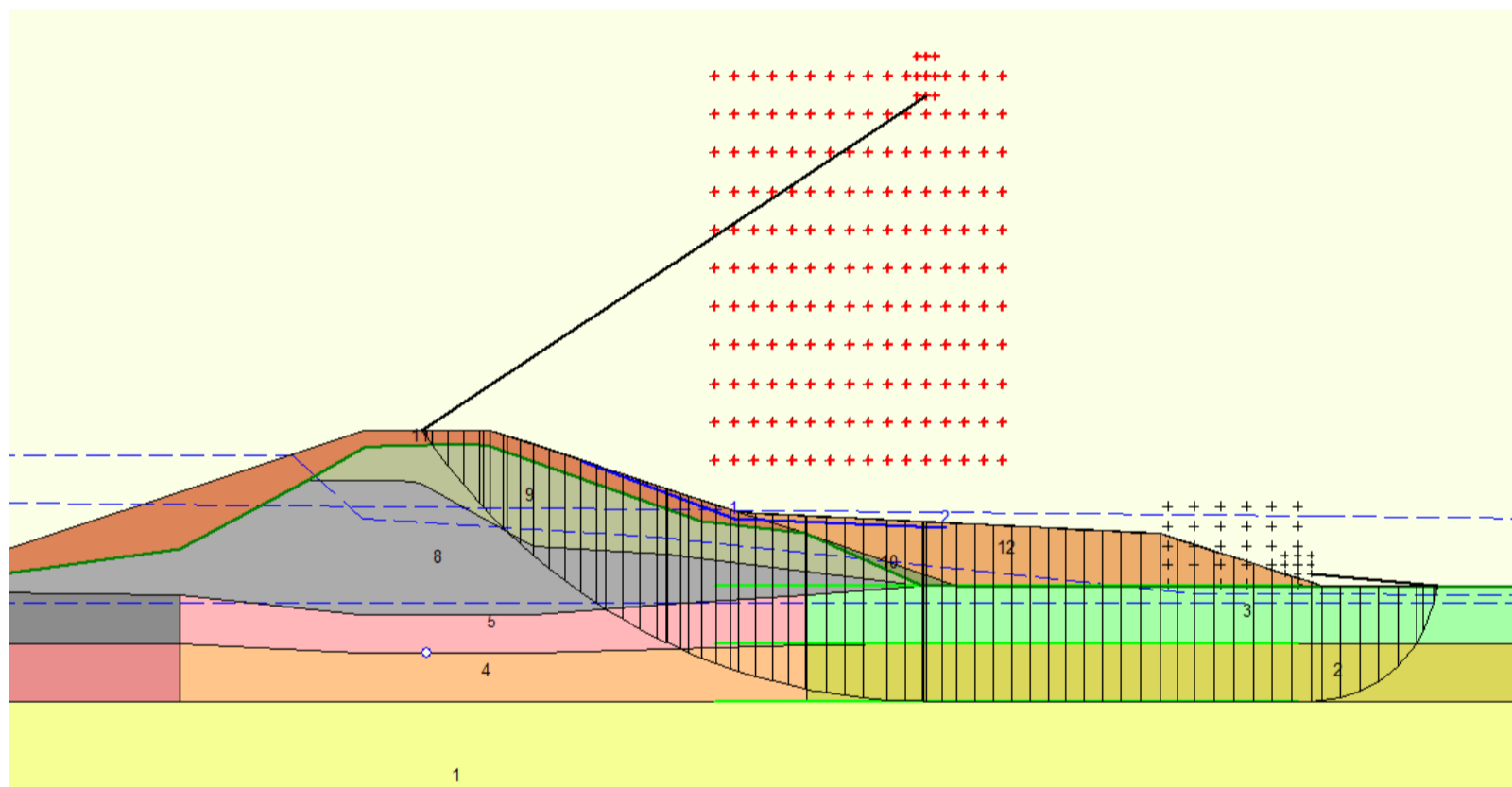
De stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd met D-Geostability versie 18.1 build 1.3.

