

Handreiking Dijkbekledingen

Deel 5: Grasbekledingen





Handreiking Dijkbekledingen

Deel 5: Grasbekledingen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat WVL en Projectbureau Zeeweringen
Datum	Januari 2015
Status	Definitief

Voorwoord

Inleiding en kader

Deze Handreiking Dijkbekledingen is opgesteld om de meest recente kennis, de state-of-the-art, vast te leggen over de in Nederland meest voorkomende typen dijkbekledingen. Die kennis kan gebruikt worden voor het ontwerp, de toetsing en het beheer en onderhoud ervan. Het betreft een vastlegging van de kennis over bekledingen op dijken, oevers en boezemkaden met als hoofdfunctie de bescherming tegen hoogwater, golven en stroming. Het is in principe bedoeld voor dijkbekleding op primaire waterkeringen (in Nederland), maar kan ook nuttig gebruikt worden in geval van bekledingen op andere typen dijken of oevers. Het rapport bevat ook criteria om het toepassen van nieuwe materialen als dijkbekleding mogelijk te maken (ondersteuning innovaties).

Aanleiding voor het opstellen van deze handreiking is enerzijds de noodzaak om de actuele kennis publiek bekend en toegankelijk te maken en anderzijds om de behoefte van het bedrijfsleven (innovators) en de beheerders van de waterkeringen te helpen aan een gids voor het ontwikkelen en accepteren van nieuwe (innovatieve) dijkbekledingstypen.

Dit rapport wordt uitgegeven als 'Handreiking' vanwege het feit dat op dit moment veel veranderingen plaats vinden.

- Zo wordt er een nieuw toetsinstrumentarium ontwikkeld, gebaseerd op overstromingskansen (in het programma WTI).
- Ook wordt gewerkt aan het herstructureren van de ENW Leidraden en Technische rapporten,
- En er wordt gewerkt aan een Ontwerpinstrumentarium.

Deze handreiking bevat de stand van de kennis tot en met 2013. Deze kennis heeft een kwaliteitsborging- en acceptatietraject gehad met de betrokkenheid van ENW. In het rapport is ook recentere kennis verwerkt (namelijk deel 4 "breuksteenbekledingen" en paragraaf 7.3.3. van deel 5 "grasbekledingen"). Ook deze kennis heeft een kwaliteitsborgingstraject gehad. De behandeling in ENW zal in het najaar van 2015 plaatsvinden.

Deze handreiking wordt binnenkort in de nieuwe structuur van ENW Leidraden en Technische Rapporten verwerkt..

Dit onderdeel van de Handreiking Dijkbekledingen betreft Deel 5: Grasbekledingen.

Structuur en samenhang

De Handreiking Dijkbekledingen bestaat uit vijf delen:

- Deel 1 : *Algemeen*
Deel 1 geeft de criteria aan voor de toepassing van (innovatieve) bekledingen op waterkeringen.
- Deel 2 : *Steenzettingen*
Deel 2 bevat de (technische) eisen en rekenregels ten behoeve van het ontwerp, de toetsing en het beheer en onderhoud van steenzettingen.
- Deel 3 : *Asfaltbekledingen*
Deel 3 bevat de (technische) eisen en rekenregels ten behoeve van

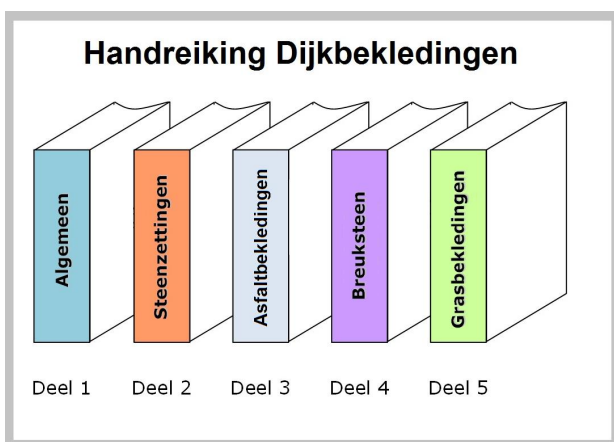
het ontwerp, de toetsing en het beheer en onderhoud van asfaltbekledingen.

Deel 4 : *Breuksteenbekledingen*

Deel 4 bevat de (technische) eisen en rekenregels ten behoeve van het ontwerp, de toetsing en het beheer en onderhoud van breuksteenbekledingen.

Deel 5 : *Grasbekledingen* (dit onderdeel)

Deel 5 bevat de rekenregels en achtergrond informatie ten behoeve van de toetsing van grasbekledingen.



De indeling van de Handreiking is per onderdeel verschillend:

Deel 1 heeft een eigen indeling op basis van de eisen vanuit wetgeving en vanuit de functies van de bekleding;

Deel 2 t/m 4 zijn opgesteld als 'gebruiksdocument', vanuit het perspectief van de gebruiker. Hiervoor is een duidelijke scheiding tussen toepassingen (ontwerp, toetsen en B&O) en achtergrondinformatie doorgevoerd. Achtergrondinformatie is in deze handreiking alleen op hoofdlijnen gegeven met verwijzingen naar onderliggende (onderzoek) rapportages. *Deel 2 t/m 4* is opgebouwd uit een leeswijzer en vier katernen: ontwerp, toetsen, beheer & onderhoud en algemene informatie.

Deel 5 is gebaseerd op het rapport 'Toetsen Grasbekledingen op Dijken', opgesteld in het kader van het onderzoekprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW). Omdat de achtergrondinformatie en achtergronden van het onderzoek zijn opgenomen in het document heeft *deel 5* hierdoor een afwijkende indeling. Ondanks deze andere opbouw is dit onderdeel opgenomen in de Handreiking Dijkbekledingen ten einde alle veelvoorkomende typen bekledingen aan bod te laten komen..

Totstandkoming Handreiking Dijkbekledingen

De Handreiking Dijkbekledingen is grotendeels opgesteld op basis van beschikbare kennis en documenten tot en met 2013:

Deel 1 : *Algemeen* is integraal gebaseerd op het rapport:

- *Criteria voor toepassing van bekledingen op waterkeringen.*

Hulpmiddel voor ontwikkeling van innovatieve dijkbekledingen [29].

- Deel 2 : *Steenzettingen* is onder andere gebaseerd op onderdelen van:
- het *Technisch Rapport Steenzettingen* [28];
 - de *Documentatie Steentoets2014* [31]
 - overige *literatuur* zoals opgenomen in de literatuurlijst Deel 2.
- Deel 3 : *Asfaltbekledingen* is onder andere gebaseerd op onderdelen van:
- het *Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren* [33];
 - de *State of de Art Asfaltdijkbekledingen* [34];
 - overige *literatuur* zoals opgenomen in de literatuurlijst Deel 3.
- Deel 4 : *Breuksteenbekledingen* is onder andere gebaseerd op teksten uit:
- het *Technisch Rapport Steenzettingen* [28];
 - overige *literatuur* zoals opgenomen in de literatuurlijst Deel 4.
- Deel 5 : *Grasbekledingen* (dit onderdeel) is vrijwel gelijk aan de '*Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde*' en is gebaseerd op:
- het onderzoeksrapport *Toetsen Grasbekledingen op Dijken* [32].

Deel 5: *Grasbekledingen* (dit onderdeel) is tot stand gekomen mede door:

Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat (WVL en Projectbureau Zeeweringen)	
Opgesteld door	Jentsje van der Meer André van Hoven Maurice Paulissen Gosse Jan Steendam Henk Verheij Gijs Hoffmans Gerard Kruse	Van der Meer Consulting Deltares Alterra Infram Deltares Deltares Deltares
Kwaliteitsborging	SBW Reviewteam Dijken Henk Jan Verhagen (<i>voorzitter</i>)	TU Delft
	ENW Werkgroep Techniek Peter van der Berg (<i>voorzitter</i>)	Deltares

Inhoudsopgave (deel 5: Grasbekledingen)

Voorwoord

1	Inleiding	1
1.1	Kader en doel van dit rapport	1
1.2	Achtergrond	1
1.3	Tot standkoming	1
1.4	Leeswijzer	1
2	Definities	3
2.1	Definities belastingzones en belastingregimes	3
2.2	Golfoverslag en overloop	4
2.3	Definitie grasbekleding	4
2.4	Definitie falen toplaag en reststerkte	6
2.5	Begrippen	7
3	Grasbekleding op binnen en buitentalud	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Beschrijving vegetatie-eigenschappen	9
3.3	Beschrijving grond	11
3.3.1	Cementatie	11
3.3.2	Klei	12
3.3.3	Zand	14
3.4	Beheer grasbekleding	15
3.4.1	Inleiding	15
3.4.2	Beheer	16
3.4.3	Dagelijks beheer en te vermijden situaties	20
3.4.4	Graafgangen	22
3.5	Aanleg van een grasbekleding	23
3.6	Verbetering van een grasbekleding	25
4	Hydraulische belasting	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Golfoverslag	27
4.2.1	Gemiddeld overslagdebiet	27
4.2.2	Differentiatie van gemiddeld golfoverslagdebiet naar golfhoogte	28
4.2.3	Verdeling van golfoverslagvolumes afhankelijk van overslagdebiet en golfhoogte	31
4.2.4	Hydraulische belasting bij golfoverslagproeven	32
4.2.5	Stroomsnelheid en laagdikte op het binnentalud	34
4.2.6	Hydraulische belasting bij afschuiven bekleding binnentalud	37
4.3	Golfklappen	38
4.4	Golfoploop	40
5	Faalmechanismen grasbekleding	43
5.1	Inleiding	43
5.2	Kruin en binnentalud- golfoverslag	43
5.2.1	Uittrekmechanisme	43
5.2.2	Slijterosie	44
5.2.3	Jet erosie	46

5.2.4	Afstropen	46
5.2.5	Head-cut erosie	47
5.2.6	Afschuiven bekleding binnentalud	49
5.3	Buitentalud	51
5.3.1	Inleiding	51
5.3.2	Erosie door golfklappen	52
5.3.3	Afschuiven bekleding buitentalud	53
5.4	Invloed toelaten overslag op andere faalmechanismen	53
5.4.1	Microstabiliteit	53
5.4.2	Macrostabiliteit binnenwaarts	54
5.4.3	Piping	54
6	Modellen	55
6.1	Inleiding	55
6.2	Erosie grasbekleding binnentalud bij golfoverslag	55
6.2.1	Karakterisering belasting	55
6.2.2	Kritische snelheid	56
6.2.3	Cumulatieve overbelasting	57
6.2.4	Uitwerking voor verschillende golfhoogten	59
6.2.5	Cumulative overslagbelasting in praktische grafieken	59
6.2.6	Criterium voor cumulatieve overslagbelasting	63
6.3	Afschuiven grasbekleding binnentalud bij golfoverslag	65
6.3.1	Afbakening belasting en geometrie	65
6.3.2	Waterspanningsopbouw als gevolg van golfoverslag	65
6.3.3	Stabiliteitmodellen	70
6.4	Erosie grasbekleding buitentalud door golfklappen	70
6.4.1	Inleiding	70
6.4.2	Karakterisering sterkte	70
6.4.3	Standtijdmodel	72
6.5	Erosie grasbekleding buitentalud door golfoploop	74
7	Handreiking beoordeling grasbekleding	77
7.1	Inleiding	77
7.2	Beoordeling grasbekleding in de Beheerdersoordeel	78
7.3	Erosie buitentalud	78
7.3.1	Stap 1: Eenvoudige toetsregels	78
7.3.2	Stap 2: Gedetailleerde toetsregels	80
7.3.3	Stap 3: Geavanceerde toetsing	81
7.4	Afschuiving buitentalud	83
7.4.1	Stap 1: Eenvoudige toetsregels	83
7.4.2	Stap 2: Gedetailleerde toetsregels	84
7.5	Erosie kruin en binnentalud	84
7.5.1	Stap 1: Eenvoudige toetsregels	84
7.5.2	Stap 2: Gedetailleerde toetsregels	86
7.6	Afschuiving binnentalud	87
7.6.1	Stap 1: Eenvoudige toetsregels	87
7.6.2	Stap 2: Gedetailleerde toetsregels	87
7.7	Geavanceerde analyse van een grasbekleding	88
7.7.1	Erosie door golfoverslag	88
7.7.2	Afschuiven bij golfoverslag	89
7.7.3	Erosie door golfklappen	90

8 Niet waterkerende objecten en discontinuïteiten	91
8.1 Stromingsconcentraties langs objecten	91
8.2 Stroming rond niet goed beheerbare delen	93
8.3 Overgangen/discontinuïteiten	94
9 Literatuur	97
10 Hydraulische randvoorwaarden en belastingen	99
 Bijlage(n)	
A Begrippenlijst	A-1
B Samenvatting kengetallen en resultaten golfoverslagproeven	B-1
C Fotobijlage golfoverslagproeven	C-1
D Validatie cumulatieve overslagbelasting met uitgevoerde proeven	D-1
E Kwaliteit graszode voor erosiemodel in golfoploopzone [23]	E-6
F Erosiebestendigheid klei in de zode voor erosiemodel in golfoploopzone [23]	F-1
G Samenvatting benodigde parameters	G-1

1 Inleiding

1.1 Kader en doel van deze handreiking

Deze handreiking is uitsluitend bedoeld als hulpmiddel voor de waterkeringsbeheerder t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde.

De toetsing van de waterkeringen in de verlengde toetsronde vindt plaats op basis van het vigerende toetsinstrumentarium: het VTV2006. Voor het toetsen van grasbekledingen op dijken is echter nieuwe kennis beschikbaar die kan helpen bij het komen tot een veiligheidsoordeel in die gevallen waar dit volgens het VTV2006 niet mogelijk was. Deze handreiking geeft handvatten om gebruik te kunnen maken van deze nieuwe inzichten m.b.t. het toetsen van grasbekledingen. Omdat deze nieuwe kennis nog niet in Technische Rapporten is vastgelegd, kunnen de toetsregels uit deze handreiking alleen gebruikt worden bij het opstellen van het beheerdersoordeel.

1.2 Achtergrond

Dit rapport is voortgekomen uit de resultaten van een vier jaar durend destructief onderzoek naar de erosiebestendigheid van binnentaluds onder golfoverslagbelasting. Dit onderzoek is onder andere uitgevoerd met de golfoverslagsimulator.

In het onderzoek is kennis ontwikkeld over de wijze waarop golfoverslag de grasbekleding van een binnentalud van een waterkering beïnvloedt. Voorheen werd in de beoordeling van grasbekledingen op het binnentalud het pulserende karakter van golfoverslag niet meegenomen. Het project heeft geleid tot inzichten in verschillende erosiemechanismen. In dit rapport is al deze kennis verwoord en verbeeld.

Verder is de laatste stand van zaken ten aanzien van de kennis van het gedrag van grasbekledingen in de golfklapzone opgenomen in dit rapport. Deze kennisontwikkeling is aanvankelijk parallel aan het genoemde SBW onderzoek uitgevoerd, maar is uiteindelijk gedeeltelijk opgenomen in dit rapport.

1.3 Tot standkoming

Het onderzoek naar de sterkte van grasbekledingen is een van de deelprojecten van het programma "Sterkte en Belastingen Waterkeringen" (SBW). Dit programma richt zich op de kennisontwikkeling van de wisselwerking tussen belasting (hydraulische randvoorwaarden) en sterkte (de bestendigheid van waterkeringen tegen een faalmechanisme).

Aan het onderzoek naar grasbekledingen op het binnentalud bij golfoverslag is in de afgelopen jaren meegewerkt door mensen van verschillende partijen: Van der Meer Consulting, Infram, Alterra, Royal Haskoning en Deltares. Deze handreiking is gebaseerd op het onderzoeksrapport Toetsen Grasbekledingen op Dijken, Deltares mei 2012.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is opgebouwd als volgende:

- Hoofdstuk 2 bevat de definitives;
- Hoofdstuk 3 bevat de beschrijvingen van de onderdelen van een grasbekleding;
- Hoofdstuk 4 bevat de hydraulische belasting op een grasbekleding;
- In hoofdstuk 5 worden de verschillende faalmechanismen beschreven, vooral aan de hand van waarnemingen tijdens grootschalige golfoverslagproeven;

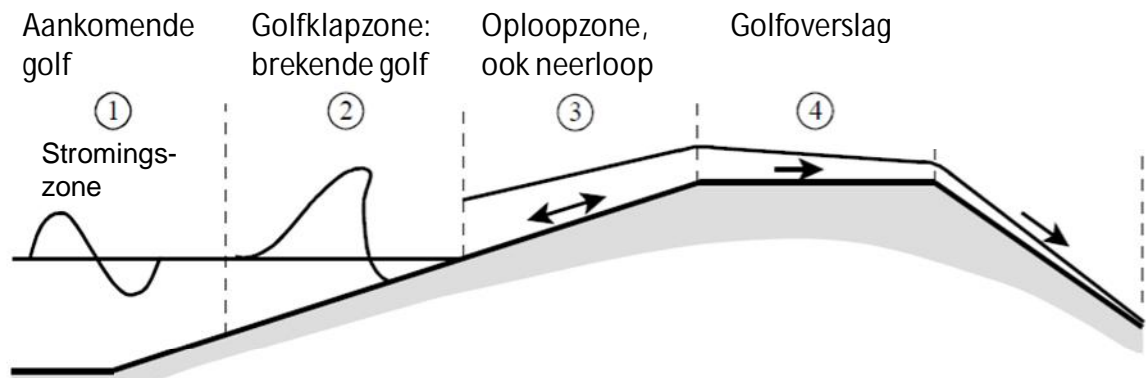
- In hoofdstuk 6 worden gedrags- en schademodellen beschreven met betrekking tot gedrag van grasbekledingen onder hydraulische belasting;
- In hoofdstuk 7 wordt de toepassing van de modellen vertaald naar toetsregels;
- Hoofdstuk 8 laat op kwalitatieve wijze zien wat het effect van objecten is bij grote hoeveelheden overslag. Het onderzoek naar grasbekledingen is nog niet zover gevorderd dat ook hiervoor gevalideerde modellen konden worden opgenomen.

2 Definities

2.1 Definities belastingzones en belastingregimes

Grasbekledingen op dijken kunnen zich in verschillende belastingzones bevinden (Figuur 2.1):

- 1 Stromingszone (beneden de golfklapzone)
- 2 Golfklapzone
- 3 Golfoploopzone
- 4 Golfoverslagzone, binnenwaarts van de buitenkruinlijn.



Figuur 2.1 Schematisering van het hydraulisch proces van het breken van een golf, het op- en neerlopen en het eventueel over de kruin slaan van een golf wat leidt tot de definitie van de verschillende belastingzones.

De meeste rivierdijken hebben voor het grootste deel een grasbekleding. Alleen daar waar hydraulische belastingen te groot worden, zoals meestal op de zee- en meerdijken, of waar het gras niet kan groeien, is de grasbekleding vervangen door een sterkere bekleding, zoals een steenbekleding, asfalt of een breuksteenbestorting.

De hydraulische belasting bestaat voornamelijk uit golfaanval:

- Golfklappen, golfoploop en golfoverslag op dijken die ook onder het maatgevend hoogwater uit gras bestaan (meeste rivierdijken)
- Golfoploop en golfoverslag op dijken die alleen boven het maatgevend hoogwater uit gras bestaan (meeste zee- en meerdijken)

Bij maatgevend hoogwater op de rivieren komt ook een behoorlijke stroming voor (zone 1 Stromingszone, welke tot dichtbij de kruin kan komen), maar aangenomen wordt dat dit in de praktijk geen problemen oplevert. Alleen voor geprononceerde schaarndijken, kan het mogelijk zijn dat extra aandacht moet worden besteed aan de bekleding.

Bij zee- en meerdijken is het een zeer extreme storm, die zorgt voor een maatgevende waterstand (stormvloed) met bijbehorende golfhoogte en golfperiode. Tijdens die omstandigheid zal het ongekend hard waaien. Dit is heel anders in het rivierengebied. In het bovenrivierengebied is het de maatgevende afvoer die voor een zeer hoge waterstand zorgt, die vrij dicht bij de kruin van de dijk ligt. De maatgevende golven die bij deze afvoer kunnen voorkomen, worden waarschijnlijk veroorzaakt door normale stormomstandigheden met

bijvoorbeeld windkracht 5 of 6. De golven in het bovenrivierengebied zijn dan ook relatief klein ten opzichte van die voor zee- en meerdijken. De kans dat een superstorm samenvalt met een maatgevend rivierhoogwater is uiterst klein.

Er zijn dus twee verschillende omstandigheden die voor een maatgevende golfbelasting op dijken zorgen: een storm-bepaalde en een rivierafvoer-bepaalde omstandigheid. In het benedenrivierengebied is het mogelijk dat beide omstandigheden optreden (maar niet tegelijkertijd) en een van beide zal dan maatgevend zijn.

2.2 Golfoverslag en overloop

Bij overlopen is de waterstand hoger dan de dijk. Bij golfoverslag is de waterstand lager dan de dijk en slaan golven over de dijk.

Golfoverslag wordt gegeven als een gemiddeld debiet per strekkende meter breedte, q , bijvoorbeeld in l/s per m. De golfoverslag wordt berekend ten opzichte van de hoogte van de buitenkruinlijn en er wordt van uitgegaan dat deze overslag ook de achterkant van de kruin en het binnentalud bereikt. In werkelijkheid gaat er bij golfoverslag niet een constant debiet over de kruin van een waterkering. De hoogste golven zullen in korte tijd, korter dan een golfperiode, een grote hoeveelheid water over de kruin laten lopen. Lagere golven zullen helemaal geen overslag geven.

Voor Nederlandse zee- en meerdijken geldt dat overlopen van deze dijken, die tot de primaire waterkeringen behoren, niet mogelijk is, tenzij ontwerp- of toetswaterstanden enorm worden overschreden. Overlopen is dan ook een hydraulische belasting die niet hoeft te worden beschouwd. Zee- en meerdijken zijn, vanwege golfoploop, zo ontworpen dat er een groot hoogteverschil zit tussen de maatgevende waterstand en de kruin. Bij een "superstorm", of nog veel erger, zal de waterstand dan ook nooit de kruin bereiken.

Ook bij rivieren is overlopen in Nederland vrijwel onmogelijk, omdat er rekening wordt gehouden met een waakhoogte van 0,5 m of een vrije kruinhoogte van meer dan 0,5 m als dat nodig is in verband met golfoploop en het toelaatbare overslagdebiet. Alleen bij een extreme overbelasting kan overlopen optreden. Uitzondering hierop vormen de Maaskaden die worden gedimensioneerd op overlopen.

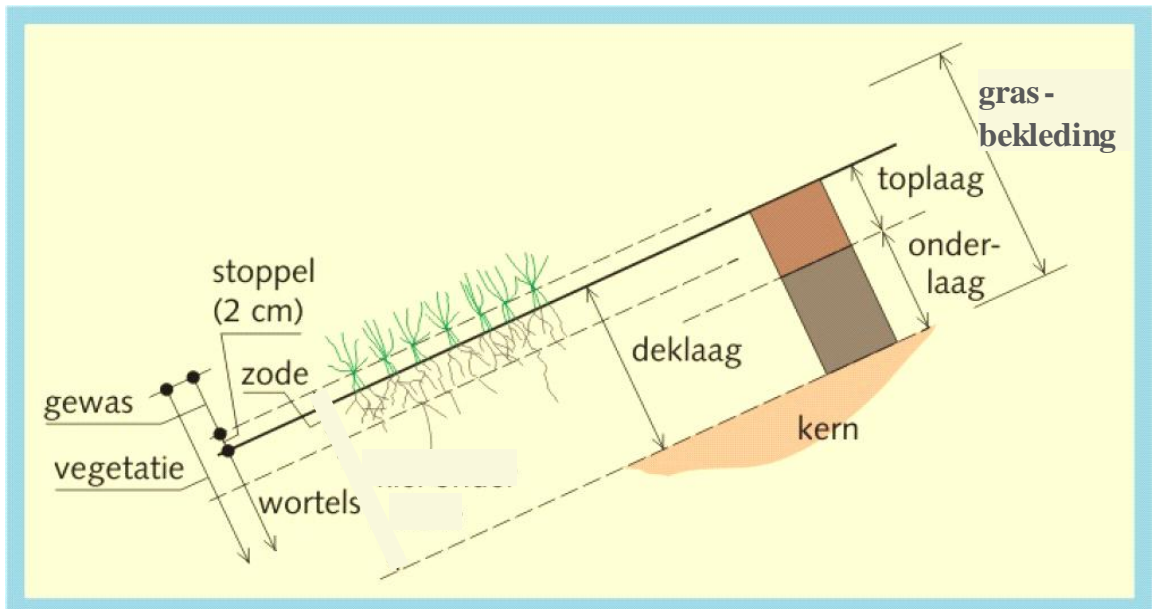
2.3 Definitie grasbekleding

Een grasbekleding op een dijk bestaat uit een graslandvegetatie die is geworteld in grond, namelijk in de deklaag, zie Figuur 2.2. De vegetatie bestaat bovengronds uit de stoppel en het gewas en ondergronds uit wortels. In de vegetatie kunnen, naast veel grassen, ook kruidachtige gewassen aanwezig zijn. Door de wijze van onderhoud voorkomt men de vestiging van houtige gewassen en hoog opschietende ruigtekruiden. Voor het beoordelen van de erosiebestendigheid wordt de volgende onderverdeling van de grasbekleding gehanteerd, zie Figuur 2.2:

Toplaag Het doorwortelde deel van de deklaag, bestaande uit substraat (klei, zand) plus wortels; de dikte wordt gesteld op ongeveer 0,2 m; de graszode is onderdeel van de toplaag, maar ook het minder doorwortelde deel onder de graszode hoort tot de toplaag.

Onderlaag Het nauwelijks doorwortelde deel van de deklaag, onder de toplaag gelegen. De wortels zijn zeer belangrijk voor de erosiebestendigheid van de toplaag en spelen

nauwelijks meer een rol in de onderlaag. Als er een duidelijke bekledingslaag op een (zand)kern is aangebracht, dan is de dikte van die laag bekend en daarmee ook de dikte van de onderlaag. Als de dijk volledig uit klei bestaat, dan is er geen definitie van de dikte van de onderlaag beschikbaar.



Figuur 2.2 Opbouw en indeling van de grasbekleding

Op basis van waarnemingen van het erosieproces van de grasbekleding bij grootschalige golfoverslagproeven is gebleken dat de eerdere definitie van graszode (zie Bijlage A begrippenlijst) en onderlaag geen recht deed aan het verloop van het erosieproces. Na verwijdering van delen van de zode bleek de nog doorwortelde laag vlak onder de zode, behorend bij de toplaag, zeer erosiebestendig. Pas op het moment dat ook de doorwortelde laag, zoals nu gedefinieerd als onderdeel van de 'toplaag', werd doorbroken door het erosieproces, ging de erosie van de onderlaag sneller. Illustratief voor de sterkte van de doorwortelde zone, behorend tot de toplaag, zijn de foto's in Figuur 2.3 en Figuur 2.4.



Figuur 2.3 Golfoverslagproef Afsluitdijk. Vroegtijdig afstropen van gras, maar een zeer erosiebestendige toplaag.



Figuur 2.4 Golfoverslagproef Vechtdijk. Afstropen van gras van een zanddijk, waarna nog een sterke doorwortelde en gecementeerde (zie paragraaf 3.3.1) toplaag overbleef

In de golfklapzone is de belasting intensiever en anders van aard, waardoor ook het bezwijken van de grasbekleding anders verloopt dan in de golfoploopzone en bij golfoverslag. Uit waarnemingen van schadegevallen in de praktijk en bij Deltagootproeven blijkt dat na het ontstaan van schade aan de zode, het restant van de toplaag vrij snel wordt verwijderd door golfklappen. Er is veel minder tijdverschil tussen het bezwijken van de zode en dat van de toplaag. De relatief losjes in elkaar passende aggregaten die worden samengehouden door wortels onder de zode zijn veel beter bestand tegen langsstroming door golfoverslag of golfop- en neerloop, dan tegen golfklappen.

2.4 Definitie falen toplaag en reststerkte

De erosiebestendigheid van een grasbekleding wordt primair bepaald door de sterkte van de toplaag. Als deze faalt, dan wordt de reststerkte van de onderlaag aangesproken.

Falen van de toplaag in het geval van golfoverslag en golfoploop, en daarmee het moment waarop de reststerkte bij golfoverslag wordt aangesproken, treedt op als aan één of aan beide van de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- 1 De erosiediepte wordt groter dan de toplaagdikte van 0,2 m.
- 2 Een gatafmeting dieper dan de toplaagdikte van 0,20 m van maximaal 0,15 m x 0,15 m wordt als gevolg van de belasting groter.

Ad 1) De graszode en een gedeelte van de toplaag mag zijn beschadigd en kan zelfs over grote oppervlaktes zijn verwijderd. Het resterende deel van de toplaag bevat nog wortels die het restant van de toplaag goed bij elkaar houdt. Bij deze beschrijving bezit de toplaag nog sterkte en faalt nog niet. Wordt de erosiediepte groter dan de toplaagdikte van 0,2 m dan faalt de toplaag wel.

Ad 2) Op een beperkt oppervlak van maximaal 0,15 m bij 0,15 m mag een gat in de toplaag aanwezig zijn, zonder dat de toplaag faalt. De golfoverslagproeven hebben namelijk laten zien dat de stroming weinig grip heeft op deze kleine beschadigingen. Zo een kleine beschadiging kan bijvoorbeeld gebeuren door het wegslaan van een paaltje bij een groot

overslagvolume of bij een kleine initiële schade bijvoorbeeld door een molgang. De toplaag faalt dan nog niet. Indien het gat in de toplaag echter groter wordt, dan faalt de toplaag wel.

In de golfklapzone op het buitentalud verloopt de ontwikkeling van schade anders dan bij golfoploop en golfoverslag, vanwege de hogere intensiteit en andere aard van de belasting. Na het falen van de zode wordt de toplaag vrij snel verwijderd. Uit waarnemingen van schadegevallen in de praktijk en Deltagootonderzoek blijkt dat in dit geval moet worden uitgegaan van een schadediepte die vrij snel na het falen van de zode 0,3 m bereikt. Dit is dus meer dan de dikte van de toplaag.

2.5 Begrippen

In bijlage A is een begrippenlijst opgenomen.

3 Grasbekleding op binnen en buitentalud

3.1 Inleiding

Uit de hoofdfunctie van een waterkering volgt een functie voor de grasbekleding: de eerste bescherming van het dijklichaam tegen erosie bij belasting door golven en/ of stroming.

Een grasbekleding bestaat uit vegetatie, gras met of zonder kruiden, en grond. De eigenschappen van deze elementen worden hierna beschreven in het licht van de erosiebestendigheid. Hierbij wordt tevens ingegaan op het beheer en de aanleg van een grasbekleding. De beoordeling van de grasbekleding ten aanzien van de verschillende faalmechanismen komt in de volgende hoofdstukken aan de orde.

3.2 Beschrijving vegetatie-eigenschappen

Grasland, gras met of zonder kruiden, is voor veel omstandigheden een geschikte dijkbekleding gebleken. Waarnemingen wijzen erop dat met name de zode, het wortelstelsel juist onder het maaiveld, belangrijk is voor de erosiebestendigheid en dat daarnaast het grasblad enige oppervlaktebescherming biedt. De graszode houdt grond bij elkaar en biedt bescherming tegen ontgroning door golven en stroming. De zode van de grasbekleding moet voldoende gesloten zijn om bescherming tegen erosie te bieden.

De vegetatie vormt met zijn substraat een erosieremmende eenheid. De doorworteling van de grasbekleding kan in drie dieptezones worden ingedeeld, te weten:

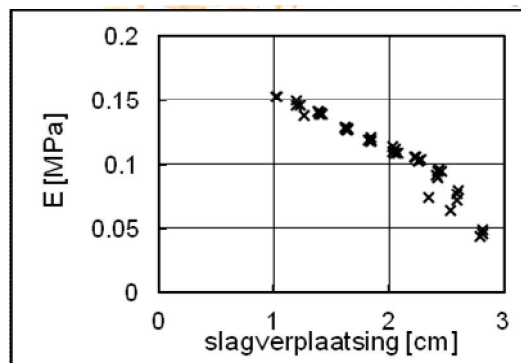
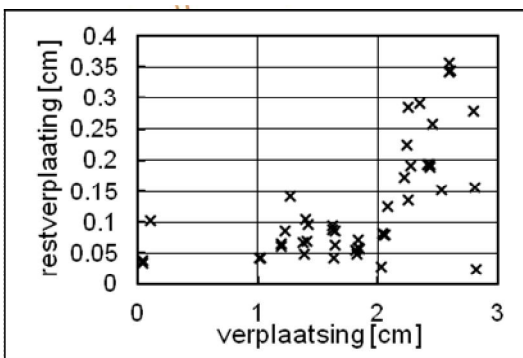
- a. zone met dicht wortelnet (zode), veelal van het terreinoppervlak tot circa 5 cm diepte, waarvan een eerste vorm binnen 1 jaar na aanleg aanwezig is;
- b. zone met een wortelnet van met het oog goed herkenbare en stevige wortels (diameter > 150 μm) met een dichtheid van zo'n 3 – 10 wortels / dm^2 , veelal tot 0.2 – 0.4 m beneden terreinoppervlak en die al na 1 – 2 jaar na aanleg grotendeels ontwikkeld is;
- c. zone van met het oog goed herkenbare wortels met een dichtheid met 0.5 - 2 wortels / dm^2 , welke zone soms tot meer dan 1 m diep is in een voldragen graszode op klei.

De eerste twee zones bevinden zich in de toplaag (Paragraaf 2.3). De overgangen tussen de zones is vaak geleidelijk en hangt samen met de details van het voorkomen van zandiger en kleiiger laagjes en insluitingen en, beneden ongeveer 0,3 m, met de ligging van de wat grotere scheuren in de grond. De wortels beneden ongeveer 0,3 m diepte hebben een voorkeur voor plekken in de grond waar zowel vocht nageleverd wordt (nabijheid van kleiinsluitingen in zandige grond bijvoorbeeld) als voldoende doorluchting is (zoals langs spleetjes in klei).

Behalve wortels is er nog veel ander leven in en onder de zode, dat een klein maar complex ecosyteem vormt. In die zeer actieve laag is er een dynamisch evenwicht tussen velerlei organismen (plantenwortels, bacteriën, schimmels, insecten, wormen en de wat grotere dieren) dat zich aan de seizoenen aanpast. De grond in de zode is door de groeiende, afstervende en gravende organismen voortdurend in beweging. Waar dit leven beperkt wordt door extreme omstandigheden (te zout, te droog, te nat, te weinig doorluchting) kan zich geen voldoende dichte en hechte zode vormen of in stand blijven.

De functie van de wortels in het beperken van erosie van grond betreft voornamelijk het bijeenhouden van losse gronddeeltjes en -kluitjes. Daarnaast scheiden de wortels stoffen af die gronddeeltjes aaneenkleven (cementerend) en beïnvloeden ze de directe omgeving zodanig dat de grond op gronddeeltjesschaal stevig wordt. In grond treden door directe en indirecte werking van wortels lokaal (korreloppervlakteschaal) chemische en fysische omstandigheden op, waardoor relatief stabiele kluitjes ontstaan, die door wortels bijeen kunnen worden gehouden. Het onttrekken van vocht aan de grond door graswortels veroorzaakt mede dat massieve cohesieve grond breekt en in brokjes uiteenvalt. De wortels duwen vervolgens de grond langs de breukjes uiteen. Ook zandkorrels kunnen door een dicht wortelnetwerk bijeengehouden worden, waarbij enige cementatie tussen de zandkorrels de effectiviteit van de wortels tegen een erosieve belasting sterk verhoogt.

Graszoden zijn gebleken elastisch te zijn en grote vervormingen aan te kunnen zonder te scheuren. De vervormingen kunnen door de graszode worden opgevangen, waarbij de grond in de zode, als in een wapeningnet, op zijn plaats wordt gehouden. Voortdurende belasting kan echter door vermoeiing leiden tot geheel of deels bezwijken van de zode, zoals onder andere wordt geïllustreerd door de cyclische rekproeven op graszode (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Proefopstelling en resultaten van cyclische trekproeven met een graszode.

Op een stuk graszode is een cyclische belasting opgelegd en is de verplaatsing gemeten. In de linker grafiek in Figuur 3.1 zijn met kruisjes de verplaatsing en de restverplaatsing van een proefstuk gegeven voor de verschillende cycli. De 'verplaatsing' (cm) is gedefinieerd als het

verschil tussen de verplaatsing aan het begin van een cyclus bij een belasting van 0 en de maximale verplaatsing van de cyclus bij de maximale belasting. Vervolgens wordt de belasting weer gereduceerd tot nul. Het verschil tussen de verplaatsing aan het begin van de cyclus en het einde van de cyclus, als de belasting weer nul is, is de restverplaatsing. Bij toenemende 'verplaatsing' neemt de restverplaatsing toe en neemt de elasticiteit af, wat vermoeiing karakteriseert. Bij een slagverplaatsing van ongeveer 20 mm (4% rek) neemt de restverplaatsing sterk toe. In de rechter grafiek in Figuur 3.1 is per cyclus (kruisje in de grafiek) aangegeven wat de verplaatsing en de berekende stijfheid van de zode E (MPa) was. Deze neemt af naarmate er meer cycli werden doorlopen, hetgeen ook illustratief is voor vermoeiingsgedrag van de zode.

3.3 Beschrijving grond

De vegetatie, het gras met of zonder kruiden, vormt samen met het substraat, de grond, de erosiebeschermende bekleding. In de regel bestaat het substraat uit klei (Paragraaf 3.3.2), soms uit zand (Paragraaf 3.3.3). In beide gevallen is cementatie (3.3.1) mede van belang voor de erosiebestendigheid van de grasbekleding.

Daarmee is de grond (klei of zand) met name een leeflaag voor het gras, die daarnaast (in geval van klei) ook bijdraagt aan de erosiebestendigheid (reststerkte van de dijk).

3.3.1 Cementatie

Cementatie is een proces waardoor de poriën in een (zand)bodem opgevuld raken door de neerslag van mineralen. Het gevolg is dat de losse deeltjes waaruit de bodem bestaat aan elkaar gekit raken tot aggregaten, wat de bodem consolideert en de stabiliteit ervan bevordert. Cementatiebindingen vormen zich meestal pas na verloop van uren tot soms jaren. Cementatie veroorzaakt bindingen, waardoor de grond stevig tot hard wordt. Ook wortels hebben een positieve invloed op cementatie (Paragraaf 3.2).

De verbindingen zijn echter weinig flexibel en worden daardoor bij grotere vervormingen verbroken. Cementatie is daarmee één van de soorten bindingen die zorgt voor de vorming van aggregaten. Dit type binding komt tot stand door fysisch-chemische processen (zuigspanning, polaire effecten, ijzerverbindingen) en door biologische activiteit (plantenwortels, schimmels, bodemfauna). Bij erosie-experimenten met graszoden van dijken werden in lagen met een hoge doorworteling fijne aggregaten aangetroffen, terwijl lagen met een lage worteldichtheid gekenmerkt werden door een structuur van grote, mechanisch sterke aggregaten. Bij golfoverslagproeven op de Vechtdijk, een volledige zanddijk nabij Zwolle, is gebleken dat de zwakke bindingen die de zandkorrels in de sterk doorwortelde toplaag bij elkaar hield, voldoende waren om zeer grote golfoverslagvolumes te weerstaan. Ook toen de zode zelf was verwijderd en het restant van de toplaag werd blootgesteld aan de overslaande golven bleek de bekleding nog erosiebestendig (Figuur 2.4). Onder de sterk doorwortelde toplaag bestond de dijk uit los zand.

De stabiliteit van aggregaten is positief gecorreleerd aan de lengte en het gewicht van wortels. Wortelharen binden de zich ontwikkelende wortels aan bodemdeeltjes. Naast de wortels en wortelharen zelf hebben worteluitscheidingen (exudaten) een cementerende werking. De oplosbaarheid van exudaten in water (van belang bij infiltratie van bijvoorbeeld overslaand water op binnentaluds van dijken en bij langdurige hoogwaters op buitentaluds van rivierdijken) lijkt variabel en afhankelijk van de uitgescheiden verbinding. Hierover is verder nog weinig bekend. Ook schimmeldraden dragen bij aan de vorming en stevigheid van aggregaten. De stabiliteit van een kleibodem zal laag zijn in afwezigheid van wortels of bij lage worteldichtheid, ook al bestaat de bovengrond uit grote aggregaten of is de structuur fijn.

Voor het bepalen van de mate van cementatie van dijkgraslanden bestaat vooralsnog geen praktische meetmethode.

De mate van cementatie is afhankelijk van onder andere de vruchtbaarheidstoestand van de bodem, de omvang van de wortelzone, de mate waarin schimmels aanwezig zijn, de textuur (grove korrels zijn lastiger te cementeren) en compactie van de bodem (porositeit)

3.3.2 Klei

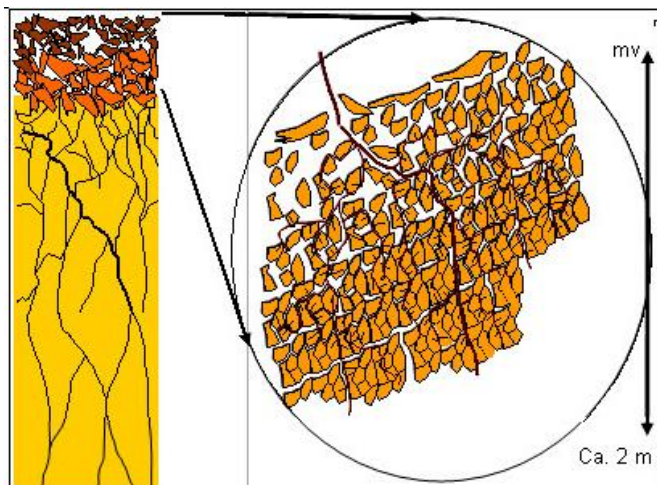
De eigenschappen van klei in een grasbekleding worden voor een belangrijk deel in de loop van een aantal jaren bepaald door de omgeving. Na aanbrengen en verdichten van cohesieve grond treden er diverse veranderingen in op. Deze veranderingen hebben effecten op onder andere de volumieke massa, de sterkte van bindingen tussen gronddeeltjes en de structuur van de grond. In fijnkorrelige stevige grond zijn deze effecten meer uitgesproken dan in zandige (schrane) grond. Karakteristieken van grond als korrelgrootteverdeling (zandgehalte) en Atterbergse grenzen zijn voor de toplaag daarom vooral van belang in zoverre ze effect hebben op de invloed van de omgeving. Details van deze karakteristieken hebben een zeer beperkte invloed op het gedrag.