Voor elk van de ontwerpkuinhoogtes is eerst gekeken hoe lang de steunberm moest zijn om te voldoen aan het scenario met de ontwerpwaterstand, zonder golfoverslag, en een toetswaarde van de stabiliteitsfactor van 1,50 (-) (zie paragraaf K.4).

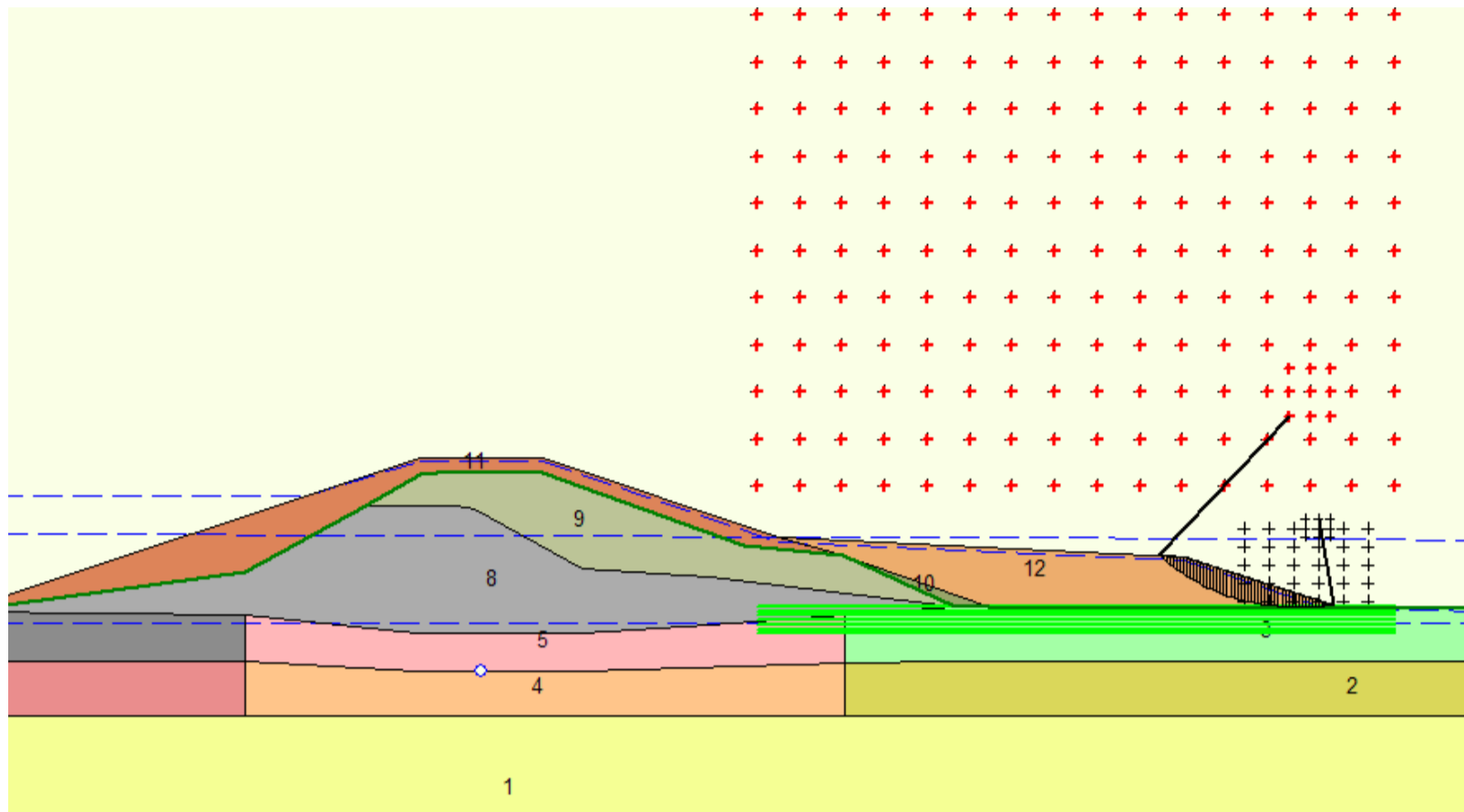
Met behulp van de optie ‘forbidden lines’ is ervoor gezorgd dat alleen grote glijvlakken, die door de bovenkant van het talud of de kruin gaan en direct een gevaar voor overstrooming geven, worden berekend. Kleine glijvlakken worden bij dit scenario niet getoetst aan de strenge eis van 1,50 (-).