Ontwikkeling van klei-eigenschappen na aanleg

De veranderingen van de grond na aanbrengen zijn zowel chemisch, mineralogisch als fysisch-chemisch en hebben effect op de korrelschaal en op de schaal van kluiten en zogenaamde bodemaggregaten. Er ontstaat in de grond een bodemstructuur, die aanvankelijk wordt bepaald door scheuren en spleten, die ontstaan door het kapot drukken en trekken van de grond bij krimp en en zwelling. Vorst en dooi spelen daar in de bovenste ongeveer 0,3 m een grote rol in. In de grond ontwikkelt zich na verloop van enige tijd na aanleg actief bodemleven: bacteriën, schimmels, wormen en insecten, plantenwortels en grotere gravende dieren, zoals mollen en, in zandiger grond, muizen en soms konijnen. Deze activiteit is zeer hoog in de bovenste goed doorluchtte decimeters. Het graven en omzetten van bodemmateriaal leidt tot een kruimelige structuur in de bovenste decimeter en draagt bij aan een laag met een vrij losse structuur daar direct onder. In een bij aanleg zeer intensief verdichte grond is de bodemvorming in de bovenste 0,5 m relatief traag. In een op dergelijke wijze verdichte klei bleek na 3 jaar slechts de bovenste paar decimeter doorgraven en doorworteld te zijn.

Typische opbouw van een kleilaag

In Nederland wordt door al deze activiteit de buitenste ongeveer 1,5 m van een grondlichaam van cohesieve grond met grasland in de onverzadigde zone op den duur (5 - 20 jaar) beïnvloed (Figuur 3.2). In de bovenste laag van 5-10 cm, in de sterk doorwortelde zone, bestaat de grond uit kleine aggregaten in een los verband tussen de wortels. Daaronder tot 0,2 à 0,4 m diepte, in de iets minder doorwortelde laag, bestaat de grond een weinig dicht gepakte stapeling brokken. Daaronder neemt de grootte van de aggregaten toe tot meerdere decimeters en wordt de pakking met de diepte dichter. Graafgangen van bodemfauna (vooral wormen en insecten zijn voor structuur van belang) zijn niet in de figuur weergegeven.



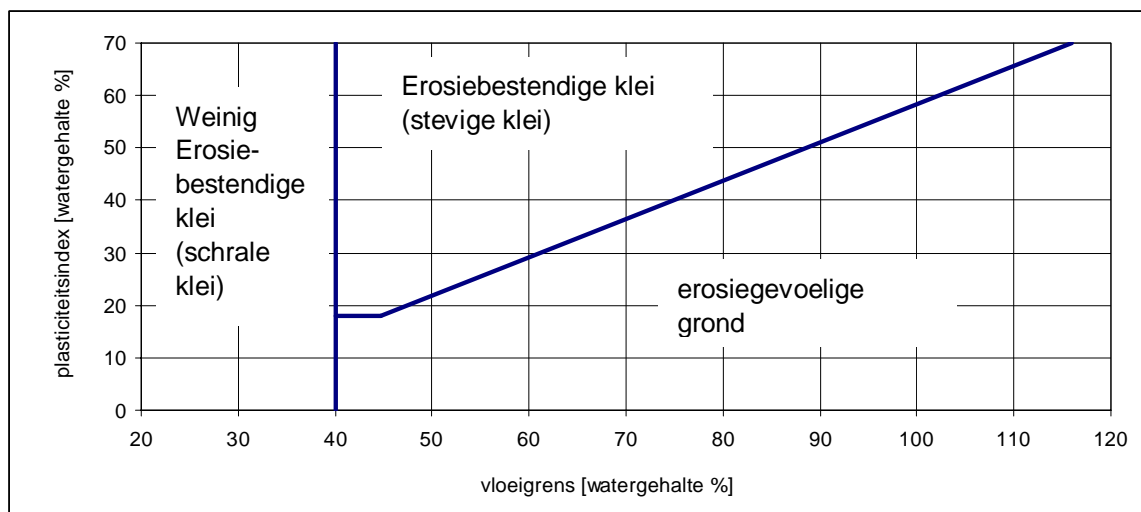
Figuur 3.2 Bodemstructuur in stevige klei op een dijk met gras, met een detail van de toplaag met graswortels.

Classificatie erosiebestendigheid klei

In deze handreiking wordt afgeweken van de classificatie zoals opgenomen in het Technisch Rapport Klei voor Dijken [5]. Er worden drie categorieën klei met betrekking tot erosiebestendigheid onderscheiden (Figuur 3.3):

- I. Erosiebestendige klei
- II. Weinig erosiebestendige klei
- III. Een categorie grond die niet geschikt is voor gebruik als bekledingsklei

De derde categorie grond is ongeschikt voor toepassing bij een dijkontwerp op plekken waar wordt gerekend op de erosiebestendigheid van de kleilaag. Dit kan bijvoorbeeld zijn in de golfklapzone op het buitentalud van rivierdijken. Het is niet zo dat bij een veiligheidstoetsing een dijk automatisch wordt afgekeurd als een dergelijke grond in de grasbekleding zit. Het is namelijk goed mogelijk dat de toplaag voldoende sterkte heeft. Een treffend voorbeeld is de met de golfoverslagsimulator beproefde Vechtdijk, die volledig uit zand bestaat, en zeer goed bestand was tegen een golfoverslagbelasting.



Figuur 3.3 Atterberg diagram met daarin de indeling in erosiebestendige klei, weinig erosiebestendige klei en erosiegevoelige grond

De grenswaarde tussen beide categoriën in erosiebestendigheid zijn met betrekking tot de Atterbergse grenzen:

- een vloeigrens van 40 % en
- een plasticiteitsindex van $0,73 \times (\text{Vloeigrens} - 20)$ met een minimum van 18%

Verder geldt voor een erosiebestendige klei:

- het is afkomstig van een op natuurlijke wijze afgezet materiaal,
- het zandgehalte ($> 63 \mu\text{m}$) is maximaal 40%,
- er is minder dan 5% organisch materiaal volgens de waterstofperoxidebehandeling methode,
- er is minder dan 25% gewichts-verlies bij de HCl-behandeling,
- er zijn geen significante bijmenging van puin, grind en dergelijke en
- het heeft weinig heldere (rode, bruine en gele, soms blauwe) verkleuringen.

In de categorie 'niet geschikte grond' komen grondsoorten voor die door bijvoorbeeld een hoog gehalte aan wortels (zodegrond) of hoge ijzergehalten niet geschikt zijn voor gebruik als bekledingsklei. Zodegrond kan hooguit als dunne deklaag voor het aanslaan van grasbegroeiing worden toegepast op de kleibekledingslaag.

De in Nederland voorkomende klei ligt meestal boven de A-lijn: $0,73 \times (\text{Vloeigrens} - 20)$. In de praktijk komt het voor dat erosiebestendige klei in de categorie 'erosiegevoelige grond' komt door onzorgvuldigheid bij het bepalen van de Atterbergse grenzen. Enkele aandachtspunten bij de bepaling zijn:

- Verwijderen van eventueel aanwezige wortels. Een hoog organische stof gehalte leidt tot een hoge schatting van de vloeigrens.
- Het schaalpje van Cassagrande (of vloeigrens apparaat) moet worden schoongemaakt met water en gedroogd.
- Bepaling van de Atterbergse grenzen start bij veld-vochtig materiaal, niet zoals in sommige literatuur aanbevolen, oven-droog materiaal.

Navolgend wordt de categorie erosiebestendige klei aangeduid als 'stevige klei' en de klei met een lagere vloeigrens of een lagere plasticiteitsindex, of met een hoger zandgehalte, als 'schrle klei'.

3.3.3 Zand

In deze paragraaf wordt de erosiebestendige werking van zand in een grasmat beschreven. Zand wordt relatief gemakkelijk door golfwerking en stromend water geërodeerd, maar een graszode op zandgrond kan dit zeer sterk beperken. Hier is een actief beheer om tot een goede gesloten grasmat te komen en te behouden van groot belang. Er komen in Nederland dan ook, zeer lokaal, dijktafsluitingen voor met een graszode op zand.

Samenstelling

Zand is, behalve een grondsoort, ook een korrelgrootteklasse in alle normeringen van grond en komt in mengsels met grovere en fijnere minerale delen en met organische stoffen voor in alle soorten natuurlijke grond in Nederland.

Zand in de in Nederland algemeen aangenomen NEN 5104, betreft de korrelgrootteklasse van de minerale delen van grond met een diameter tussen 64 en 2000 μm . Impliciet betreffen deze maten de openingen in de zeven waarmee zand van andere korrelgrootteklassen wordt gescheiden. Opgemerkt wordt dat het zandgehalte wordt bepaald voor de minerale delen van

grond, dus zonder organische stof. Het zandgehalte betreft het gewichtsperscentage van de groottefractie van de minerale grond ná een voorbehandeling die de aan zandkorrels klevende grond verwijdert.

Zand in de NEN 5104 betreft grond met meer dan 50 % (Massa/Massa) in de korrelgroottefractie tussen 64 μm en 2 mm en minder dan 8 % (Massa/Massa) fijner dan 2 μm .

De ondergrens voor zand ligt in de meeste indelingen bij 50 - 64 μm , vanwege twee redenen; ten eerste is het zeer moeilijk om fijnere korrelgroottefracties eenduidig middels zieving te bepalen en ten tweede komt de grens overeen met wat nog met het blote oog te herkennen is als individuele deeltjes; fijner wordt in droge vorm als stof ervaren. De bovengrens voor zand ligt op 2 mm, maar deze grens is internationaal minder eenduidig (van 1 – 4 mm) dan de ondergrens. In Nederland wordt de NEN 5104 algemeen gehanteerd. De in het recente verleden nog courante grens van 50 μm wordt nog slechts zeer plaatselijk gehanteerd vanwege continuïteitoverwegingen.

Gedrag zand in de toplaag

Het toetsen van de grond van een langer bestaand dijktaalud met grasland betreft een door interactie met het leven in de zode aangepast materiaal. De korrels van het zand zijn door die processen van een huidje, coating, voorzien, bestaande uit een verzameling organische en minerale verbindingen en combinaties daarvan. De zanddeeltjes kiten daarmee aan elkaar, waardoor "los zand" in de zode in meer of mindere mate samenhang vertoont. Deze bindingen tussen deeltjes hebben mede door het dynamische evenwicht in de zode een zeer beperkte sterkte. Behalve door bindingen kan onderlinge beweging, en daarmee deels ook wegspoelen, worden beperkt doordat zanddeeltjes deels zijn gevat in een matrix van organische en fijne minerale stoffen in de zode.

Het netwerk van wortels in de zode beperkt het uitspoelen van zandkorrels doordat het bijdraagt aan het bijhouden van zandkorrelgroepjes, die door bindingen en matrix aan elkaar vast zitten als de zode voldoende dicht is. De eigenschappen van de zodelaag met zandgrond hangen in extreme mate af van het ecosysteem in de zode. Er kan daardoor significante variatie in eigenschappen optreden die niet direct aan eenvoudige factoren kan worden toegeschreven. Er kan ook significante variatie over zeer korte afstand bestaan. Voor een zandgrond is het voor de erosiebestendigheid van de toplaag daarom extra belangrijk dat er een graszode aanwezig is van voldoende kwaliteit.

3.4 Beheer grasbekleding

3.4.1 Inleiding

Onder de Nederlandse klimaatomstandigheden moet grasland worden beweid of gemaaid om te voorkomen dat het verruigt en uiteindelijk via struweel tot bos wordt. Dat beweiden of hooien wordt '(grasland)beheer' genoemd. Strikt genomen bestaat beheer uit regelmatig 'klein onderhoud'.

Een grasbekleding heeft in de zones op de dijk waar een significante erosieve belasting kan optreden, de hoofdfunctie om de kern van de dijk bescherming te bieden tegen erosie door stroming, golfwerking en golfoverslag. Vanuit het oogpunt van deze functie is het belangrijk om het beheer te richten op het aanwezigheid zijn van een voldoende dicht, dik en aaneengesloten wortelnetwerk en op het voorkomen van plekken waar het dichte

wortelnetwerk van de graszode ontbreekt (voor de beoordeling van de kwaliteit zie paragraaf 6.4.2).

Naast de functie van bescherming tegen erosie kan een grasbekleding ook LNC-waarden vertegenwoordigen. Bij de aanleg of wijziging van een waterkering moet ook rekening worden gehouden met andere functies van de waterkering. De functies liggen formeel vast door planologische beslissingen die zijn genomen door rijk, provincies en gemeenten. Een waterkering kan waarden hebben voor natuur, milieu, landschap en cultuurhistorie (kortweg: de LNC-waarden). In de TAW-Grondslagen voor Waterkeren [8] en de TAW-Handreiking constructief ontwerp [9] wordt aangegeven hoe men LNC-waarden kan benoemen en vervolgens behouden en bevorderen. Vaak leidt een beheertype dat kan leiden tot hoge LNC-waarden ook tot een erosiebestendige toplaag (zie paragraaf 3.4.2). Uit de golfoverslagproeven bleek echter geen sterk verband tussen beheertypes en erosiebestendigheid. Een waterstaatkundig en natuurtechnisch beheer, dat zou moeten leiden tot een goede erosiebestendige grasbekleding, kan in sommige gevallen leiden tot open plekken en daarmee een mindere erosiebestendigheid dan dat er een beperkte mestgift wordt toegepast wat resulteert in een gesloten zode.

Uit enkele van de golfoverslagproeven langs de Schelde in België is gebleken dat een (gebrek aan) beheer dat leidt tot ruigtebegroeiing ook leidt tot een slechte erosiebestendigheid. Dit gebrek aan beheer, of verkeerd beheer, moet dus worden voorkomen zodra een zone van de dijk een significante belasting te verduren kan krijgen. Ook bij golfoverslagproeven op Tholen is gebrek aan beheer vastgesteld, waardoor er van een slechte grasmat sprake was met onder andere open plekken zonder wortels. De erosiebestendigheid van deze grasmat tegen golfoverslag bleek erg klein te zijn. Het blijkt uiterst belangrijk te zijn dat beheer inderdaad leidt tot een goede gesloten grasmat en dat bij gebrek hieraan de erosiebestendigheid sterk kan reduceren.

3.4.2 Beheer

Navolgend worden een aantal beheercategorieën gespecificeerd, die leiden tot verschillende graslandtypes, A, B, C en D, met van A tot en met D afnemende LNC-waarden. De correlatie tussen de beheercategorieën A, B en C en de bijhorende beheertypes en graslandtypes en de erosiebestendigheid wordt hier bewust buiten beschouwing gelaten, omdat de reeks golfoverslagproeven geen aanwijzingen heeft opgeleverd van een duidelijke relatie op dit vlak. Een overzicht van de overslagproeven en de hier aanwezige beheercategorieën is gegeven in bijlage B. Vast staat wel dat beheercategorie D ongewenst is op een dijk. Benadrukt wordt dat voor zones op dijken waar de hydraulische belasting hoog is, het beheer in eerste instantie moet worden gericht op het verkrijgen van een gesloten zode. Het nastreven van hoge LNC-waarden kan in zones op de dijk met een hoge belasting alleen, als dit naast de hoge LNC-waarde, eveneens een gesloten zode oplevert.

Ook voor ontwerp en aanleg kan van de indeling in beheercategorieën worden uitgegaan.

In het onderstaande wordt een beschrijving gegeven van de beheercategorieën (A, B, C en D), de eronder vallende beheertypen en de vegetatietypen die men ermee bereikt. Voor de verschillende beheertypen worden codes gehanteerd (HH-, HW-, WW-, ww+, KG+ et cetera), die terugkomen in de lijst met kenmerken van gras bij de golfoverslagproeven in Bijlage B.

Beheercategorie A

De tot categorie A behorende beheertypen kunnen leiden tot hoge natuurwaarde:

Hooien (beheertype met code HH-):

Jaarlijks twee keer maaien; afhankelijk van de productie kan meer of minder vaak worden gemaaid. Kenmerkend voor hooien is, dat na iedere keer maaien het maaisel wordt afgevoerd en wel binnen ongeveer een week om o.a. te voorkomen dat voedingsstoffen uit het maaisel spoelen. In voedselarme situaties kan worden volstaan met jaarlijks eenmaal maaien in het najaar. Een dergelijke voedselarme situatie kan ook ontstaan bij jarenlang consequent hooibeheer. Een gevolg daarvan kan zijn dat de vegetatie na ca. 10 jaar relatief open wordt (bedekking ≤ 70 à 80%), wat geen gunstige omstandigheid is ten aanzien van erosiebestendigheid tegen golfoverslag. Het dusdanig open worden van de vegetatie kan worden teruggedrongen door het inlassen van een extra maaibeurt (met afvoer van het maaisel), waardoor een regime met drie keer maaien per jaar ontstaat (bijv. juni, september en begin november). Als alternatief kan (na)beweiden met schapen (1x per jaar, beheertype met code HW-) worden toegepast.

Op dijken leidt hooibeheer na verloop van tijd tot een soortenrijk glanshaverhooiland. Op lange termijn is een ontwikkeling richting stroomdalgrasland mogelijk. De natuurwaarde van het grasland kan bij hooibeheer het grootst worden. Veelal wordt bij hooibeheer gebruik gemaakt van maai-raap- of maai-zuigcombinaties. In de strikte zin van het woord kan dan niet van hooien worden gesproken, maar het beheereffect (hier van belang) is wel hetzelfde. Overigens is het inzetten van maai-raap- en maai-zuigcombinaties nadelig voor zaadintroductie vanuit de lokale vegetatie en voor de insectenfauna. Dit kan daarmee de ontwikkeling van hoge natuurwaarde in de weg staan.

Beweiden (beheertype met code WW-):

Periodiek of continu beweiden met schapen. De hoeveelheid schapen moet steeds afgestemd zijn op de productie van het dijkgrasland. Bij continu beweiden wordt het gehele groeiseizoen (van half april tot half oktober) beweid met een lage veedichtheid. Het gras moet, net als in het geval van andere beheertypen, kort (circa 5 - 10 cm) de winter in gaan en dan niet meer worden beweid tot het voorjaar. Verder moet op plaatsen waar de vegetatie niet is afgegrasd, worden bij gemaaid of gebloot. Tevens wordt geadviseerd om na beweiding met een weidesleep eventuele oneffenheden op het talud te verhelpen. Op lange termijn kan weidebeheer leiden tot een soortenrijke kamgrasweide.

Categorie B

Tot categorie B behoren beheersvormen waarvan de doorwortelingsdichtheid in de toplaag toch niet zo hoog is als bij beheerscategorie A en met de diepte ook sneller afneemt. De natuurwaarde van deze en volgende categorieën is laag. Het beheer bestaat uit:

Aangepast agrarisch beheer (beheertype met code WW+)

Aangepast agrarisch beheer kan bijvoorbeeld door beweiding met schapen, continu of periodiek. Er wordt lichte bemesting (tot 70 kg N per ha per jaar) toegepast. Het verschil met beheercategorie A is deze bemesting en grotere veedichtheden. Deze vorm van schapenbeweiding vereist een nauwkeurig op de lokale situatie afgestemd beheerplan. De beweiding mag niet worden gericht op schapenteelt, maar moet gericht blijven op het beheer van een grasbekleding op een waterkering. De veedichtheid moet dan ook precies overeenkomen met de gewasproductie, zodat die geheel wordt afgegrasd. Perioden van enkele weken intensieve begrazing moeten worden afgewisseld met rustperioden, dit om herstel en hergroei van de grasmat te

garanderen. Een gunstige bijkomstigheid is dat dergelijke rustperioden ruimte kunnen bieden voor vruchtzetting van grassen en kruiden. Dit betekent voortdurend omweiden naar andere percelen c.q. compartimenten. Het gras moet, net als in het geval van andere beheertypen, kort (tot 5 - 10 cm) de winter in gaan en dan niet meer worden beweid tot het voorjaar. Aanvullend onderhoud is nodig om onbegaasde plekken en ruigten af te maaien en molshopen glad te slepen. Bij grotere hoeveelheden maaisel moet dit worden afgevoerd. Het resultaat van dit beheer is een soortenarme kamgrasweide. De doorworteling (dicht wortelpakket met veel dunne wortels) is vooral ontwikkeld in de bovenste 10 cm van de bodem.

Gazonbeheer (beheertype met code KG+)

Gazonbeheer wordt per definitie toegepast bij lagere vegetaties. Gazonbeheer wordt veelal toegepast als nog andere functies dan veiligheid op een kering van belang zijn. Veelal vraagt recreatief medegebruik en een verkeersfunctie om kort gras jaarrond. Op dergelijke plaatsen kan gekozen worden voor gazonbeheer. Deze graslanden worden zeven tot twaalf keer per jaar gemaaid, waarbij het maaisel blijft liggen. Doordat zeer vaak wordt gemaaid blijft de hoeveelheid maaisel per maaibeurt gering. Bemesting blijft achterwege en voedingsstoffen komen deels terug in de zode door het verteren van het maaisel in de zode. Het wortelstelsel vormt een dicht maar ondiep wortelpakket, geconcentreerd in de bovenste 5 cm. Gazonbeheer leidt tot een soortenarme beemdgras-raaigrasweide.

Categorie C

Beheer categorie C leidt tot een matig tot slecht doorwortelde toplaag. Open plekken kunnen bij intensief beweiden zeer snel ontstaan. Ze zijn nauwelijks tot niet doorworteld en groeien niet meer dicht. Onder categorie C worden verstaan:

Intensieve agrarische beheervormen (beheertype met code WW++ of HH++)

Meestal beweiding, hooien komt echter ook voor, gekenmerkt door (zware) bemesting. Het resultaat is bij beweiding een soortenarme beemdgras-raaigrasweide en bij hooien een soortenarm glanshaverhooiland. Intensieve bemesting met beweiding of hooien leidt volgens [1] in het algemeen tot een vegetatie met open plekken met een lage worteldichtheid (Figuur 3.4 -1 en 2).

Categorie D

Zeer slecht erosiebestendige bekledingen ontstaan bijvoorbeeld bij:

Achterwege blijven van jaarlijks en adequaat dagelijks beheer.

Jaarlijks 1-4 maal (klepel)maaien zonder afvoer van het maaisel. Klepelmaaien wordt vaak toegepast op hoge, relatief ruige vegetaties, maar ook gazonbeheer kan uit klepelen bestaan.

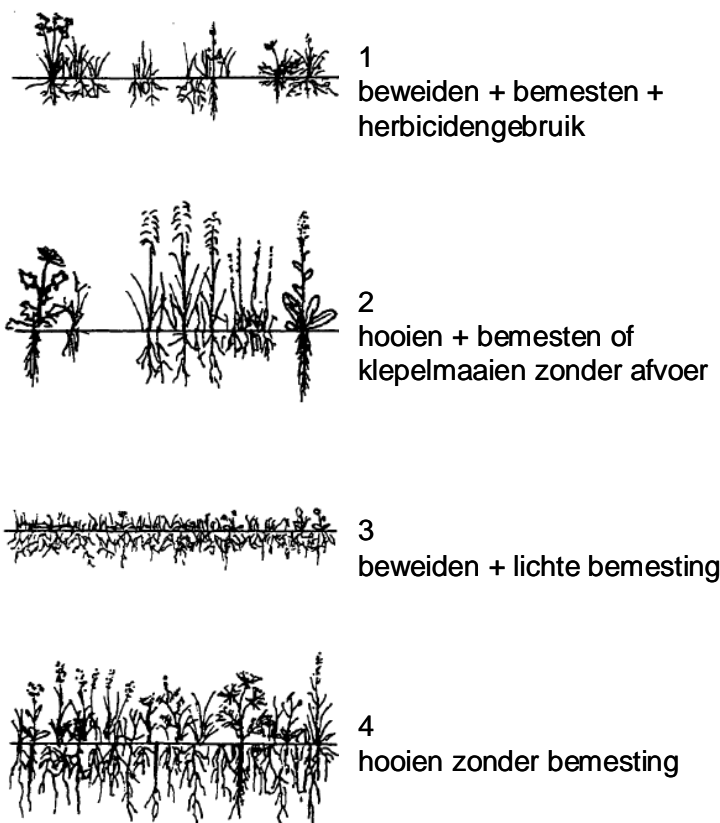
Van tijd tot tijd afbranden van de vegetatie.

Beweiding met runderen of paarden.

Zeer zware bemesting en intensieve beweiding.

De toplaag is in deze categorie zeer slecht doorworteld en heeft een lage bedekking met veel open plekken. Bij de eerste drie beheertypen ontstaat een vegetatie van ruigtekruiden waarbij de klei in de toplaag bestaat uit losse, kruimelige aggregaten die zeer gemakkelijk worden weggespoeld. Bij beweiding met runderen of paarden ontstaan grote open plekken die in omvang toenemen.

Deze vormen van beheer zijn niet geschikt voor waterkerende dijken.



Figuur 3.4 Schematische weergave van graslandstructuur bij verschillende beheersvormen. Met aanpassingen overgenomen uit [12]

Volgens [1] geeft hooibeheer (HH-) de hoogste worteldichtheid in vergelijking met HW-, WW- (alle categorie A) en WW+ (categorie B). Hooibeheer HH- resulteert in een dicht wortelpakket met vooral in de bovenste bodemlaag (tot 15 cm diep) veel dikke en dunne wortels bij een redelijk gesloten vegetatie (Figuur 3.4 - 4). Vegetatiegericht onderzoek op een Waddenzeedijk in Friesland, nabij de aan de Boonweg, [13] en een jaarrondstudie van de doorworteling van dijkgraslanden op zee- en rivierdijken [14] laten echter slechts marginale verschillen tussen deze beheertypen zien in de mate van doorworteling zoals gemeten met de 'handmethode' voorgeschreven in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006 [15].

De golfoverslagproeven geven geen duidelijke correlatie tussen de beheervormen A, B en C en de erosiebestendigheid (zie Bijlage B voor een samenvatting van de kentallen, waaronder het gevoerde beheer). Beheer HH- (categorie A) leidde op de Friese Waddenzeedijk bij de Boonweg tot een lagere bedekkingsgraad en de toplaag faalde eerder dan bij een beheer ww+ (categorie B) met een hogere bedekkingsgraad. Categorie C (beheer HH++) is alleen beproeft bij Kattendijke, waar de toplaag zeer erosiebestendig bleek. Alleen beheer van categorie D (golfoverslagproeven bij Tholen en Tielrode - België) bleken zeer erosiegevoelig.

De bovengenoemde verdeling van beheervormen en de hieruit volgende grasbekledingen zijn bruikbaar bij het streven naar hoge LNC-waarden. Ten aanzien van de erosiebestendigheid van de grasbekleding is met name een dichte zode van belang. Deze kan worden bereikt met de drie beheervormen categorie A, B en C. De beheervormen genoemd onder categorie D

zijn ongeschikt voor waterkeringen in zones waar een significante hydraulische belasting aanwezig is.

Een samenvatting van graslandtypen en de beheertypen waarmee ze gehandhaafd worden wordt gegeven in Tabel 3.1. Meer informatie over aanleg en beheer van dijkgraslanden, ook in relatie tot de omgeving (rivier of zee) en het vegetatietype, is te vinden in [10], [16], [17] en [18].

Graslandtype	Indicatief aantal soorten per 25 m ²	Natuurwaarde	Graslandbeheer
Stroomdalgrasland	30	Zeer hoog	1 à 2x hooien, onbemest
Glanshaverhooiland met zoomsoorten	27	Zeer hoog	Onregelmatig hooien, onbemest
Glanshaverhooiland, soortenrijk	32	Zeer hoog	1 à 2x hooien, onbemest
Glanshaverhooiland, soortenarm	13	Laag	Hooien, bemest
Verruigd hooiland	8 – 20	Laag	Hooien, zwaar bemest, of klepelmaaien
Kamgrasweide, soortenrijk	36	Hoog	Beweiden, onbemest
Kamgrasweide, soortenarm	15	Laag	Beweiden, licht bemest
Beemdgras- raaigrasweide	12 – 18	Laag	Beweiden, zwaar bemest

Tabel 3.1 Graslandtypen als functie van beheertype met informatie over natuurwaarde. Overgenomen uit [1].

3.4.3 Dagelijks beheer en te vermijden situaties

De kwaliteit van grasbedekking van een dijk en de zodelaag kunnen door velerlei omstandigheden worden aangetast. Door onjuist beheer (zie ook categorie D in paragraaf 3.4.2) wordt de kwaliteit van een graszode sterk ondermijnd of kan zelfs volkomen verdwijnen.

Onjuist beheer betreft met name het niet tijdig verwijderen van bovengrondse biomassa via maaien of grazen en afvoeren van het maaisel. Bovengrondse delen moeten minimaal 2 x per jaar worden verwijderd. Tevens kan overmatig bemesten de ontwikkeling van een dichte zode van enige dikte (> 50 mm) beperken. Ook veek (vloedmerk, aanspoelsel) moet tijdig worden verwijderd, net als bladafval van bomen op of langs de dijk, om een gesloten grasmat in stand te houden. Schaduwwerking van bomen en bebouwing kan eveneens de ontwikkeling van een voldoende dikke en dichte zode beperken.

Intensief betreden van, of rijden over grasland op een talud, leidt tot het ontstaan van slijtplekken, paadjes en spoorvorming. Op deze plaatsen ontwikkelt zich geen dichte zode, maar vaak zijn er nog wel wortels aanwezig. De paadjes leiden tevens tot onregelmatigheden in de taludhelling, hetgeen consequenties heeft voor waterstroming op het talud. Overigens hebben de overslagproeven laten zien dat kale plekken, waar nog wel beworteling is, de sterkte niet veel minder is.

Beweiding met koeien of paarden leidt frequent tot schade aan de zode, die dan over grotere oppervlakken wordt onderbroken door hoefafdrukken of geheel afwezig raakt bij afrasteringen en voederplaatsen. Dit is beslist ongewenst voor grasbekledingen op waterkerende dijken.



Figuur 3.5 Microreliëf door schapenpaadjes (boven), eerdere schade buitentalud bij golfaanval (linksonder), door methode van aanleg (rechtsonder). Bron: Beeldenbank RWS

Het beheer is ook de dominante factor voor de mate van ruwheid van een dijkta-
lud met grasbekleding. Een gesloten graszode vormt zich niet als het microreliëf (binnen $1/10$ de m^2)
meer dan ongeveer 0,1 m is. Dit houdt in dat er op kleine schaal verticale of zeer steile
taludjes in de bekleding aanwezig zijn, waar gras niet goed groeit en de doorworteling niet
dicht is.

Een op het oog voldoende glad talud is daarom een voorwaarde voor een voldoende
gesloten graszode, naast de effecten ervan op hydraulische condities. Bekende veroorzakers
van teveel microreliëf zijn de zogenaamde schapenpaadjes, oppervlakkige schades op het
buitentalud als gevolg van golfaanval die daarna niet worden hersteld, (Figuur 3.5),
trapvormen in het talud als gevolg van gelaagde aanleg van de dijk, rijsporen, en maaisporen.

Een deel van de erosiebestendigheid van de toplaag wordt verkregen door de bovengrondse plantdelen. Het is verstandig om de graszode het storm- en hoogwaterseizoen in te laten gaan zonder dat dit op het laatste moment heel kort is gemaaid, of te intensief is beweid (minder dan 5 cm).

3.4.4 Graafgangen

De meest algemeen voorkomende gangen zijn ondiep (0,1 m) en worden gemaakt door mollen, muizen en woelratten. Ook diepere (0,25 – 0,4 m) gangen en soms holtes, zoals nest- en voorraadruimtes, komen voor. Konijnengangen kunnen voorkomen bij te dunne kleilagen, of bij plaatselijke afwezigheid van voldoende klei, op zanddijken. Deze gangen gaan dan door de eventueel nog aanwezige klei heen tot in de zandkern van de dijk. Ook bevers en muskusratten kunnen gangen graven die tot diep in de kern van de dijk gaan en daarmee door de beschermende kleilaag heen. Dit laatste moet altijd worden voorkomen of verholpen, indien er enige belasting kan worden verwacht door stroming, golven, of golfoverslag.

Uit golfgootproeven, golfoverslagproeven en veldwaarnemingen na hoogwaters is gebleken dat de algemeen voorkomende ondiepe (minder dan 0,15 m diep) graafgangen van mollen, woelratten en muizen geen grote invloed hadden op het falen van de toplaag door golfwerking of overslag.

In een golfgootproef met 0,3 m golven is van één proefstuk 1/4de m² van het talud zo'n 70 mm ingezakt door de aanwezigheid van een ondiep muizennest (0,15 m) in en direct onder de zodelaag in zeer zandige klei. Verdere ontwikkeling van de schade bleef vervolgens uit.



Figuur 3.6 Ongewenste combinatie van een slechte grasmat, een dunne kleilaag en graverij waardoor ondermijning van de kleibekleding optreedt (Zeedijk nabij Poortvloet Tholen).

Bij golfoverslagproeven is regelmatig gezien dat een eerste schade aan de zode ontstond rondom of bij een graafgang, maar dit leidde vaak niet direct tot het falen van de top laag. Bij golfoverslagproeven op een volledige zanddijk (Vechtdijk nabij Zwolle), waarin veel mollen actief waren, leidden de molgangen niet direct tot doorgaande schade aan de top laag. De doorworteling van de zode was bij deze dijk goed en het talud was flauw.

Bij de golfoverslagproef op een dijk bij Poortvliet, Tholen, bleek echter dat graverij door een zandhoudende kleilaag van beperkte dikte (dunner dan 0,4 m) op een zanddijk, leidde tot ondermijning en falen van de grasbekleding bij een heel lage overslagbelasting. De graszode was in dit geval echter van slechte kwaliteit met veel open plekken en het talud was vrij steil (Figuur 3.6). Bij een overlooppriof nabij Wissekerke op een binnentalud met een helling van ca. 1:1,75 van zand, met een graszode, bleek dat het water dat in een spleet bij de kruin infiltreerde weer uittrad door een stelsel van konijnengangen en daarbij extreme ontgronding van het zand onder de zode veroorzaakte.

Voor dunne kleilagen, dunner dan 0,4 m, is graverij (uitgezonderd ondiepe gangen in de top laag) in combinatie met steile taluds en een slechte graszode, is een risico bij golfoverslag. Zand in molshopen is een aanwijzing voor gangen tot in de zandkern van de dijk. Bij dikkere kleilagen (meer dan 0,4 m), of flauwe taluds (flauwer dan 1V:4H), met een gesloten graszode, leidt graverij van mollen, muizen en woelratten niet tot snel falen van de top laag bij golfoverslag. Ook in de golfklapzone leiden graafgangen van deze dieren niet tot snel optredende doorgaande schade, mits de zode gesloten is en de kleilaag voldoende dik (meer dan 0,4 m). Konijnengangen moeten altijd worden voorkomen. De weerslag van de ervaringen over de invloed van graverij op de beoordeling van grasbekledingen staat in paragraaf 3.4.4.

3.5 Aanleg van een grasbekleding

Grond

Voor aanleg van grasbekleding wordt aanbevolen voor de grond een zandgehalte lager dan 40 % te hanteren. Praktijk en proeven hebben uitgewezen dat grasmatten op grond met hogere zandgehalten vaak een relatief hoge erosiebelasting kunnen doorstaan, maar er is een tweetal redenen waarom een beperkt zandgehalte wordt aanbevolen voor aanleg.

1. Eén reden is dat zand in grond slechts deels homogeen verdeeld is en een belangrijk deel van het zand in kleinere of grotere laagjes en insluitingen voorkomt en wel meer met toenemend zandgehalte. Deze laagjes en insluitingen kunnen het gedrag van de klei sterk nadelig beïnvloeden. Omdat zandgehalten in het algemeen worden bepaald op mengmonsters, komen zandinsluitingen en laagjes niet tot uiting bij de beoordeling van een aangeboden hoeveelheid grond.
2. Een tweede reden is de beperking van zandgehalte om grondgedrag te karakteriseren. Zand wordt gedefinieerd op basis van de korrelgrootte die een indicatie geeft voor het fysieke gedrag, maar er komen in Nederland ook grondsoorten voor met gedrag als zand, maar met een relatief gering zandgehalte. Een maximalisering van het zandgehalte van 40% sluit deze grond uit.

Indien bij dijkaanleg of dijkverzwaring voor een bekleding met een stevige (vette) klei is gekozen, dan wordt het toepassen van een teeltlaagje van schrale (zandige) klei aanbevolen voor een betere ontwikkeling van de grasbekleding. De zwakte van het eerste seizoen kan worden ondervangen door de erosiebestendige klei voor de eerste winter te verdichten en glad af te werken, om vervolgens de teeltlaag van zandiger klei in het voorjaar aan te

brenge. Bij het aanbrengen van een dergelijke teeltlaag is aandacht voor de aansluiting met de onderliggende laag van belang, omdat de hechting tussen twee gladde vlakken slecht is. Opruwen van de onderliggende laag onmiddellijk voorafgaand aan het aanbrengen van de teeltlaag is daarom van belang. Na inzaaien kan het talud glad worden afgewerkt wat het kiemen van het zaad ten goede komt en de schrale klei minder gevoelig maakt voor erosie door regenval. Dit neemt niet weg dat de grasbekleding in alle gevallen enkele seizoenen relatief kwetsbaar is.

Inzaaien

In de handel zijn zaadmengsels ('dijkenmengsels') verkrijgbaar voor met name twee beheertypen (D1 hooilandmengsel en D2 weidmengsel). Om in het eerste jaar al een dichte zode te verkrijgen kunnen soorten als Engels raaigras (*Lolium perenne*) of – belangrijk indien hooilandbeheer wordt beoogd - Roodzwenkgras (*Festuca rubra*) extra worden bijgemengd. In een later stadium kan ook het aanbrengen (niet te dicht!) van dijkenhooi de vestiging van doelsoorten uit de in het hooi aanwezige zaden bevorderen.

Bij Pannerden is een rivierdijktalud ingezaaid met diverse graszaadmengsels in verschillende dichtheden, waarbij een beheer wordt toegepast van maaien met afvoer en schapenbeweiding. Gebleken is dat de samenstelling van het ingezaaide graszaadmengsel bepalend is voor de vegetatie die zich ontwikkelt. Ook na zeven tot acht jaar blijken in alle vakken soorten van de opgebrachte mengsels te domineren. De dominante rol van de oorspronkelijk ingezaaide soorten in de uiteindelijke samenstelling van een zich nieuw ontwikkelende grasbekleding bleek ook uit een experiment in het proefvak Zaltbommel. Na dijkverzwaring werd het effect bestudeerd van verschillen in aanleg en beheer. Voor herstel van soortenrijk grasland bleken de volgende aspecten belangrijk:

- Het terugzetten van zodegrond, afkomstig van plekken met soortenrijk grasland. Hierin bevindt zich veel zaad van stroomdalsoorten, zodat deze zich sneller opnieuw kunnen vestigen.
- Snelle ontwikkeling van grasland wordt ook op gang gebracht door inzaai met een zadenmengsel dat gewonnen is op plekken met soortenrijk grasland. Hierbij is het belangrijk dat het zaad wordt gewonnen op het moment dat de meeste soorten rijp zaad hebben.
- Inzaai met een weidegraszaadmengsel (bijvoorbeeld BG5) in hoge dichtheid (70 kg/ha) vertraagt de ontwikkeling van een soortenrijke vegetatie en wordt daarom afgeraden, als natuurwaarde belangrijk is.
- Inzaai met Italiaans raaigras (*Lolium multiflorum*, 20-25 kg/ha) levert, omdat het eenjarige soort is, ook een geringe doorworteling op. Als alleen commercieel graszaad beschikbaar is, verdient dit echter toch de voorkeur boven een BG5-mengsel. Italiaans raaigras legt de bovengrond vast maar blijft niet dominant. Daardoor kunnen zich geleidelijk stroomdalsoorten vestigen in de aanvankelijk door Italiaans raaigras gedomineerde grasbekleding.

Bemesting is ook een aandachtspunt bij aanleg of herstel van dijkgraslandzode. Zo is bekend dat juist bij zeer lage concentraties anorganisch fosfor (Pi) in de bodem planten gaan investeren in breedvertakte wortelstelsels. Dit gaat overigens wel ten koste van de ontwikkeling in verticale (diepte) richting [19], [20].

3.6 Verbetering van een grasbekleding

Een "onvoldoende" scorende bekleding kan worden vervangen, maar een grasbekleding valt doorgaans beter, sneller en goedkoper te verbeteren door een aanpassing van het beheer. Het beheer dient te worden aangepast, zodanig dat dit leidt tot een gesloten zode met een dicht wortelnet. De dichtheid en de doorworteling van de toplaag worden bij aanpassingen van het beheer binnen een paar jaar beter. Aanpassing van het graslandtype kost meestal meer tijd, omdat de soortensamenstelling moet veranderen. Men kan de vestiging van de gewenste kruiden en grassen bevorderen met doorzaaien in de bestaande grasbekleding (zie bijvoorbeeld [18]).

Bij een overgang van intensief naar extensief agrarisch begrazingsbeheer vestigen zich soms ongewenste kruiden, die vanwege hun groeistructuur of uitzaaiing in de omgeving ongewenst zijn, zoals akkerdistel. Massale vestiging kan men voorkomen met een tussenfase van enkele jaren onbemest hooien of met extra maaien. Wil men het effect van een aanpassing van het beheer goed volgen, dan is een "monitoring" mogelijk door van meet af aan de kenmerken op te nemen die voor een gedetailleerde toetsing worden gevraagd. Men kan dan bedekking, vegetatiesamenstelling en doorworteling zien veranderen, evenals het vóórkomen van open plekken groter dan 15 x 15 cm, het aantal molshopen, konijnengaten en andere afwijkingen (zie ook paragraaf 3.4.3 en paragraaf 3.4.4).

Een gehandhaafde grasbekleding die zich instelt op een aangepast beter beheer, zal meestal gedurende zo'n vier jaar sterker zijn dan een opnieuw aangelegde grasbekleding die nog sterkte moet krijgen.

Momenteel vinden er ook experimenten plaats met wortelgroeibevorderende middelen (waaronder mycorrhiza), waarmee grasbekledingen, die zich door omstandigheden slecht ontwikkelen, snel kunnen worden verbeterd. Deze experimenten verlopen tot dusver succesvol, maar hebben zich nog niet onder een zware hydraulische belasting bewezen.

4 Hydraulische belasting

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de hydraulische belasting op grasbekledingen beschreven. De nadruk ligt hierbij op de belasting door golfoverslag op de kruin en het binnentalud van een dijk. De reden is dat er naar de hydraulische belasting op de kruin en het binnentalud als gevolg van golfoverslag veel onderzoek is uitgevoerd (paragraaf 4.2), terwijl dit voor golfklappen (paragraaf 4.3) en golfoploop (paragraaf 4.4) niet het geval is geweest. De hydraulische belasting in de golfklapzone en de golfoploopzone is grotendeels overgenomen uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006. Alleen voor de golfoploopzone is de berekening van de rekensnelheid voor dijken met een buitenberm verbeterd.

In Hoofdstuk 2, Figuur 2.1, is aangegeven in welke zone welke hydraulische belasting kan optreden, waarbij de volgende grenzen worden aangehouden:

Golfklap zone	Buitentalud tussen een waterstand met een frequentie van voorkomen van 1/10 per jaar en de uit de HYDRA - rekenmodellen te bepalen waterstand ¹ plus toeslagen.
Golfoploopzone	Buitentalud boven de uit de HYDRA - rekenmodellen te bepalen waterstand ¹ plus toeslagen.
Golfoverslagzone	Kruin en binnentalud.