Daarna is gekeken of met deze steunbermlengte ook wordt voldaan aan het scenario met golfoverslag en een lagere toetswaarde van de stabiliteitsfactor. In dit geval zijn de forbidden lines verwijderd, zodat minder diepe glijvlakken worden beoordeeld.

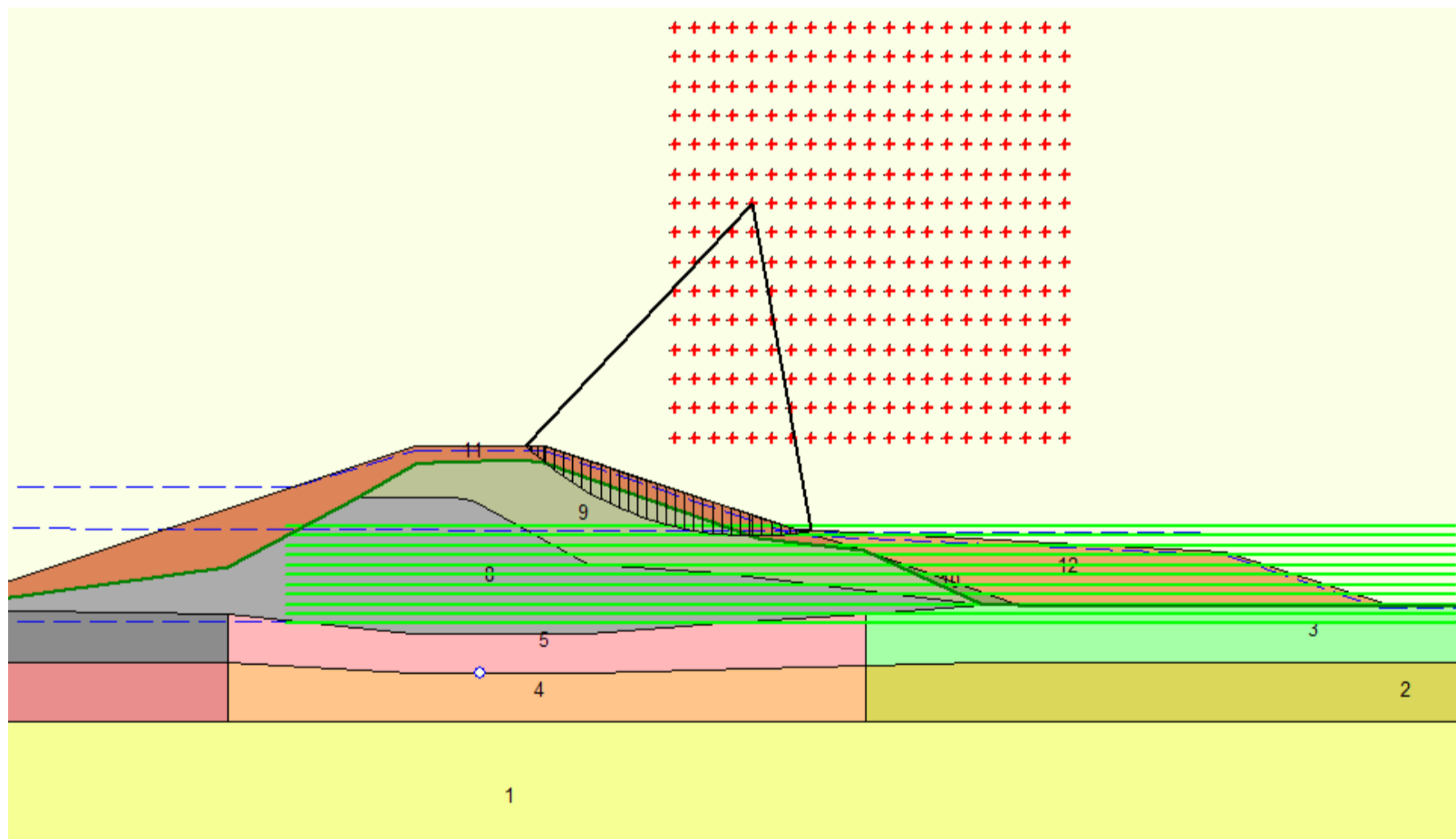
De kritische glijvlakken per scenario en per ontwerp kruinhoogte zijn gegeven in de navolgende figuren.