Voor elk van de verschillende zones kunnen verschillende combinaties van waterstanden en golftrandvoorwaarden kritisch zijn. Deze kritische belastingcombinaties worden bepaald met de HYDRA-rekenmodellen, waarbij voor elke belastingvorm een aparte set hydraulische toetsrandvoorwaarden moet worden bepaald. Hierbij wordt opgemerkt dat het toetspeil van belang is, maar niet kritische hoeft te zijn voor de maatgevende golfklap-, golfoploop en golfoverslag belastingen. Voor de toetsing kan een lagere waterstand dan het toetspeil, in combinatie met hoge golven, maatgevend zijn.

Voor de hydraulische belasting in termen van waterstand, waterstandsverloop, getij, windopzet, golftrandvoorwaarden et cetera wordt verwezen naar de vigerende Hydraulische Randvoorwaarden voor toetsing en de overige leidraden en technische rapporten voor ontwerp. Deze worden in deze handreiking niet in detail behandeld.

4.2 Golfoverslag

4.2.1 Gemiddeld overslagdebiet

Golfoverslag vindt plaats als onder extreme omstandigheden de waterstand erg hoog is en de hoogste golven de kruin van de dijk bereiken en over de kruin naar het binnentalud lopen. De eenvoudigste beschrijving van golfoverslag is het golfoverslagdebiet, q . Dit is de hoeveelheid water per strekkende meter breedte die gemiddeld per seconde over de kruin gaat. Het is een gemiddelde over bijvoorbeeld een uur of over de piek van de storm. Het golfoverslagdebiet wordt uitgedrukt in l/s per m. Waarden die bij ontwerp en toetsing van dijken een rol spelen en hebben gespeeld, zijn 0,1; 1 en 10 l/s per m.

1. Deze waterstand kan, maar hoeft niet, gelijk (te) zijn aan het Toetspeil

Er is heel veel onderzoek gedaan naar golfoverslag bij verschillende typen waterkerende constructies. Voor (Nederlandse) dijken is dat samengevat in het TAW Technisch Rapport Golfoploop en golfoverslag bij dijken [6]. Dit Technisch Rapport wordt in Nederland aanbevolen om golfoverslag in zowel toets- als ontwerpomstandigheden te berekenen. Tegelijkertijd is het programma PC-Overslag ontwikkeld, wat het berekenen veel eenvoudiger maakt. Het programma is ook deels ingepast in de diverse probabilistische HYDRA-rekenmodellen van Rijkswaterstaat. In geval van een erg gecompliceerde geometrie zal de golfoploop en golfoverslag berekend moeten worden met PC-Overslag.

Door een gezamenlijke actie van het Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Nederland zijn bestaande leidraden en technische rapporten, inclusief resultaten van recent onderzoek, samengevat in de EurOtop of Overtopping Manual [7]. Het bovengenoemde Technisch Rapport [6] is hierin vrijwel geheel opgenomen als hoofdstuk 5 (dijken). Daarnaast worden in andere hoofdstukken constructies met losgestorte materialen (breuksteen, betonnen elementen) behandeld en verticale constructies. De Overtopping Manual bevat dus het Technisch Rapport Golfoploop en golfoverslag bij dijken en geeft informatie over andere constructies.

4.2.2 Differentiatie van gemiddeld golfoverslagdebiet naar golfhoogte

Vroeger werd ontworpen op 2% overslaande golven. Voor kleine golfhoogten, zoals op rivieren, kwam dit vrijwel overeen met 0,1 l/s per m golfoverslag. Voor grotere golven, zoals bij zee- en meerdijken, kwam dit meer overeen met 1 l/s per golfoverslag. Het benedenrivierengebied zit tussen deze belastinggevallen in. In alle gevallen betekent het dat er maar weinig water over de dijk komt en dat is ook precies wat de Deltacommissie na 1953 beoogde.

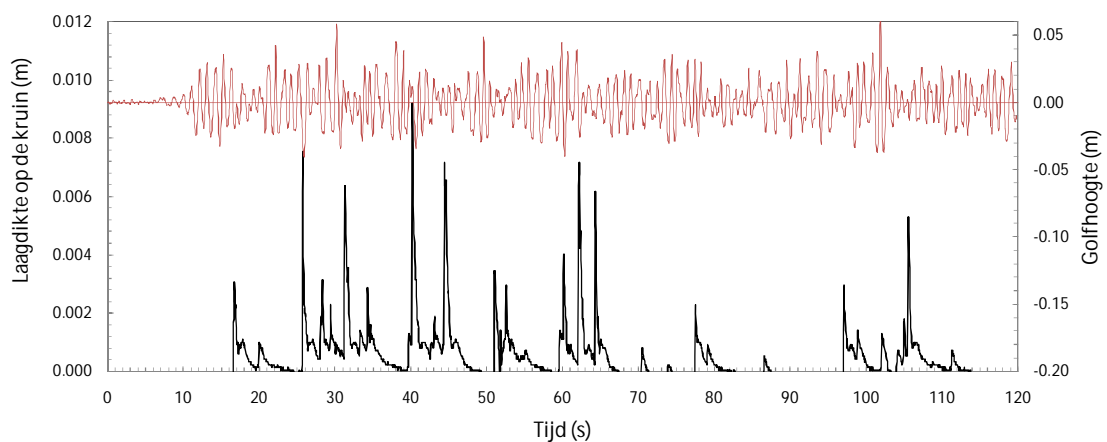
Omdat onze dijken na 1953 zo hoog zijn gemaakt dat er nauwelijks in een mensenleven nog overslag valt te verwachten, is het gevoel voor genoemde overslagdebieten van 0,1; 1 en 10 l/s per m in de loop van de tijd verdwenen. Een 2%-oploopwaarde geeft nog wel een idee: maar 2 op de 100 inkomende golven zal de kruin bereiken. Als de gemiddelde golfperiode 6 s is, dan bereiken er in één uur durende storm maar 12 golven de kruin (2% van 3600 s / 6 s).

Maar wat is nu 0,1 of 10 l/s per m en is dit verschil groot? Door de golfoverslagproeven met de golfoverslagsimulator is dit inzicht weer teruggekomen. Een golfoverslag van 0,1 l/s per m is heel erg weinig, het zijn bij een golfhoogte van bijvoorbeeld 2 m maar enkele golven in een uur. En deze golven zijn dan ook nog klein. Bij de simulatie van deze overslagdebieten werd vaak een groter pompdebiet ingesteld om de tijd tussen de overslaande golven te bekorten. Sinds 2010 wordt deze proef niet eens meer uitgevoerd en wordt direct met de 1 l/s per m overslagproef begonnen. Bij dit overslagdebiet komen er meer golven over de dijk, maar het aantal is nog altijd beperkt en ook wordt deze proef vaak "versneld" uitgevoerd. Bij dit overslagdebiet zijn nog nooit schades van enige omvang vastgesteld, met uitzondering van een dijk met ruigtebegroeiing op een zandige dijk (langs de Schelde) en op een zanddijk met dunne kleibekleding en een slechte kwaliteit graszode (dijk nabij Poortvliet, Tholen).

Bij 10 l/s per m komt er daadwerkelijk veel meer water over de dijk en dit overslagdebiet was vaak de eerste serieuze golfoverslagtest van de grasbekleding. Bij dit debiet zijn soms wel beginnende schades vastgesteld op een goede grasmat.

Alhoewel het gemiddeld overslagdebiet een eenvoudige maat is, beschrijft het golfoverslag niet in detail. Ten eerste vindt de werkelijke overslag alleen plaats als een golf de kruin van

de dijk bereikt en alleen de hoogste golven gedurende een storm bereiken de kruin. Werkelijke golfoverslag vindt dan ook onregelmatig in de tijd plaats en elke keer komt er een zeker volume in een golf over de dijk. Ook deze overslaande volumes zijn verschillend in grootte. In Figuur 4.1 is een registratie gegeven van een modelproef. Het bovenste signaal geeft de golfhoogte vlak voor een 1:3 talud. Het signaal daaronder geeft de laagdikte die gemeten is op de kruin van de dijk. De golfhoogte in model was $H_s = 0,065$ m en het golfoverslagdebiet $q = 0,048$ l/s per m. Als we bijvoorbeeld een schaalfactor van 20 zouden aanhouden, dan wordt het een golfhoogte van 1,3 m en een overslagdebiet van 4,3 l/s per m. Duidelijk is te zien dat er veel minder golven over de kruin gaan dan er golven de dijk bereiken. Ook komen de overslaande golven onregelmatig in de tijd en zijn ze verschillend van grootte.



Figuur 4.1 Voorbeeld van golfoverslag (gemeten laagdikten op de kruin, onderste signaal) en het golfsignaal vlak voor de dijk. Modelonderzoek met een golfhoogte $H_s = 0,065$ m met een overslagdebiet $q = 0,048$ l/s per m.

Het maakt heel veel uit of golfoverslag plaatsvindt bij een grote golfhoogte voor de dijk of bij een kleine golfhoogte. Bij eenzelfde gemiddeld overslagdebiet betekent dit dat bij kleine golven er relatief meer kleine golven over de dijk slaan. De overslaande volumes per golf zijn dan ook kleiner. Bij grote golven slaan minder golven over de dijk en is het overslaande volume per golf veel groter. Hierbij wordt opgemerkt dat de waterstand bij de kleine golven dichter bij de kruin van de dijk staat dan bij de grote golven. Onderstaand wordt dit uitgewerkt.

Elke dijk in Nederland kent zijn eigen toets- of ontwerpomstandigheden. Een golfhoogte van 2 m is karakteristiek voor dijken langs de Nederlandse kusten en estuaria. Met name bij rivierdijken kan het voorkomen dat de golfhoogte duidelijk kleiner is. Ter illustratie van wat deze golfhoogten betekenen voor golfoverslag, worden hier enkele golfhoogten, die in algemene zin een golfregime (golfcondities) representeren, omgezet in een aantal significante parameters met betrekking tot golven en golfoverslag.

Ter illustratie is gekozen om drie hydraulische belastingregimes uit te werken, die vrijwel het hele bereik dekken van golfhoogten bij "toetsen". Dit zijn golfhoogten van $H_s = 1$ m, 2 m en 3 m. Bij alle gevallen in de navolgende uitwerking wordt uitgegaan van een golfsteilheid, uitgaande van de piekperiode en diep water, van $s_{op} = 2\pi H_s / (g T_p^2) = 0,04$, een buitentalud van 1:4 en een duur per gemiddeld overslagdebiet van 6 uur.

Tabel 4.1 geeft de piek- en gemiddelde periode voor elke golfconditie, met daarnaast het aantal inkomende golven N_w (-) en het 2%-golfoplooppniveau.

Buitentalud $\cot\alpha = 4$; tijdsduur $t = 6$ uur			
	Golfhoogte H_s		
	1 m	2 m	3 m
Piekperiode T_p (s)	4.0	5.7	6.9
Gemiddelde period T_m (s)	3.3	4.7	5.8
Aantal golven N_w	6545	4596	3724
2%-golfoploop $Ru_{2\%}$ (m)	1.99	3.98	5.94

Tabel 4.1 Golf- en golfoploopcondities bij drie golfhoogten H_s (m)

Kenmerkende waarden die een dijk, belast met golfoverslag, bepalen zijn:

- het gemiddeld overslagdebiet
- de benodigde vrije kruinhoogte [m]
- het percentage overslaande golven [%] en/of het aantal overslaande golven [-]
- de overslagverdeling van overslaande volumes met daarin:
- het maximum volume van de grootste overslaande golf [m^3]

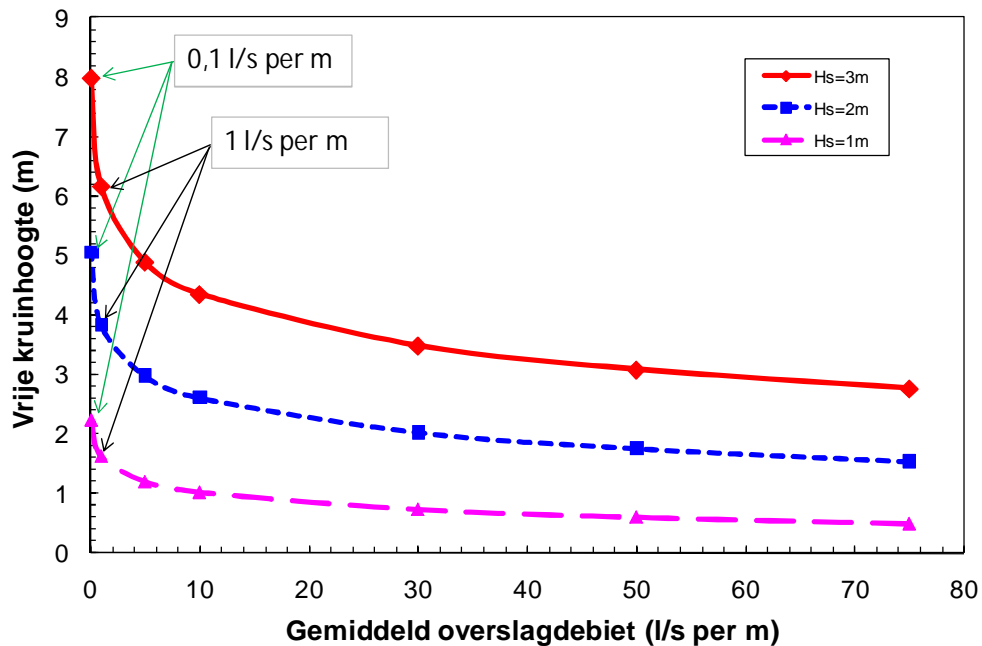
Om te komen tot een getalsmatige vergelijking van verschillende golfregimes geeft Tabel 4.2, ter illustratie, voor golfhoogtes van 1, 2 en 3 m weer welke kenmerkende waarden behoren bij een te bereiken gemiddeld golfoverslagdebiet. Deze gemiddelde overslagdebieten lopen op van 0,1 tot en met 75 l/s per m.

		Gemiddeld overslagdebiet q (l/s per m)						
		0.1	1	5	10	30	50	75
$H_s = 1$ m	Vrije kruinhoogte R_c (m)	2.24	1.63	1.2	1.02	0.73	0.6	0.49
	Percentage overslaande golven P_{ov}	0.7	7.2	24	35.7	59	70	78.8
	Aantal overslaande golven N_{ow}	45	471	1573	2336	3861	4583	5160
	Grootste overslaande volume V_{max} (l/m)	256	440	831	1197	2359	3401	4617
$H_s = 2$ m	Vrije kruinhoogte R_c (m)	5.06	3.84	2.98	2.61	2.03	1.76	1.54
	Percentage overslaande golven P_{ov}	0.2	2.7	11.4	18.9	36.6	47	56
	Aantal overslaande golven N_{ow}	9	126	525	867	1683	2160	2574
	Grootste overslaande volume V_{max} (l/m)	769	1222	2018	2697	4707	6387	8278
$H_s = 3$ m	Vrije kruinhoogte R_c (m)	7.98	6.16	4.89	4.35	3.48	3.08	2.76
	Percentage overslaande golven P_{ov}	0.085	1.49	7.05	12.3	26.1	34.9	43
	Aantal overslaande golven N_{ow}	3	55	262	456	972	1300	1600
	Grootste overslaande volume V_{max} (l/m)	1424	2254	3478	4509	7375	9709	12263

Tabel 4.2 Overslaggegevens bij verschillende golfhoogten en verschillende gemiddelde overslagdebieten

Uit deze illustratieve tabel volgt bijvoorbeeld dat er bij een golfhoogte van 1 m veel meer golven over de dijk zullen slaan dan bij een golfhoogte van 3 m (bij hetzelfde gemiddeld overslagdebiet) en dat het maximale volume van de grootste overslaande golf veel kleiner is.

Uit de onderstaande Figuur 4.2 kan dan ook gehaald worden hoeveel een verruiming van een toelaatbaar overslagdebiet oplevert wat betreft beperking van de benodigde kruin- of dijkhoogte. Hierbij wordt nadrukkelijk opgemerkt dat onderscheid moet worden gemaakt naar verschillende mechanismen. Een verruiming van het toelaatbare gemiddelde overslagdebiet ten aanzien van het mechanisme erosie hoeft nog niets te zeggen over de effecten op afschuiven van de bekleding en andere ongewenste effecten ten aanzien van de veiligheid van dijken onder extreme omstandigheden.



Figuur 4.2 Relatie vrije kruinhoogte versus gemiddeld overslagdebiet voor drie golfhoogten

In Figuur 4.2 is voor elke golfhoogte het gemiddeld overslagdebiet uitgezet met de bijbehorende vrije kruinhoogte en voor de drie golfhoogten. Voor de vrije kruinhoogte kan ook gelezen worden de benodigde kruinhoogte, gegeven een toelaatbaar overslagdebiet. Het linker deel van de grafiek loopt het steilste, wat betekent dat de invloed het grootst is als een klein toelaatbaar overslagdebiet, zoals 1 l/s per m, wordt vergroot. Een verruiming naar 5 of 10 l/s per m levert duidelijk een meter of meer winst op.

Wat ook opvalt is dat deze winst duidelijk kleiner is voor kleinere golfhoogten. Als nog grotere golfoverslagdebieten zouden worden toegelaten, dan wordt ook het verschil in kruinhoogte bij dit debiet en bij nog grotere debieten van orde 70-80 l/s per m erg klein, want de lijnen lopen rechts in de figuur vrijwel horizontaal. Een iets verkeerd berekende waterstand kan dan al gauw een overslagdebiet leveren waarbij het binnentalud bezwijkt als gevolg van erosie. Let wel dat ook het effect van golfoverslag op andere mechanismen moet worden meegenomen.

4.2.3 Verdeling van golfoverslagvolumes afhankelijk van overslagdebiet en golfhoogte

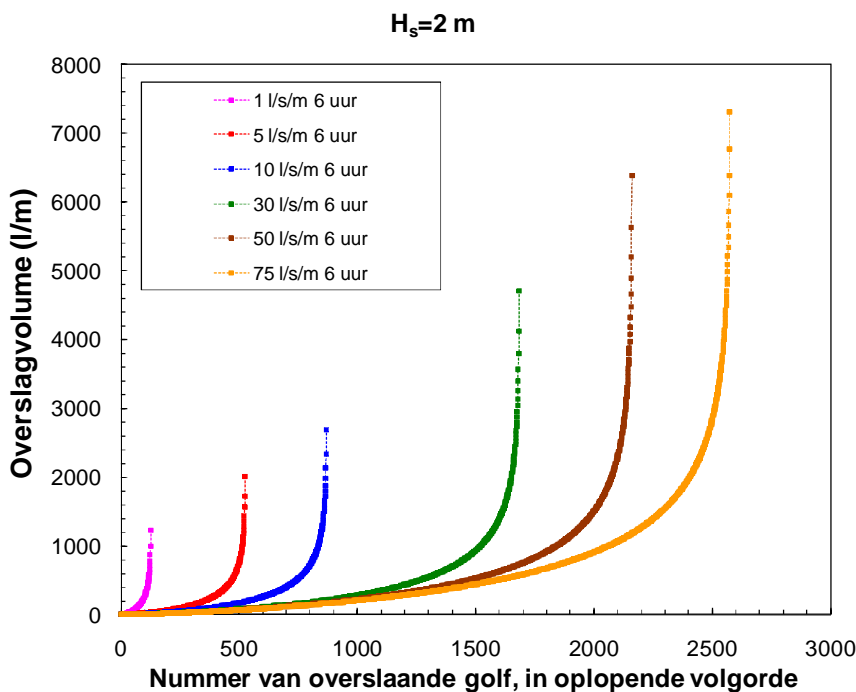
Bij gegeven golfcondities, gemiddeld golfoverslagdebiet en tijdsduur, zal er een bepaald aantal golven over de dijk slaan (zie Figuur 4.2). Daarmee is ook te berekenen hoe groot elk volume in een overslaande golf zal zijn [6]. De volgende verdeling wordt aangehouden voor de overslaande volumes:

$$P_v = P(\underline{V} \leq V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{a}\right)^{0.75}\right] \quad (4.1)$$

met:

$$a = 0.84 \cdot T_m \cdot \frac{q}{P_{ov}} \quad (4.2)$$

Hierin is P_v (-) de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf \underline{V} kleiner dan of gelijk is aan V , V het volume van een overslaande golf (m^3 per m), T_m de gemiddelde golfperiode (s), q het gemiddeld overslagdebiet (m^3/s per m) en P_{ov} de kans op overslaande golven. Voor T_m/P_{ov} kan eventueel ook t/N_{ow} worden genomen, waarbij t de totale duur van overslag is (in seconden) en N_{ow} het aantal overslaande golven. De coëfficiënt 0,84 volgt mathematisch uit de vorm van de verdeling, welke gegeven wordt door de coëfficiënt 0,75 in bovenstaande formule. In feite wordt deze coëfficiënt gevonden door integratie over de verdeling. De coëfficiënt 0,84 wordt verkregen bij een oneindig aantal overslaande golven. In Figuur 4.3 wordt een voorbeeld gegeven van de verdeling van golfoverslagvolumes gedurende een storm, bij een golfhoogte van 2 m.



Figuur 4.3 Verdelingen van overslaande golfvolumes, uitgaande van $H_s = 2$ m, $T_p = 5.7$ s, een buitentalud van 1:4 en een tijdsduur van 6 uur.

Voorbeeld:

Met de bovengenoemde formules kunnen verdelingen worden berekend bij verschillende gemiddelde golfoverslagdebieten en Figuur 4.3 geeft hiervan een voorbeeld voor een golfhoogte van 2 m. Bij een toename van het gemiddeld overslagdebiet wordt het aantal overslaande golven groter en ook de volumes in deze golven. De figuur geeft ook duidelijk het karakter aan van golfoverslag: er zijn heel veel overslaande golven met een klein volume en maar een paar golven met een veel groter volume. Het zijn juist deze grote volumes die schade aan de grasbekleding kunnen veroorzaken (zie ook hoofdstuk 6).