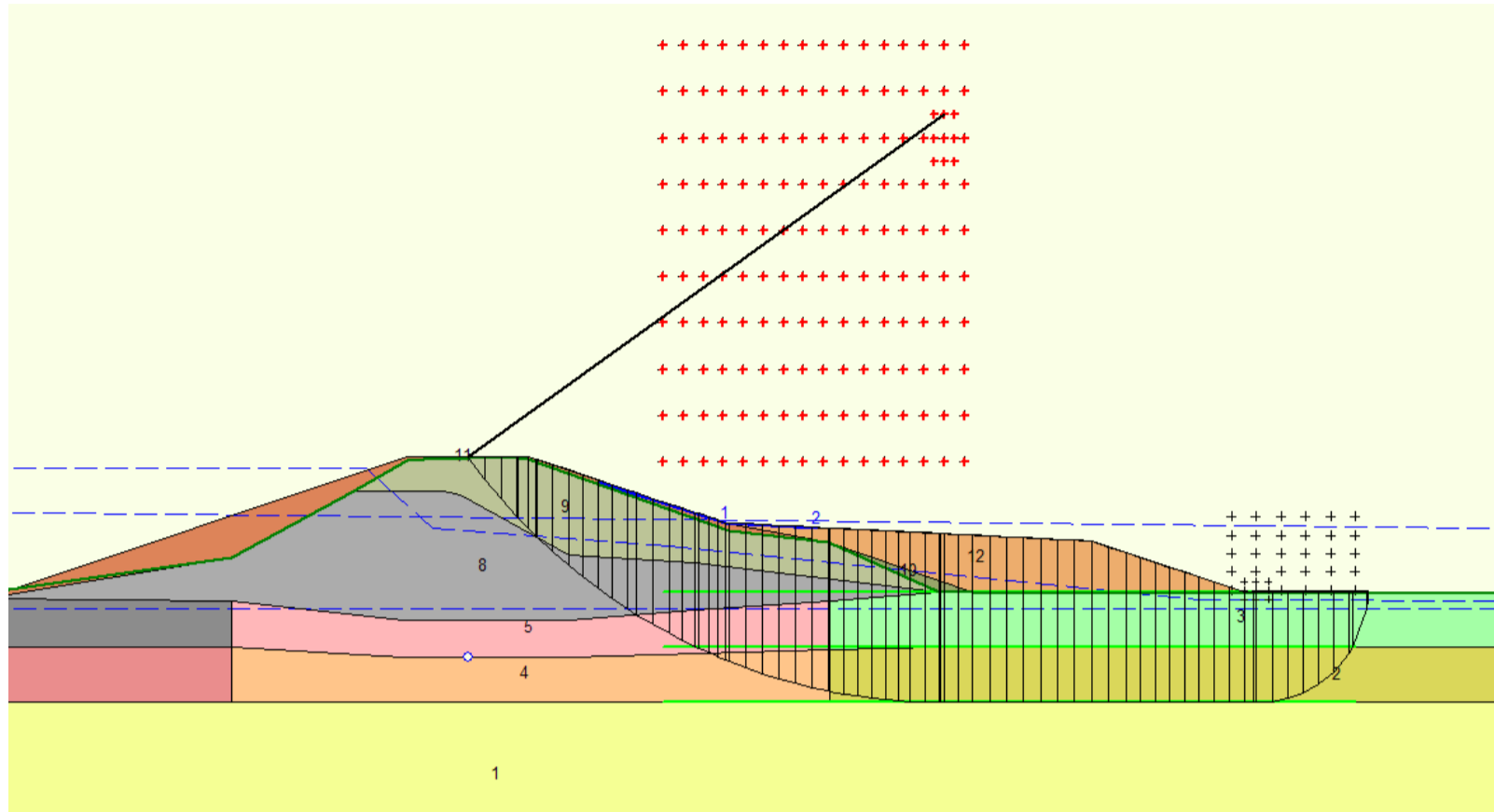
Figuur K.4 Kruinhoogte 1 l/s/m scenario zonder golfoverslag, berekende SF 1,55 (-)