4.2.4 Hydraulische belasting bij golfoverslagproeven

Bij golfoverslag komt alleen de golfong van de grootste golven aan op de kruin en een bepaald volume zal over de kruin en binnentalud stromen, zie Figuur 4.3. Het idee van de golfoverslagsimulator is om deze overstromende golfong op een juiste manier te simuleren. Dus met de juiste snelheid en laagdikte en met de juiste duur van zo'n overslaande golf. De

brekende golf op het buitentalud is daarbij niet nodig, alleen maar het volume aan water dat over de kruin stroomt. De proef wordt daarmee ter plekke op bestaande dijken uitgevoerd en is destructief van karakter.



Figuur 4.4 Meetopstelling van de golfoverslagsimulator op een dijk.



Figuur 4.5 De golfoverslagsimulator die een volume loslaat van $5,5 \text{ m}^3/\text{m}$.

Figuur 4.4 geeft de opstelling weer van de golfoverslagsimulator op het buitentalud van een dijk. Er is een 4 m brede golfgoot gemaakt om het water over het binnentalud naar beneden te begeleiden. Onderaan de dijk is de meetcabine geplaatst op een verrijdbare wagen. Figuur 4.5 geeft de golfoverslagsimulator weer die een groot overslaand volume loslaat. Kleine volumes worden binnen een paar seconden losgelaten, grotere volumes in 4 of 5 seconden. Het totale volume van de golfoverslagsimulator is 22 m^3 en de simulator is 4 m breed. Het

maximale volume is daarmee $5,5 \text{ m}^3/\text{m}$. De simulator is op een platform gezet met hydraulisch beweegbare poten. Hierdoor is het vrij eenvoudig om de simulator verticaal op te stellen en bij te stellen als er enige zakking is opgetreden.

Onderzoek naar sterkte van de grasbekleding van kruin en binnentalud is met de golfoverslagsimulator vanaf 2007 uitgevoerd, steeds aan het eind van de winter, voordat het gras weer begon te groeien. Omdat gras in de winter in een slapende toestand verkeert en stormen in de winter voorkomen, moet onderzoek ook in die periode worden uitgevoerd en niet in de zomer als het gras veel sterker is. Hiermee is veel informatie naar boven gekomen omtrent de sterkte van een grasbekleding en het falen ervan bij golfoverslag.

4.2.5 Stroomsnelheid en laagdikte op het binnentalud

Simulatie van golfoverslag betekent dat de (maximale) snelheid in het overslaande golfvolume correct zou moeten zijn en ook de laagdikte en de duur van de overslag. De golfoverslagsimulator is vooral ontworpen om de juiste maximale snelheid te simuleren. Ten tijde van het ontwerp van de simulator (2006) waren hier redelijk betrouwbare formules voor en minder betrouwbare formules voor de laagdikte. Nog steeds is het zo dat de combinatie van formules voor snelheid, laagdikte en overslagduur niet helemaal consistent zijn met de wet van massabehoud. Verder onderzoek moet hier verbetering in brengen. Voorlopig wordt van de volgende relaties uitgegaan.

Voor de laagdikte h (m) precies op de buitenkruinlijn wordt een formule met grote spreiding gevonden:

$$h_{2\%}(x_c=0) = 0,20 (Ru_{2\%} - R_c) \quad (4.3)$$

De laagdikte reduceert na de buitenkruinlijn snel, mogelijk doordat de verticale snelheidscomponent verdwijnt, maar blijft dan vrijwel constant. Dit levert een directe relatie voor de laagdikte op de kruin, na het passeren van de buitenkruinlijn, die niet meer afhankelijk is van de plaats op de kruin (tenzij zeer breed). De spreiding van deze formule is veel kleiner dan voor formule 4.3.

$$h_{2\%}(x_c) = 0,13 (Ru_{2\%} - R_c) \quad (4.4)$$

De snelheid u (m/s) op de buitenkruinlijn wordt bepaald door:

$$u_{2\%}(x_c=0) = 0,35 \cot\alpha (g(Ru_{2\%} - R_c))^{0,5} \quad (4.5)$$

De snelheid reduceert vervolgens op de kruin:

$$u_{2\%}(x_c)/u_{2\%}(x_c=0) = \exp(-1,4 x_c / L_{m-1,0}) \quad (4.6)$$

waarin:

$h_{2\%}$ = de laagdikte die door 2% van de golven wordt overschreden

x_c = de afstand vanaf de buitenkruinlijn ($x_c = 0$ is de buitenkruinlijn)

$Ru_{2\%}$ = het 2%-golfoplooppniveau (te berekenen met pc-overslag)

R_c = de vrije kruinhoogte, de verticale afstand tussen het stilwaterniveau en de kruin

$u_{2\%}$ = de snelheid die door 2% van de golven wordt overschreden

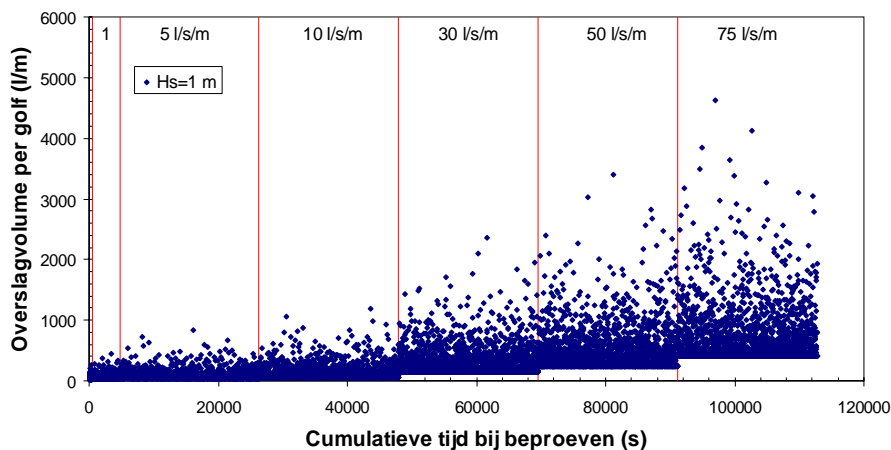
$\cot\alpha$ = de cotangens van het buitentalud (of een gemiddeld talud)

$L_{m-1,0}$ = de diepwatergolflengte berekend met $T_{m-1,0}$; $L_{m-1,0} = gT_{m-1,0}^2/(2\pi)$

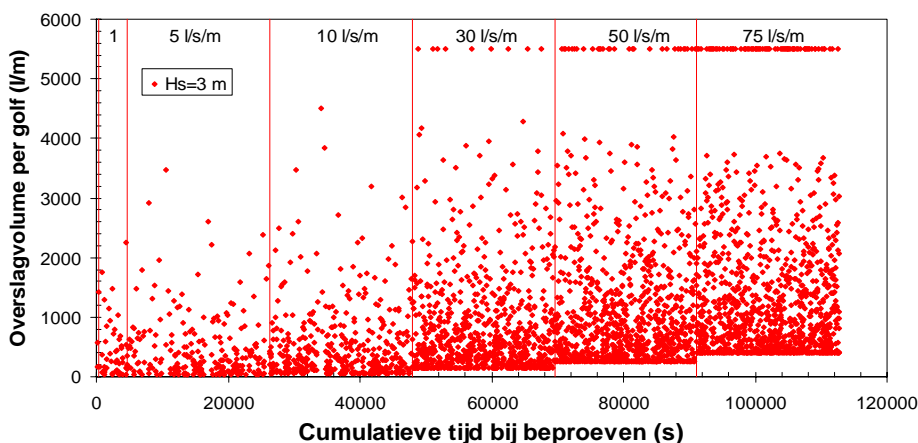
$T_{m-1,0}$ = de spectrale periode gebaseerd om m_0 en m_{-1} ; $T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0$
 m_n = n-de moment van het golfspectrum

Inmiddels zijn nieuwe golfverslagsimulatoren ontworpen voor golfverslagproeven in Vietnam en voor de Verenigde Staten. Die in Vietnam is qua grootte gelijk aan die in Nederland. De Amerikaanse simulator is ongeveer driemaal zo groot, kan een overslagvolume van $17 \text{ m}^3/\text{m}$ simuleren en een maximaal overslagdebiet van ongeveer 300 l/s per m. Deze simulator is echter in een laboratoriumsituatie opgesteld en is niet verplaatsbaar. Het onderzoek wordt uitgevoerd op bakken waarin klei is aangebracht met daarop zoden of een ander versterkingssysteem. De Amerikaanse simulator heeft echter wel de noviteit dat ook de overslagduur gestuurd kan worden door de klep meer of minder open te doen. Hierdoor is het mogelijk golven met een langere periode te simuleren.

Aanvankelijk zijn de golfverslagproeven in Nederland uitgevoerd bij een vaste hydraulische conditie: een golfhoogte van 2 m met een golfperiode van 5,7 s. Pas in 2010 zijn proeven op een dijk uitgevoerd, waarbij golfcondities van 1 m, 2 m en 3 m zijn gesimuleerd. Figuur 4.6 en Figuur 4.7 geven een voorbeeld van de gesimuleerde golfverslagvolumes in de tijd. Elke proef met een constant overslagdebiet duurde 6 uur, behalve voor de allerkleinste debieten, die versneld zijn uitgevoerd. De horizontale as geeft de cumulatieve duur van de proef. Achtereenvolgens zijn overslagdebieten gesimuleerd van 0,1; 1; 5; 10; 30; 50 en 75 l/s per m.



Figuur 4.6 Gesimuleerde golfverslagvolumes in de tijd voor $H_s = 1 \text{ m}$ en een testduur van 6 uur.



Figuur 4.7 Gesimuleerde golfverslagvolumes in de tijd voor $H_s = 3 \text{ m}$ en een testduur van 6 uur.

Figuur 4.6 geeft de overslaande volumes in de tijd voor een golfhoogte van maar 1 m, terwijl Figuur 4.7 de volumes geeft voor een veel grotere golfhoogte van 3 m. Bij deze golfhoogte wordt een aantal keren de maximum inhoud van de golfoverslagsimulator van $5,5 \text{ m}^3/\text{m}$ bereikt. De verschillen in golfoverslag bij de twee golfhoogten zijn duidelijk. Bij een golfhoogte van 1 m zijn er veel meer overslaande golven, terwijl de overslaande volumes beperkt blijven. Bij de golfhoogte van 3 m zijn de overslaande volumes veel groter.

Beide figuren geven duidelijk weer dat golfoverslag heel verschillend kan zijn bij eenzelfde gemiddeld overslagdebiet. Het is het cumulatieve effect van de verschillende overslaande golfvolumes die schade veroorzaken en daarbij zijn het vooral de grote snelheden van de grote golfvolumes die belangrijk zijn (zie Hoofdstuk 6).

De theorie over snelheden, laagdikten en overslagduren van overslaande golfvolumes die in de praktijk optreden is nog niet helemaal uit ontwikkeld en meer onderzoek is hiervoor nodig. Voor de golfoverslagproeven met de golfoverslagsimulator zijn deze relaties echter wel gemeten en vastgelegd. De gesimuleerde belasting tijdens de proeven is daarmee bekend en kan worden vergeleken met de opgetreden schade. Voorlopig wordt bij de gedetailleerde beoordeling van gras bij golfoverslag uit gegaan van deze gevonden relatie tussen het golfoverslagvolume en de stroomsnelheid.

De relatie tussen het overslaande golfvolume uit de golfoverslagsimulator en de snelheid op de kruin is als volgt vastgesteld:

$$u = 5,0 V^{0,34} \quad \text{met } u \text{ in m/s en } V \text{ in } \text{m}^3/\text{m} \quad (4.7)$$

De relatie is een gemiddelde trendlijn door metingen van de stroomsnelheid bij enkele golfoverslagproeven en bij verschillende overslagvolumes. De snelheid u (m/s) is hierin de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid tijdens een golfoverslagvolume. De coëfficiënt 5,0 is niet dimensieloos en V moet daarom met de juiste dimensie van m^3/m (en niet l/m) worden ingevuld. Enkele karakteristieke waarden zijn:

$V = 0,25 \text{ m}^3/\text{m}$	$u = 3,1 \text{ m/s}$
$V = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$	$u = 4,0 \text{ m/s}$
$V = 1 \text{ m}^3/\text{m}$	$u = 5,0 \text{ m/s}$
$V = 2 \text{ m}^3/\text{m}$	$u = 6,3 \text{ m/s}$
$V = 4 \text{ m}^3/\text{m}$	$u = 8,0 \text{ m/s}$
$V = 5,5 \text{ m}^3/\text{m}$	$u = 8,9 \text{ m/s}$ (maximum van de golfoverslagsimulator)

Dit zijn snelheden op de kruin direct na het verlaten van het water uit de simulator. Bij een lang en steil talud kan de stroming over het binnentalud versnellen.

Figuur 4.6 en Figuur 4.7 laten zien dat er bij een golfhoogte van 1 m heel veel overslaande golfvolumes kleiner zijn dan $0,5 - 1 \text{ m}^3/\text{m}$. Omdat lage snelheden relatief onbelangrijk zijn voor het ontstaan van erosieschade, wordt het verschil in belasting tussen een golfhoogte van 1 m en 3 m nog groter (bij eenzelfde gemiddeld overslagdebiet). Zie hiervoor verder Hoofdstuk 6.

4.2.6 Hydraulische belasting bij afschuiven bekleding binnentalud

Afschuiven van het binnentalud kan optreden als gevolg van infiltratie bij golfoverslag. Het mechanisme wordt beschreven in Hoofdstuk 5. De hydraulische belasting wordt gevormd door infiltratie, waardoor in de dijk de waterspanning oploopt, wat de stabiliteit van de bekleding verzwakt.

Infiltratie kan alleen optreden indien er een wateraanbod, ofwel een waterlaagje, op het talud aanwezig is. Bij infiltratie door golfoverslag maakt het niet veel uit hoe dik het waterlaagje is. Bij golfoverslag komen golfvolumes met onregelmatige tussentijden en in onregelmatige hoeveelheden over het binnentalud. Dit proces is afhankelijk van de combinatie van het gemiddelde golfoverslagdebiet en de golfhoogte. Zoals te zien is in Figuur 4.6 en Figuur 4.7 zal bij een gelijk gemiddeld overslagdebiet het aantal overslagvolumes bij een hoge golfhoogte veel minder zijn dan bij een kleine golfhoogte. Indien de golfvolumes snel achter elkaar over de dijk komen, dan blijft het talud nat, als de tussentijd te groot wordt, dan valt het talud 'droog' en stopt de infiltratie.



Figuur 4.8 Wateraanbod bij infiltratie en afschuifproef (Friese Waddenzeedijk nabij de Boonweg)

Uit de golfoverslagproeven is gebleken dat een golfoverslagvolume binnen een beperkte tijd over het talud voorbij trekt. Na het front van het volume, waarin de waterlaagdikte en de dieptegemiddelde stroomsnelheid maximaal zijn, volgt de staart. In de staart neemt de waterlaagdikte en de gemiddelde stroomsnelheid af. Binnen enkele seconden is de waterlaagdikte op het talud kleiner dan enkele centimeters en lijkt het volume helemaal voorbij te zijn. Uit waarnemingen is echter gebleken dat er na elk golfoverslagvolume, na het voorbij komen van het front, gemiddeld 30 seconden een heel dun waterlaagje op het talud aanwezig is. Deze tijd is weinig afhankelijk van de grootte van het overslagvolume. Het gaat hierbij om een waterlaagje dat van enkele centimeters dikte maar langzaam afneemt en dat zich tussen de bovengrondse plantdelen bevindt. Indien de tijd tussen opeenvolgende

golfvolumes kleiner is dan 30 s, dan blijft het talud continu nat, indien het meer is dan 30 s, dan is het wateraanbod op het talud kleiner dan de stormduur.

Het al dan niet droogvallen van het talud is afhankelijk van het gemiddelde golfoverslagdebiet en de golfhoogte. Het effect is onderzocht bij de golfoverslagproeven en heeft geleid tot een grafiek waarmee het percentage van de golfoverslagtijd dat het talud nat is kan worden bepaald. Dit wordt verder beschreven in Hoofdstuk 6.

In het verleden zijn enkele proeven uitgevoerd naar het mechanisme afschuiven van de bekleding. Ook bij de locaties Afsluitdijk en de Friese Waddenzeedijk nabij de Boonweg zijn proeven uitgevoerd. Hierbij is de hydraulische belasting opgelegd als een continu wateraanbod gelijkmatig verspreid over een lengte van 30 m, dat zodanig was dat tot onderaan het talud water over het talud stroomde (Figuur 4.8 en Figuur 4.9).



Figuur 4.9 Opstelling afschuifproef met een 30 m lange buis op de kruin van de dijk (Friese Waddenzeedijk nabij de Boonweg)

4.3 Golfklappen

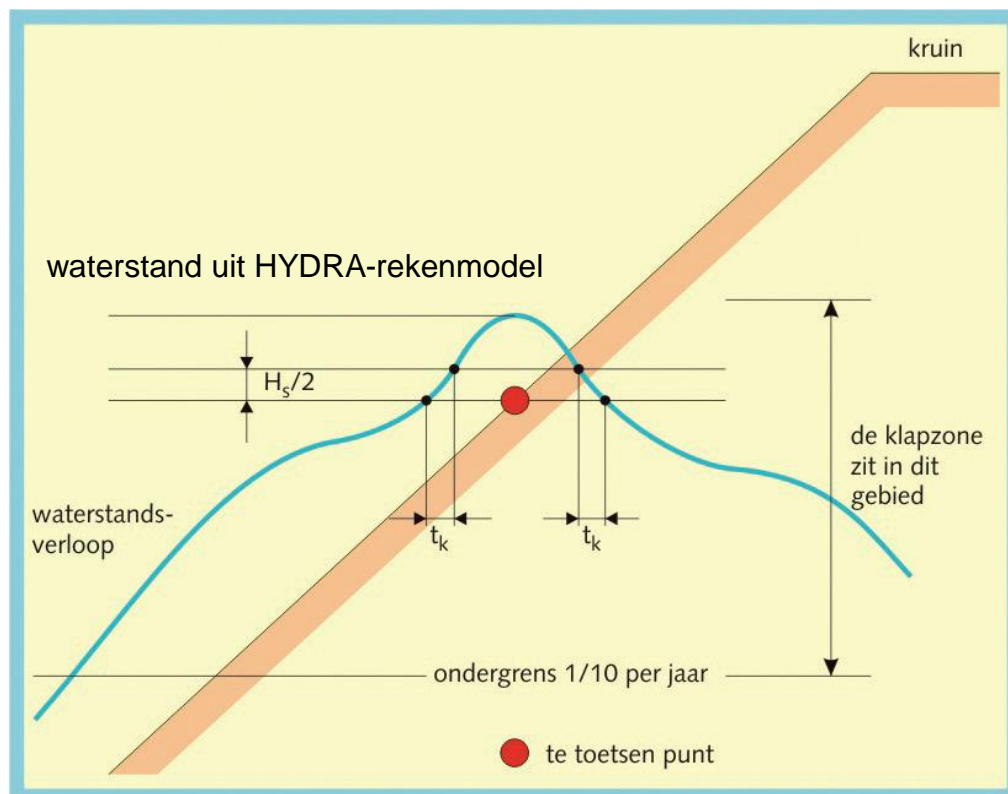
De parameters voor de karakterisering van de belasting in de golfklapzone zijn de significante golfhoogte aan de teen van de dijk H_s , de golfperiode T_p (behorende bij de piek van het energiedichtheidspectrum), de taludhelling α_k (waarbij de k staat voor 'klap'), het waterstandverloop tijdens de maatgevende storm en de belastingduur. Omdat gras slechts in staat is om de golfklappen van vrij kleine golven te weerstaan, komt gras in de golfklapzone vrijwel alleen op rivierdijken voor.

De maatgevende hydraulische randvoorwaarde voor de toetsing van de grasbekleding op golfklappen kan worden bepaald met de HYDRA-rekenmodellen. Uit het model volgt de waterstand (let op: dit hoeft niet gelijk te zijn aan het Toetspeil), golfhoogte, golfperiode en golfrichting. Een waterstandverloop en daarmee een belastingduur wordt nog niet door de HYDRA-rekenmodellen bepaald. Totdat dit wel het geval is, zal gebruik moeten worden

gemaakt van de vigerende leidraden en technische rapporten, waarbij wordt uitgegaan van een conservatieve schatting van de belastingduur.

De in rekening te brengen helling α_k is, vereenvoudigd gezien, de gemiddelde helling van het buitentalud over het gedeelte van $1,5 \cdot H_s$ onder de waterstand voor het te beoordelen punt. Deze waterstand ligt normaal gesproken $0,5 \cdot H_s$ boven het te toetsen punt, met het toetspeil + toeslagen als bovengrens. Als in het betreffende taludgedeelte een berm aanwezig is, wordt deze niet meegerekend bij het bepalen van de gemiddelde helling. De in rekening te brengen hoek α_k voor het buitentalud kan precies worden bepaald met de formules uit [6]. De hoek is tevens een uitvoerparameter van PC-Overslag, waarin de formules uit [6] zijn geprogrammeerd.

In Figuur 4.10 is voor het mechanisme erosie door golfklappen getoond hoe de in rekening te brengen tijdsduur van de belasting (t_k) is te bepalen waarbij het te beoordelen punt op de dijk in de klapzone ligt.



Figuur 4.10 Bepalen tijdsduur belasting t_k in de klapzone

De tijdsduur t_k dat het te toetsen punt in de klapzone ligt is gelijk aan de tijd die de waterstandstijging en de waterstanddaling doen over een schijfhoogte van $0,5 \cdot H_s$ m boven het te beoordelen punt. De tijdsduur t_k wordt begrensd door de stormduur die geldt binnen de verschillende watersystemen.

Meestal zal er sprake zijn van een variërende waterstand. Door hiermee rekening te houden, wordt doorgaans een gunstiger toetsresultaat verkregen, zie paragraaf 7.3.3.

4.4 Golfloop

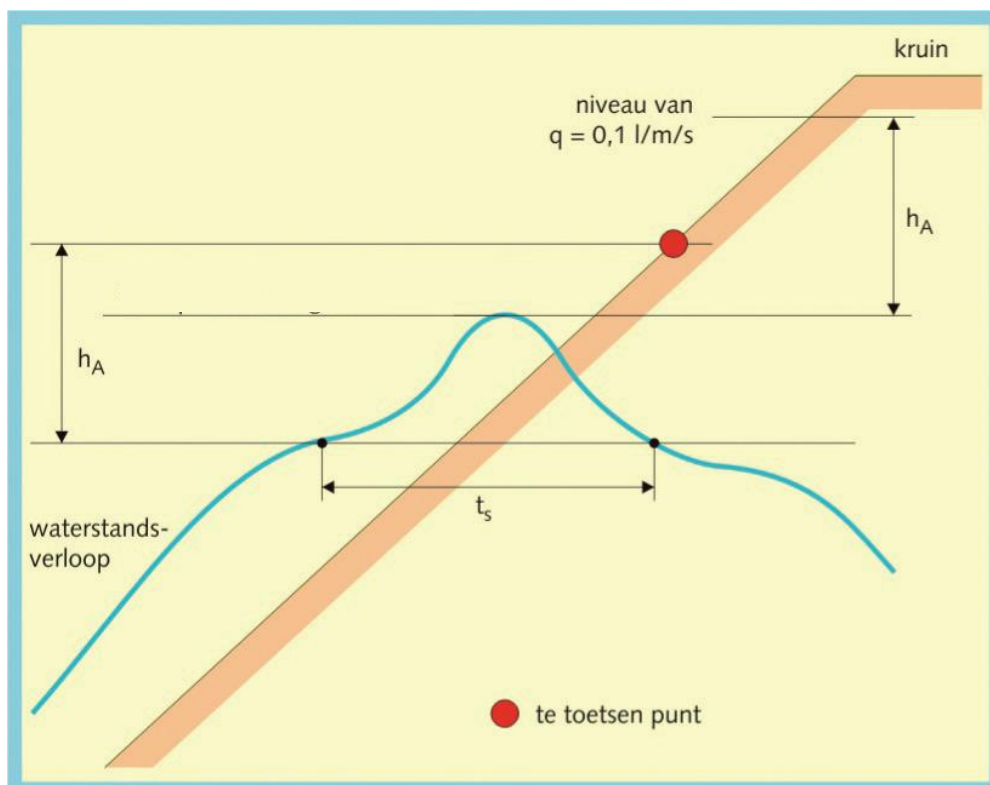
De parameters die de belasting karakteriseren in de golfloopzone zijn: de rekenwaarde v_r van de stroomsnelheid tijdens een golfperiode, de taludhelling α_o (waarbij de o staat voor 'oploop'), het waterstandverloop tijdens de maatgevende storm, inclusief getij, en de belastingduur.

Net als voor de golfklapbelasting geldt dat de maatgevende hydraulische randvoorwaarde voor de toetsing van de grasbekleding op golfloop kan worden bepaald met de HYDRA-rekenmodellen. Uit het model volgt de waterstand (let op: dit hoeft niet gelijk te zijn aan het Toetspeil), golfhoogte, golfperiode en golfrichting.

Een waterstandverloop en daarmee een belastingduur wordt nog niet door de HYDRA-rekenmodellen bepaald. Totdat dit wel het geval is, zal gebruik moeten worden gemaakt van de vigerende leidraden en technische rapporten, waarbij wordt uitgegaan van een conservatieve schatting van de belastingduur (zie bijvoorbeeld figuur 7.2a in paragraaf 7.3.3).

De in rekening te brengen hoek α_o voor het buitentalud kan worden bepaald met de formules uit [6]. De hoek is tevens een uitvoerparameter van PC-Overslag, waarin de formules uit [6] zijn geprogrammeerd.

De tijdsduur t_s waarbij het te beoordelen punt op het buitentalud in de oploopzone ligt, is gelijk aan de tijd die de waterstandstijging en de waterstanddaling doen over een schijfhoogte gelijk aan het hoogteverschil tussen de met de HYDRA rekenmodellen bepaalde waterstand + toelagen en het niveau op h_A beneden het te beoordelen punt. De parameter h_A is gelijk aan de oploophoogte z_q , gedefinieerd als de oploophoogte ten opzichte van de waterstand + toelagen, behorende bij een fictief overslagdebiet q ter grootte van 0,1 l/s per m. (zie Figuur 4.11).



Figuur 4.11 Bepalen tijdsduur belasting t_s in de golfloopzone.

De oploophoogte z_q wordt berekend met behulp van de HYDRA-rekenmodellen of PC-overslag. Bij een complexe geometrie van het talud moeten eerst de randvoorwaarden (waterstand + toeslagen en golfrandvoorwaarden) worden bepaald met de HYDRA-rekenmodellen op basis waarvan het overslagdebiet met PC-overslag of de formulerings uit [6] wordt bepaald. Bij die berekening moet normaal gesproken rekening worden gehouden met de invloed van een eventuele buitenberm op de golfoploop, alleen voor de toetsing van grasbekledingen in de oploopzone ónder een berm moet z_q worden bepaald zonder rekening te houden met de berm, en uitgaand van α_0 . *(Let op dat het niveau van z_q boven het fysiek aanwezige kruinniveau kan liggen. In dat geval is z_q een fictief niveau, boven het kruinniveau, alsof het buitentalud zou doorlopen boven het aanwezige kruinniveau).*

De tijdsduur t_s wordt begrensd door de stormduur die geldt binnen de verschillende watersystemen.

Direct boven de klapzone is het buitentalud voortdurend 'nat'; verder naar boven zal het talud periodiek 'droog' staan. Hiervoor kan een correctie worden toegepast op de belastingduur t_s . De rekenwaarde voor de belastingduur t_{sr} wordt: $t_{sr} = (1 - z/z_q) \cdot t_s$.

De belastingparameter v_r is een rekenwaarde voor de oploopsnelheid ter plaatse van het te beoordelen punt. De rekenwaarde bedraagt ongeveer de helft van de oploopsnelheid die bij 2% van de inkomende golven wordt overschreden. De waarde van v_r is afhankelijk van de golfparameters, de taludhelling en het niveau van het te toetsen punt ten opzichte van de met de HYDRA-rekenmodellen bepaalde waterstand+toeslagen en ten opzichte van het niveau waar de golfoploop is afgenomen tot 0,1 l/s per m. De formule is als volgt [27]:

$$v_r = 700 \cdot \frac{H_s}{T_p} \left(0,085 - \frac{H_s}{L_{op}} \right) \cdot \left(\frac{z_q - z}{z_q} \right)^{0,5} \cdot \tan(\alpha_0) \quad (4.8)$$

waarin:

- z = hoogte (m) van het te toetsen punt op het buitentalud [m] ten opzichte van de met de HYDRA-rekenmodellen bepaalde waterstand + toeslagen.
- z_q = (fictieve) golfoploophoogte (m) behorende bij een oploopdebiet q van 0,1 l/s per m op een oneindig lang talud met een helling gelijk aan α_0 . z_q wordt berekend met de HYDRA modellen, of bij een complexe geometrie, met PC-overslag of de formules uit [6].
- L_{op} = golflengte op diep water (m) die hoort bij de piekperiode T_p (s).
- α_0 = effectieve hellingshoek (-), rekening houdend met teen, berm en kruin conform [6] of te berekenen met PC-Overslag.

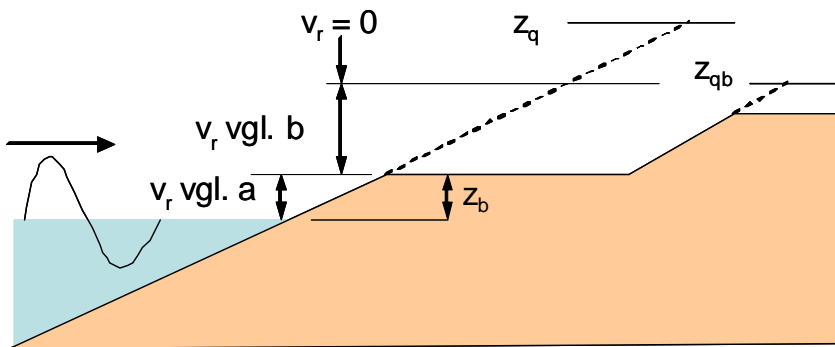
Als er een berm in de oploopzone aanwezig is, dan is het oplooppniveau (z_{qb}) behorende bij een oploopdebiet q van 0,1 l/s per m een stuk lager dan z_q (Figuur 4.12). Formules hiervoor zijn gegeven in [6].

Voor niveaus boven z_{qb} is de belasting nihil: $v_r = 0$. Voor de zone onder de berm wordt de rekensnelheid gelijk verondersteld aan die wordt berekend alsof er geen berm aanwezig is (vergelijking a). In de zone boven de berm en onder z_{qb} wordt de rekensnelheid berekend met vergelijking b.

$$\text{Voor } z < z_b: \quad v_r = 700 \cdot \frac{H_s}{T_p} \left(0,085 - \frac{H_s}{L_{op}} \right) \cdot \left(\frac{z_q - z}{z_q} \right)^{0,5} \cdot \tan(\alpha_0) \quad (\text{vgl. a})$$

$$\text{Voor } z_b < z < z_{qb}: v_r = 700 \cdot \frac{H_s}{T_p} \left(0,085 - \frac{H_s}{L_{0p}} \right) \cdot \left(\frac{z_{qb} - z}{z_q} \right)^{0,5} \cdot \tan(\alpha_0) \quad (\text{vgl. b})$$

$$\text{Voor } z > z_{qb}: v_r = 0$$



Figuur 4.12 Definities bij de berekening van v_r (m/s) in de golfploopzone volgens vergelijking a, b, of $v_r=0$ in het geval van een dijk met een buitenberm.

Meestal zal er sprake zijn van een variërende waterstand. Door hiermee rekening te houden, wordt doorgaans een gunstiger toetsresultaat verkregen, zie paragraaf 7.3.3.

5 Faalmechanismen grasbekleding

5.1 Inleiding

Een grasbekleding, met een toplaag en onderlaag (zie paragraaf 2.3) kan afhankelijk van verschillende vormen belasting (Hoofdstuk 4), verschillende vormen van erosie en faalgedrag laten zien. Door waarnemingen bij diverse golfoverslagproeven en proeven in een golfgoet is inzicht ontstaan over de verschillende fysieke mechanismen die tot falen leiden. In paragraaf 5.2 komen de faalmechanismen aan bod die betrekking hebben op de kruin en het binnentalud, in paragraaf 5.3 die voor het buitentalud.

Wat betreft de grootte van de erosie is onderscheid te maken in incidentele erosie door lokale oneffenheden (paragraaf 5.2.1) en in de hierna te bespreken grootschaliger erosiemechanismen (paragraaf 5.2.2 en verder). De incidentele erosie hangt samen met lokale oneffenheden die een gevolg zijn van de heterogeniteit van grasbekledingen in het algemeen. Onder een golfoverslagbelasting kunnen lokale zwakheden leiden tot bijvoorbeeld een graspol die eruit springt. Deze gebeurtenis zal niet automatisch tot falen van de grasbekleding leiden. Na het uitspringen van een graspol, kan het onderliggende wortelnet nog intact zijn. De toplaag, en daarmee de grasbekleding, heeft dan nog niet gefaald.

Steeds wordt er van uitgegaan dat de belasting door zout water slechts kort plaatsvindt, waardoor het zout een verwaarloosbare invloed heeft op de kwaliteit van de grasmat.

5.2 Kruin en binnentalud- golfoverslag

5.2.1 Uittrekmechanisme

Het mechanisme dat ten grondslag ligt aan meerdere vormen van erosie van de grasbekleding is het zogenaamde uittrekmechanisme. Bij dit mechanisme wordt een stuk zode opgetild en uit z'n structuur gehaald door de stroming ten gevolge van golfoverslag. Een typische afmeting van de zode die bij dit mechanisme verdwijnt, is ongeveer 15 bij 15 centimeter. Het stuk zode kan minder dik zijn dan de toplaag, maar het kan ook de hele toplaag bevatten, in welk geval instantaan falen van de grasbekleding optreedt. Door de hoogturbulente stroming wordt een onderdruk aan de bovenzijde van de toplaag gecreëerd. Door het drukverschil over de dikte van de zode verandert het verticale evenwicht voor het betreffende stuk zode. Er staat als gevolg een netto verticale kracht op het stuk graszode, dat kan leiden tot het lostrekken van de graszode (Figuur 5.1).

Een bijzonder geval van het uittrekmechanisme ontstaat wanneer een groter deel van de zode wordt losgewerkt, wat kan gebeuren als de zode zijdelings goed vast zit. In dit geval kan het stuk zode eerst opbollen voordat het uit de bekleding wordt getrokken.

De opbolling heeft betrekking op de toplaag of deel van de toplaag. Het opbollen alleen leidt niet direct tot erosie van de toplaag; maar omdat de "bol" boven het talud uitsteekt, zal een eerstvolgende grote overslaande golf het geheel los slaan, zodat de grasbekleding direct over een groot oppervlak verdwijnt. Dan ontstaat nauwelijks opbolling. In de onderstaande Figuur 5.2 worden enkele stadia van het mechanisme van opbolling weergegeven, waarbij de afmeting groter was (circa 50 x 50 cm²).



Figuur 5.1 Uittrekmechanisme (golfoverslagproeven op St. Philipsland)



Figuur 5.2 Opbolmechanismen (golfoverslagproeven op Waddenzeedijk Friesland bij de Boonweg)

Het opbolmechanisme kan de laag onder de toplaag blootstellen. Hierdoor kunnen andere erosiemechanismen hun intree doen op het talud.

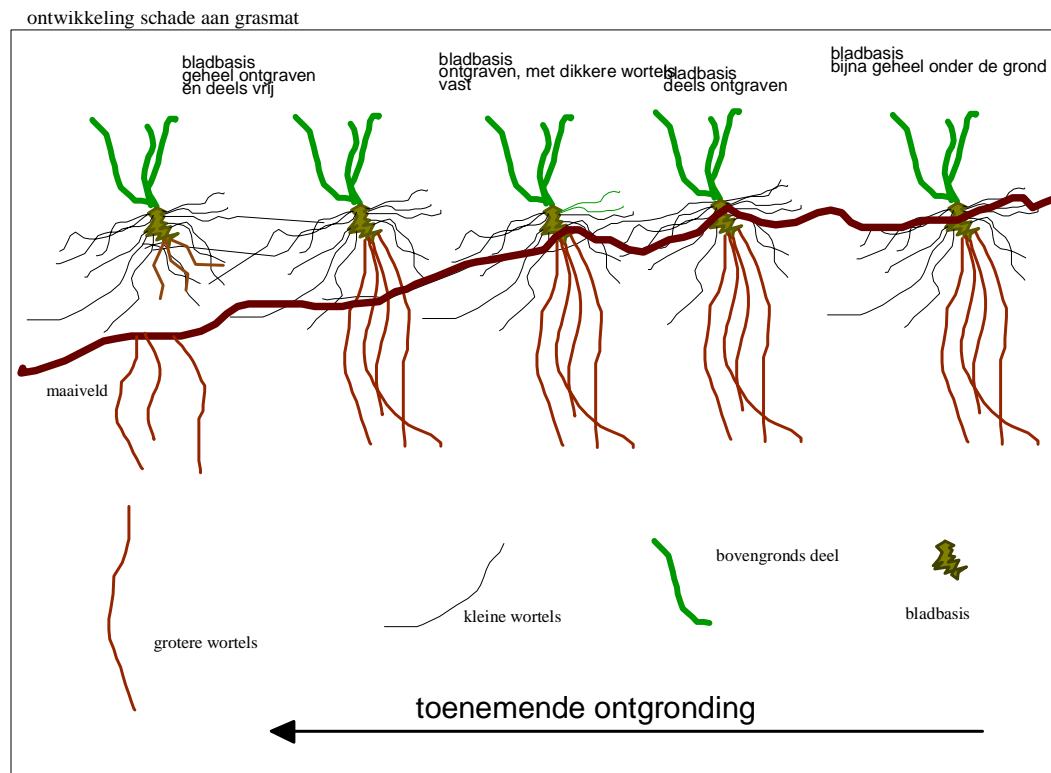
Het mechanisme is diverse keren waargenomen bij golfoverslagproeven op het binnentalud, maar het is denkbaar dat het mechanisme ook op het buitentalud kan optreden in de golfoploopzone.

Het uittrekmechanisme is een belangrijk mechanisme dat wordt ondervangen door het erosiemodel beschreven in paragraaf 6.2.

5.2.2 Slijterosie

De kenmerken van slijterosie is dat het medium laagje voor laagje wordt geërodeerd onder meevoering door het stromende water. Deze erosievorm komt voor bij loskorrelig materiaal en kale klei, zonder veel cohesie door bijvoorbeeld (te weinig) wortels en of cementatie van

gronddeeltjes. Het stromende water dat ten gevolge van de golfoverslag over het medium spoelt, spoelt telkens een klein laagje van het materiaal mee, zie Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Ontwikkeling van slijterosie bij een grasbekleding

Het mechanisme komt voor bij zowel zand als klei. Laagje voor laagje wordt het materiaal, redelijk gelijkmatig, weggespoeld/getransporteerd. Bij slijterosie zou men kunnen spreken van een continu proces onder gelijkblijvende stroming. Bij golfoverslag is sprake van pulsbelastingen (stroming) en slijterosie is daardoor in het specifieke geval van golfoverslag slechts “continu” in geval er stroming over het medium plaatsvindt.

Bij klei wordt opgemerkt dat de verschillende verschijningsvormen van klei een andere mate van slijterosie ondergaan. Met uitzondering van net aangelegde dijken, zal klei in een grasbekleding in het algemeen een ontwikkelde bodemstructuur hebben (zie paragraaf 3.3.2). Hierbij zijn er in de fysieke structuur clusteringen van verschillende “klei aggregaten” waarneembaar. Tevens is vaak de porositeit van deze klei groter. De aggregaten eroderen op een andere wijze dan homogene klei, zoals in het geval het kale klei betreft.

Het mechanisme slijterosie blijkt, aan de hand van de overslagproeven, slechts in beperkte mate op te treden bij een grasbekleding en was nooit het maatgevende mechanisme voor falen van de toplaag. Onder belasting van golfoverslag wordt gras schoongespoeld; alle bladeren, vuil en andere losse deeltjes worden door de eerste golven weggespoeld. Met verloop van de proeven werden de bladbasis en de bovenste worteldelen blootgelegd. Het was daarna echter altijd een ander mechanisme waardoor falen van de toplaag optrad. Gras zit goed vast door het wortelnet en erosie van noch de grassprietten zelf of de spriet-wortel verbinding treden op significante schaal op.

Ook op het buitentalud, onder aanval van stroming, golfklappen en golfoploop kan dit mechanisme optreden.

Slijterosie is voor grasbekledingen niet maatgevend gebleken. Er wordt geen specifiek voor dit type erosie afgeleid model gegeven.

5.2.3 Jet erosie

Jet erosie is het verschijnsel dat zich manifesteert bij overgangen van een talud naar een horizontaal deel van de dijk. Bijvoorbeeld bij de teen van het talud, zie Figuur 5.4, of bij een berm. Bij deze overgangen ondergaat de stromingsrichting en snelheid vaak een abrupte verandering, wat een extra belasting op de grasmat oplevert.



Figuur 5.4 Jet erosie bij de overgang van een talud naar horizontaal

De afstromende waterlaag zorgt voor een grote impact op het oppervlak. Als zich eenmaal een kuil met een zekere diepte heeft ontwikkeld zal de toename van de kuil diepte per tijdseenheid afnemen omdat de jet in een waterlaag stort. De eroderende kracht neemt daardoor af. Op dat moment heeft de toplaag echter al gefaald.

Het mechanisme is tijdens golfoverslagproeven meerdere keren waargenomen, en heeft ook geleid tot falen van de toplaag. Het is een belangrijk mechanisme, waarvoor echter nog geen specifiek en adequaat model is ontwikkeld (paragraaf 6.2).

5.2.4 Afstropen

Wanneer een deel van de toplaag door een bepaald mechanisme of door (maai)schade is verwijderd, dan staat de benedenstrooms gelegen toplaag bloot aan de stroming. Deze

stroming kan sterk genoeg zijn om dit overgebleven deel ook gedeeltelijk los te rukken. In de praktijk zal het afstropen (afscheuren) van een deel van de toplaag in fases gebeuren. In onderstaande figuur is te zien hoe het afstropen van een toplaag plaatsvindt. Opgemerkt wordt dat in verschillende gevallen alleen de zode werd verwijderd door afstropen en dat het overgebleven deel van de doorwortelde toplaag nog lang stand hield tegen golfoverslag (Figuur 5.5). In dat geval faalt de toplaag dus nog niet.



Figuur 5.5 Afstropen van een deel van de toplaag (Aflsuitdijk) en afstropen na aanbrengen van schades (Zeedijk bij Delfzijl)

Dit mechanisme kan ook op het buitentalud optreden, als vervolgmecanisme na een schade (al dan niet veroorzaakt door stroming of golfoploop).

Falen van de toplaag, eventueel als gevolg van afstropen, of als gevolg van verdere erosie van de toplaag na afstropen van de zode, wordt ondervangen door het model dat wordt beschreven in paragraaf 6.2.