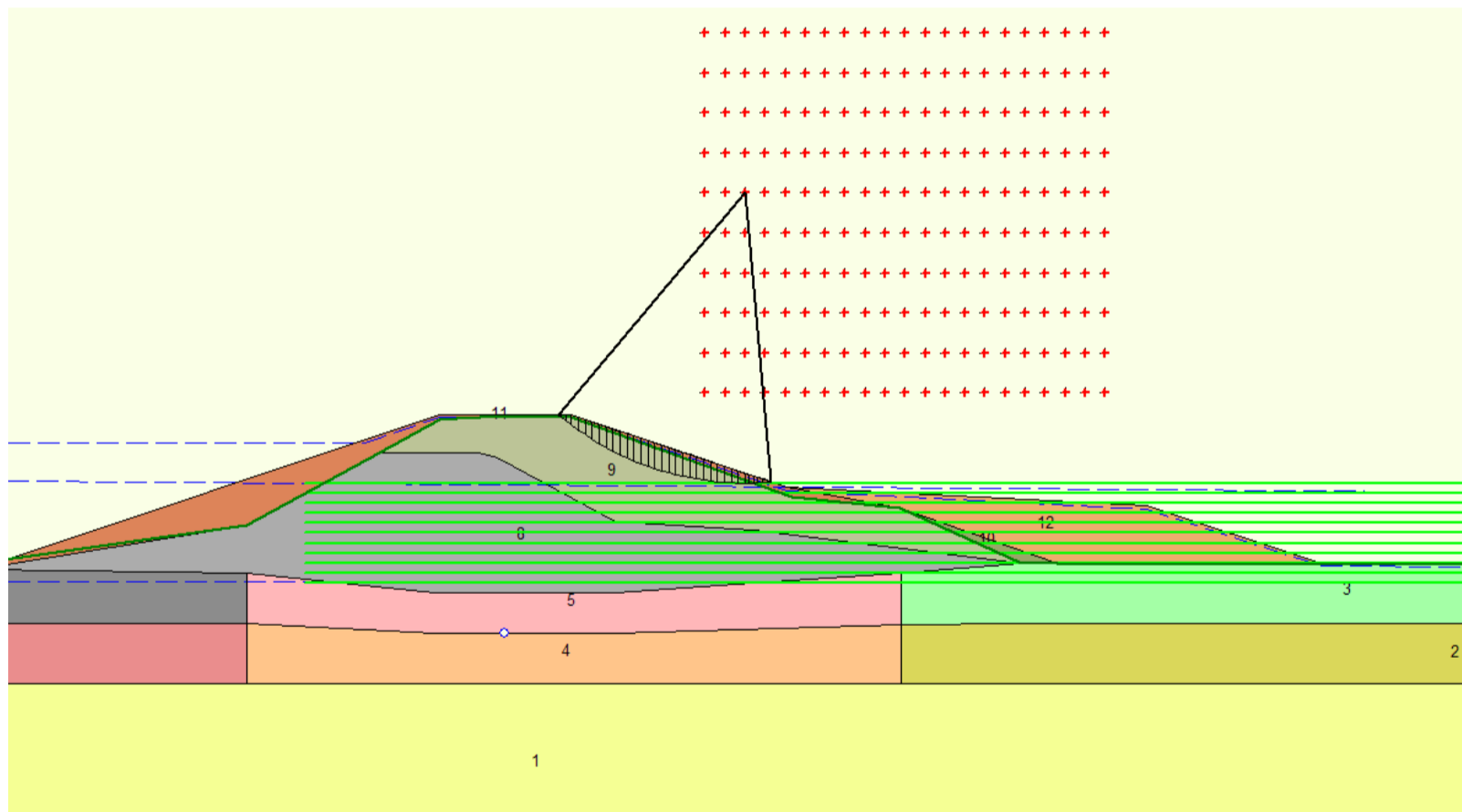
Figuur K.5 Kruinhoogte 1 l/s/m scenario met golfoverslag, berekende SF 0,99 (-), glijvlak door bermtalud



Figuur K.6 Kruinhoogte 1 l/s/m scenario met golfoverslag, berekende SF 0,88 (-) glijvlak door binnentalud



Figuur K.7 Kruinhoogte 10 l/s/m scenario zonder golfoverslag, berekende SF 1,54 (-)



Figuur K.8 Kruinhoogte 10 l/s/m scenario met golfoverslag, berekende SF 0,85 (-) glijvlak door binnentalud

De rekenresultaten zijn samengevat in Tabel K.3.

Tabel K.3 Samenvatting berekeningsresultaten

Kruinhoogte	Scenrio zonder golfoverslag		Scenario met golfoverslag
	Bermlengte (m)	SF (-)	SF (-)
NAP +11,6 m (1 l/s/m)	22	1,55 (norm 1,50)	0,88 (norm 0,93)
NAP +10,9 m (10 l/s/m)	20	1,54 (norm 1,50)	0,85 (norm 1,06)

Door de lagere kruinhoogte bij een ontwerp op 10 l/s/m is een iets minder lange stabiliteitsberm nodig. Dit scheelt voor deze case circa 10%, ofwel 2 m op een berm van 20 m. Hierbij wordt opgemerkt dat de hoogteligging van de berm constant is gehouden. Een iets hogere berm bij de hogere kruin kan mogelijk een beperkte optimalisatie in bermlengte opleveren.

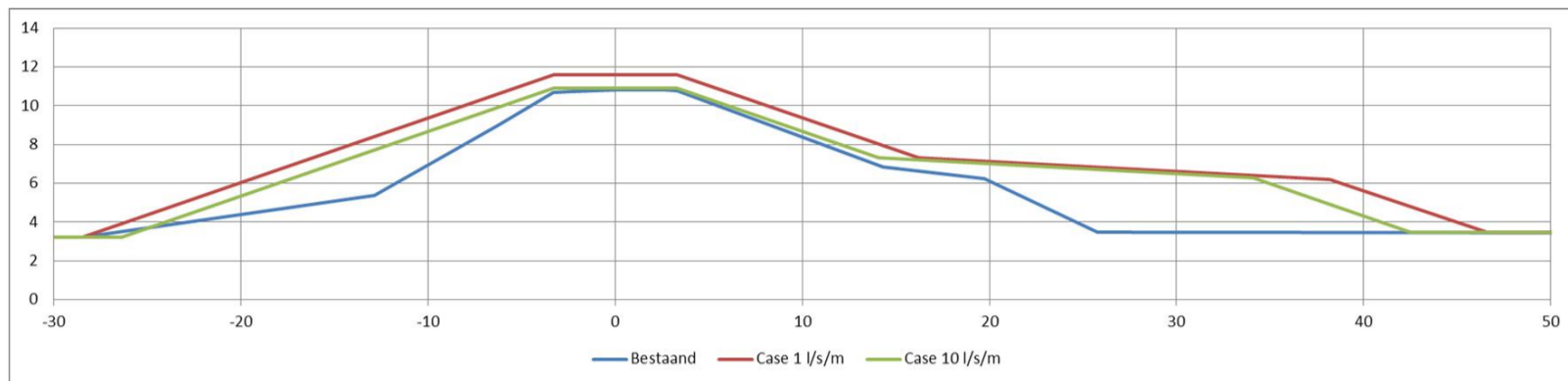
De controle bij het scenario met golfoverslag laat zien dat de berekende stabiliteitsfactor bij een taludhelling van 1:3 niet voldoet aan de voor dit scenario minder strenge norm voor de stabiliteitsfactor.

Het betreft in dit geval zeer ondiepe glijvlakken langs het binnentalud van de dijk. Doordat er geen cohesie wordt toegekend aan de klei in de dijk, is het talud gevoelig voor deze ondiepe glijvlakken in combinatie met een freatisch vlak langs het taludoppervlak.

Het is echter onwaarschijnlijk dat de schematisering van de schuifsterkte, zonder cohesie, terecht is voor ondiepe glijvlakken door kleidijken, indien het een klei is die kan worden geclassificeerd als 'stevige klei'. Voor diepe glijvlakken maakt enige cohesie niet veel verschil, echter voor deze ondiepe glijvlakken is cohesie, ofwel schuifsterkte bij lage spanningen, zeer bepalend. In het WBI2017 wordt voor het afschuiven van de bekleding van het binnentalud bij golfoverslag in de eenvoudige toets goedgekeurd indien de klei kan worden geclassificeerd als 'stevige klei' ([33]) en de taludhelling maximaal 1:3 is. Impliciet wordt er een cohesie aan deze klei toegekend van minimaal enkele kPa. Glijvlakken zijn in dit geval in de orde van 1 m diep, evenals in dit geval worden berekend.

Voor deze case wordt ervan uit gegaan dat ondiepe glijvlakken met voldoende zekerheid kunnen worden uitgesloten indien wordt uitgegaan van een taludhelling van 1:3 en de klei kan worden geclassificeerd als 'stevige klei'. Indien moet worden uitgegaan van 'schrane klei' dan moet het talud worden verflauwd naar 1:4, echter dit geldt voor zowel de ontwerpkuinhoogte bij 1 l/s/m als voor een ontwerpkuinhoogte bij 10 l/s/m.

Hiermee wordt het scenario met een hoge buitenwaterstand, zonder golfoverslag, maatgevend voor het ruimtebeslag van de dijk. De hoge ontwerpkuinhoogte (1 l/s/m) heeft een iets langere berm nodig dan de lagere ontwerp kuinhoogte (10 l/s/m) (zie Figuur K.9).



Figuur K.9 Ruimtebeslag in dwarsprofiel voor de bestaande situatie, case 1 l/s/m (hoge kruin) en case 10 l/s/m (lage kruin) getekend over het uitgangspunt van de case (blauwe profiel 'bestaand').

Het lijkt op het eerste gezicht contra-intuïtief dat een dijk die wordt ontworpen op een hoger golfoverslagdebiet vanuit stabiliteitsoverwegingen juist smaller kan zijn. In deze case pakt dit echter zo uit. De kruinhoogte maakt onderdeel uit van een aandrijvende kracht voor het glijvlak die in dit geval de doorslag geeft. Benadrukt wordt dat er is gestreefd naar representativiteit van het profiel en de ondergrond, echter dat de variatie in de realiteit groot is. Dit geldt zowel voor de ondergrond, als ook voor de keuze voor klei als versterking (zand met een kleibekleding is ook mogelijk) als ook de hydraulische belasting.