5.2.5 Head-cut erosie

Zogenaamde head cut erosie is het terugschrijden van een kuil in stroomopwaartse richting. Een kuil verdiept zich en wordt gekenmerkt door een horizontaal deel en een aansluitende verticale wand. De verticale wand wordt op een gegeven moment instabiel en schuift of brokkelt af, zie Figuur 5.6. De toplaag, en daarmee de grasbekleding is op dat moment al bezweken.

Bij dijken met een kleilaag op een zandkern is er sprake van een combinatie van slijterosie en wegspoeling van zand uit de kern van het talud. Dit leidt tot ondermijning van de toplaag. Op een zeker moment scheurt de bovenstrooms aanwezige toplaag af, zie Figuur 5.6 (rechts).



Figuur 5.6 Head cut erosie op een zeedijk van kale klei bij Delfzijl, beproefd met de golfoverslagsimulator na verwijderen van de toplaag (links). Head cut erosie bij zanddijk met kleibekleding Sint Philipsland (rechts)

In het onderstaande worden de achtereenvolgende gebeurtenissen, die leiden tot head cut erosie in een dijk met een kleilaag op een zandkern, beschreven (Figuur 5.7):

1. Een stuk zode erodeert, bijvoorbeeld door het uittrekmechanisme gevolgd door het afstroopmechanisme.
2. Door slijterosie erodeert de kleilaag onder de toplaag.
3. Hierdoor wordt de zandkern blootgesteld aan de golfoverslag. Het zand bezit geen cohesie en is daardoor slecht tegen stroming bestand.
4. Dit blootgestelde zandtalud wordt beïnvloed door twee mechanismen:
 - a. Slijterosie in de vorm van terugschrijdende erosie. Terugschrijdend slaat in dit geval op het verschijnsel dat de erosievorm zich van benedenstrooms richting bovenstrooms manifesteert.
 - b. Uitzakking. Door de terugschrijdende erosie ontstaan verschillende instabiliteiten in het zandtalud. Dit mechanisme berust op het principe, dat zand dat onder een talud steiler dan haar eigen hoek van inwendige wrijving bevindt, zal uitzakken naar een natuurlijke hoek.
5. De toplaag en of kleilaag bovenaan de kuil wordt zo ondermijnd en breekt/scheurt af.

De toplaag wordt ook aan de onderkant van de ontgrondingskuil blootgesteld aan geconcentreerde stroming. De toplaag wordt hier dan ook onder invloed van de versterkte stroming weggespoeld/geduwd. Dit kan stukken toplaag van verschillende formaten betreffen. Veelal vindt dit laatste mechanisme ook in fasen plaats (afstropen).

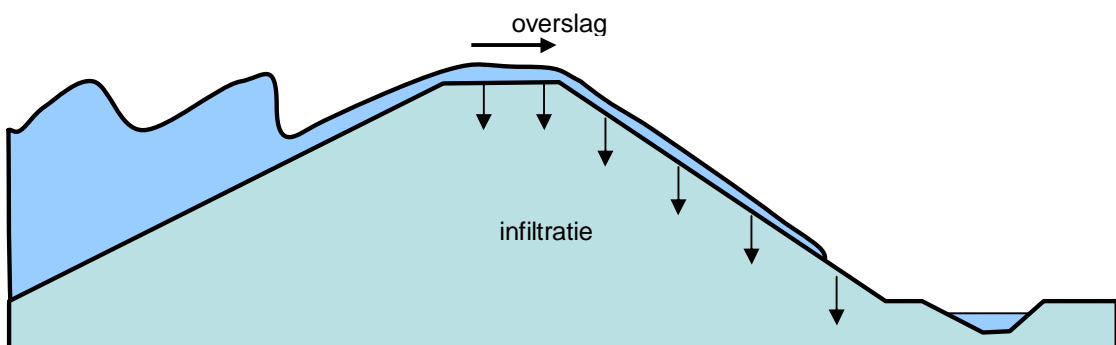
In deze handreiking wordt geen model gegeven dat het verloop van Head-cut erosie voorspelt. Het mechanisme treedt op nadat de toplaag heeft gefaald. Het verloop van erosie na falen van de toplaag is belangrijk voor het faalgedrag en de faalkans van de hele waterkering, maar valt buiten het kader van deze handreiking.



Figuur 5.7 Afbrokkelen van de bovenrand van een grasbekleding bij een zanddijk met een 0,6 m dikke kleilaag (Waddenzeedijk Friesland bij de Boonweg)

5.2.6 Afschuiven bekleding binnentalud

Door golfoverslag zal de kruin en het binnentalud gedurende enige tijd nat zijn, afhankelijk van de tijdsduur en de aard van de overslag. Een klein deel van het overslaande water dringt de dijk binnen: 'infiltreren' (Figuur 5.8). Infiltratie kan leiden tot afschuiven. Bij de watersnoodrampen van zowel 1916 als 1953 zijn veel dijken bezweken door afschuiven van het binnentalud onder invloed van overslag. De dijken hadden destijds een steil binnentalud, wat de taluds gevoelig maakt voor afschuiven bij golfoverslag.



Figuur 5.8 Infiltratie bij golfoverslag

Bij infiltratie door overslag of neerslag treedt water via de kruin en binnentalud in de dijk. Tijdens dit infiltratieproces neemt de volumieke massa van de grond toe en neemt de waterspanning af, waardoor instabiliteit van de bekleding kan optreden. De mate van infiltratie is afhankelijk van de tijdsduur en aard van de overslag en de doorlatendheid van de afdekkende grondlaag (zie paragraaf 4.2.6).

De waterspanningen in de infiltratiezone zijn nauwelijks van enige betekenis zolang het geïnfilterde water verder de dijk instroomt. De factor tijd is dus erg belangrijk. Pas als het vertikaal infiltrerende water een minder doorlatende laag tegenkomt, of het freatische vlak in de dijk bereikt, kan de waterspanning toenemen en nemen de aanwezige korrelspanningen af en daarmee de te mobiliseren schuifspanning. De aandrijvende kracht daarentegen neemt toe doordat de grond verzadigd is met water. Dit heeft een negatief effect op de stabiliteit van het binnentalud. Instabiliteit van het binnentalud uit zich door de aldaar optredende vervormingen. Het talud verplaatst zich in eerste instantie richting de teen van de dijk en bolt op. Nabij de kruinlijn ontstaat een trekzone waar een scheur parallel aan de kruin kan ontstaan. Wanneer deze situatie zich voordoet bij een zanddijk met een kleibekleding, dan wordt de dijk als bezweken beschouwd. Prototypeproeven bij Wissenkerke hebben aangetoond, dat het ontstaan van een scheur en het op bollen of uitbuiken van de onderzijde van het binnentalud nagenoeg gelijktijdig optreden. Op het moment dat een scheur is ontstaan, verdwijnt ineens veel meer van het overgeslagen water in de scheur en zorgt ervoor dat de dijk zeer snel verzadigd raakt en afschuiven van het binnentalud inleedt. Het betreft meestal een oppervlakkige afschuiving waarbij de grasbekleding in zijn geheel van de dijk schuift en de dijk kern blootstelt aan erosie door het overslaande water, waarna een bres kan ontstaan.

Na de stormvloed van van 1916 en 1953 zijn deze parallelscheuren waargenomen. In sommige gevallen waren door de beheerders zeildoeken over de scheuren neergelegd. Dit heeft veelal het bezwijken van de dijken vertraagd. Het bezwijkmechanisme door infiltratie wordt sterk bepaald door de configuratie (hellingshoek) en de opbouw van een dijk. Bij toepassing van taluds, die flauwer zijn dan 1V:3H, blijkt uit ervaring dat er nauwelijks gevaar is op instabiliteit ten gevolge van infiltratie door golfoverslag.

Er kunnen voor het beschrijven van het infiltreren twee karakteristieke situaties worden onderscheiden:

- Grondlichaam bestaat uit een kleikern, afgedekt met een laag doorgroeide klei met bodemstructuur;
- Grondlichaam heeft een zandkern, afgedekt met een kleilaag.

Afschuiven bij een kleikern

De klei aan het oppervlak is als gevolg van bodemstructuur veel doorlatender dan de klei in de kern. Scheuren, wormgangen en wortelkanalen creëren een voor klei vrij hoge doorlatendheid, waardoor de infiltratiesnelheid in de orde van 10^{-5} tot 10^{-4} m/s is, ofwel in de orde van 0,1 à 0,01 l/s per m² dijkoppervlak. Bij overslag infiltreert water juist het sterkst in de bovenste laag met bodemstructuur en kan niet verder de ondoorlatende kern in stromen. Als de kleilaag met bodemstructuur is verzadigd, dan ontstaat een grondwaterstroming parallel aan het talud. De korrelspanning neemt hierdoor uiteindelijk zoveel af, dat een glijvlak kan ontstaan op de grens van de laag met bodemstructuur en kern op een diepte van orde 1 m onder het maaiveld. Bij een steil talud schuift de laag met bodemstructuur af.

Afschuiven bij een zandkern

Ook bij grondconstructies met een zandkern kan infiltratie de oorzaak van het bezwijken door overslag zijn. De doorlatendheid van de bekledingslaag is sterk anisotroop. Door bodemstructuur, scheuren, wormgangen en begroeiing, is de doorlatendheid van de bekledingslaag van gelijke orde van grootte als die van de kern. In verticale richting is de doorlatendheidswaarde groter dan in de richting langs het talud. Door deze anisotropie zakt het meeste water vertikaal de zandkern in. Als de kern niet is gedraineerd of als de bekledingslaag in horizontale richting minder doorlatend is dan de kern, dan kan als gevolg van het infiltrerende water bij de teen onder de bekleding een hogere freatische lijn ontstaan, die een opwaartse druk over de bekledingslaag veroorzaakt. Bij het beoordelen van afschuiven van het binnentalud onder invloed van overslag moet in dat geval rekening worden gehouden met deze extra belasting op de binnenbekleding. Aanbevolen wordt in die gevallen een grondwaterstroming berekening te maken om de freatische lijn in de dijk te kunnen bepalen. De duur van het infiltreren is hierbij van belang voor de totale hoeveelheid water die via het binnentalud kan infiltreren. Als de hoogte van de freatische lijn eenmaal is bepaald, dan kan de stabiliteit van de bekledingslaag worden gecontroleerd.

In paragraaf 6.3 wordt beschreven hoe de toename van de waterspanningen in en onder de bekleding, als gevolg van golfoverslag, kan worden bepaald. Met deze waterspanningen en [4] kan vervolgens worden gekeken of de bekleding stabiel is.

5.3 Buitentalud

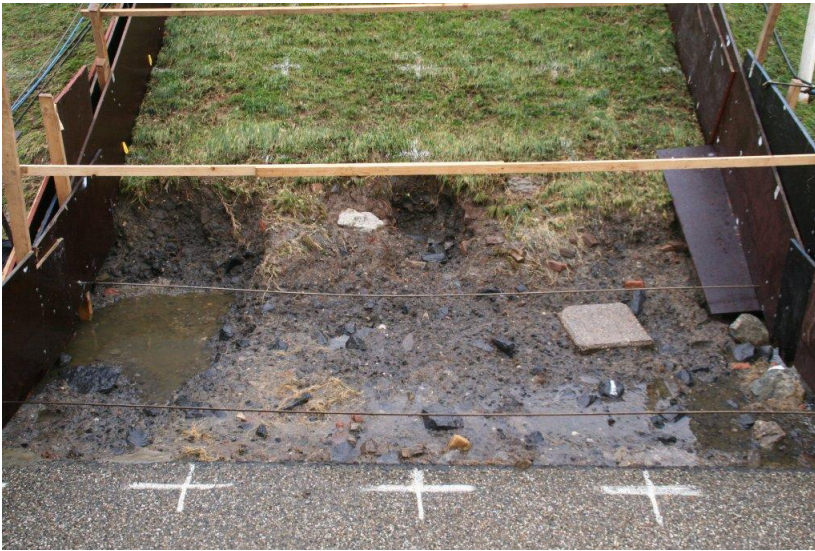
5.3.1 Inleiding

In principe zijn op het buitentalud dezelfde erosiemechanismen te verwachten als op de kruin en het binnentalud, dus het uittrekmechanisme, opbolmechanisme, slijterosie, headcut erosie, afstropen en jet erosie (zie paragraaf 5.2.1 tot en met 5.2.5). Aanvullend is erosie door golfklappen.

Voor de andere mechanismen is het grootste verschil dat de belastingfrequentie veel hoger is. Alle golven zullen immers het talud op en neerlopen, terwijl alleen de grotere golven leiden tot golfoverslag. De stroomsnelheden zullen veelal ook hoger zijn, want het is de volledige golf die na het breken het boventalud opstroomt en bij golfoverslag bereikt alleen het bovenste deel van de golf de kruin en het binnentalud.

Van de erosiemechanismen die ook voorkomen op het binnentalud vraagt met name jet erosie extra aandacht. Op het buitentalud zijn vaak bermen aanwezig in de golfoploopzone en dat betekent dat de jet van de golfoploop de overgang van de berm naar het boventalud aanvalt, zie Figuur 5.9.

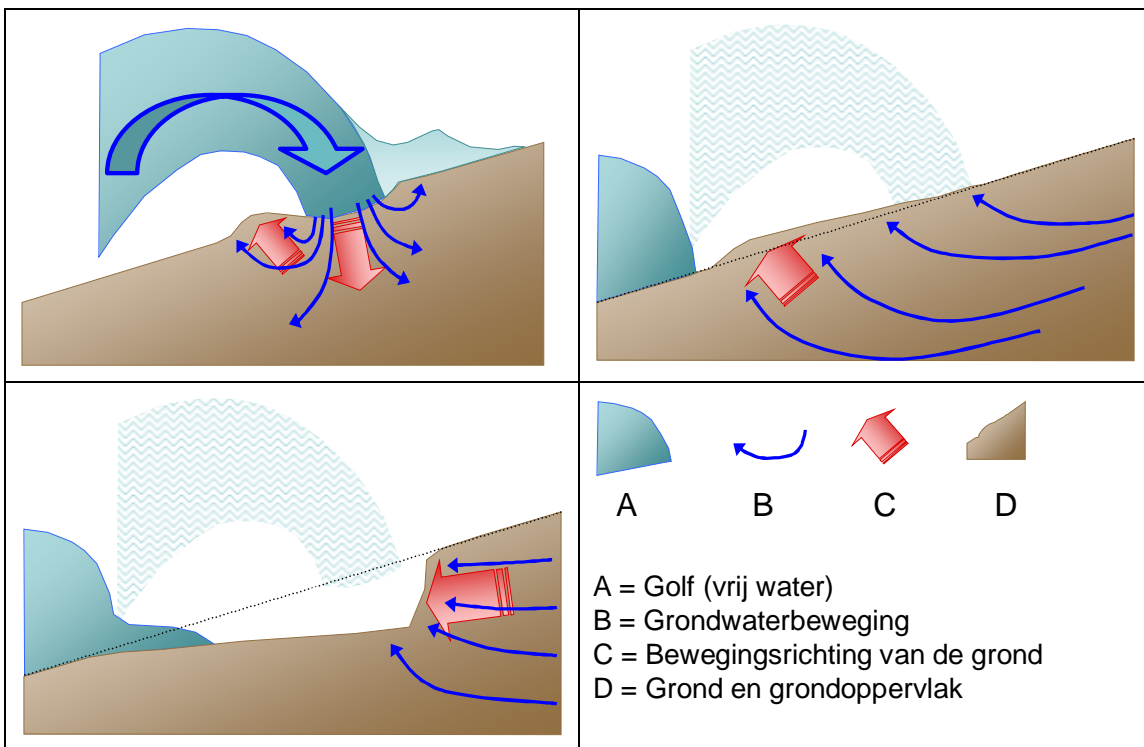
De erosie vindt vooral bij golfoploop plaats, omdat dan een golf over het droge talud loopt. Bij golfneerloop is er geen golfvrijvlak aanwezig, waardoor de belasting in golfneerloop kleiner is. Het schademechanisme bij golfoploop en overgangen lijkt op headcut erosie, maar toch is het jet erosie, omdat de golfkrachten tegen het, na initiële schade ontstane, versteilde talud lopen. Voorlopig is nog maar één pilot-proef uitgevoerd met golfoploopsimulatie en het is best mogelijk dat in andere omstandigheden er andere met de overslag vergelijkbare mechanismen kunnen optreden. Onderzoek moet hier meer helderheid in brengen.



Figuur 5.9 Schade bij de overgang van buitenberm naar bovenbeloop van het buitentalud door golfoploop.

5.3.2 Erosie door golfklappen

Het op het talud vallen van de oversteilde, brekende golf, de golfklap, veroorzaakt een puls van waterdruk in het talud en oefent een directe kracht uit op het talud. De waterdrukpuls verlaagt de effectieve spanning in de grond, waarvan de toplaag tenminste gedurende korte tijd in gefluïdiseerde toestand verkeert. Bovendien wordt de grond in en rond de inslagzone bij grotere golfklappen plastisch, waardoor eventuele deformatie irreversibel is (zie Figuur 5.10). Er ontstaat na aanvankelijke beschadiging een steile klif die achteruit schrijdt door de instabiliteit ervan, mede door de druk van het water in het talud.



Figuur 5.10 Schematische weergave voor een dijktalud van het effect van golfklappen

In paragraaf 6.4 wordt het model gegeven waarmee erosie van de grasbekleding door golfklappen kan worden voorspeld.

5.3.3 Afschuiven bekleding buitentalud

De grasbekleding op het buitentalud, bestaande uit de toplaag en onderlaag, kan afschuiven als gevolg van een snelle daling van de waterstand. Indien de waterstand veel sneller daalt dan dat het water uit de dijk kan stromen, dan ontstaat een ongunstige waterdrukverdeling onder het talud dat als gevolg hiervan kan afschuiven. Bij een volgende hoge waterstand kan dit leiden tot falen van de dijk, als niet tijdig maatregelen worden genomen. Dit mechanisme speelt in de zone van het buitentalud onder het toetspeil.

In de zone boven het toetspeil, in de golfoploopzone, kan net als op het binnentalud, infiltratie optreden dat leidt tot afschuiven. Voor de beschrijving wordt verwezen naar paragraaf 5.2.6.

5.4 Invloed toelaten overslag op andere faalmechanismen

Naast de mechanismen afschuiven van de bekleding van het binnentalud en erosie van de grasbekleding kan het toestaan van overslag ook gevolgen hebben voor andere mechanismen. Hiermee dient rekening te worden gehouden als het overslagdebiet groter is dan 0,1 l/s per m. De invloed op de mechanismen wordt als aandachtspunt genoemd, maar wordt niet verder uitgewerkt.

5.4.1 Microstabiliteit

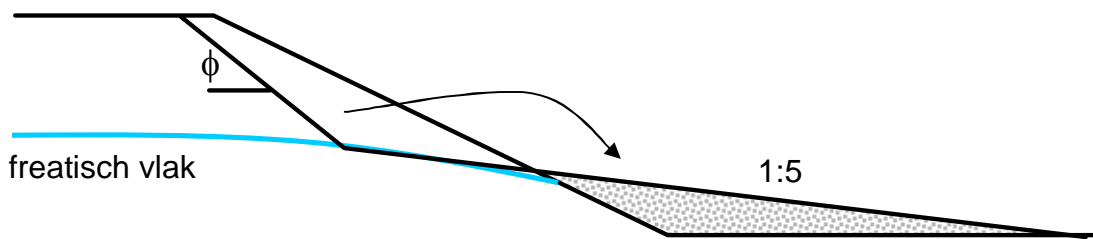
Bij de beoordeling van microstabiliteit in een zanddijk, al dan niet met kleibekleding, is de hoogte van het freatisch vlak in de zandkern van belang. Bij de bepaling van de hoogte van het freatisch vlak dient rekening te worden gehouden met water dat in de oploopzone, kruin en het binnenbeloop van de dijk infiltreert (zie ook paragraaf 0).

De beoordeling van micro-instabiliteit met behulp van het evenwichtsprofiel kan niet worden gebruikt indien er een significante hoeveelheid water, meer dan 0,1 l/s per m, over de dijk slaat. Hiermee wordt namelijk geen rekening gehouden bij het construeren van het evenwichtsprofiel.

Na het initiële optreden van het mechanisme, ontwikkelt zich uiteindelijk een evenwichtsprofiel dat bestaat uit een zeer flauw talud onder het uitredepunt van het freatisch vlak en een relatief stijl talud erboven. Bij de toetsing van de dijk op het mechanisme micro-instabiliteit kan gebruik worden gemaakt van het evenwichtsprofiel. Indien het evenwichtsprofiel nog voldoende waterkerend vermogen heeft, dan kan de dijk nog het oordeel 'voldoende' krijgen. Het evenwichtsprofiel kan worden geconstrueerd onder de volgende aannames:

- Het materiaal kan niet hoger dan het oorspronkelijk sijpeloppervlak uitspoelen;
- Het weggevoerde materiaal wordt afgezet onder een evenwichtshelling van circa 1V:5H;
- Het hoger gelegen materiaal kan bijzakken onder een helling van het natuurlijk talud (ϕ);

hierbij is een volume evenwicht noodzakelijk (Figuur 5.11).



Figuur 5.11 Evenwichtprofiel microstabiliteit

Bij het construeren van dit evenwichtsprofiel wordt geen rekening gehouden met een significante hoeveelheid overslag. De overslag zal het blootliggende zand in de kern van de dijk zeer snel kunnen eroderen. Toepassing van het evenwichtsprofiel bij een overslagdebiet groter dan 0,1 l/s per m is daarom niet mogelijk.

5.4.2 Macrostabiliteit binnenwaarts

Bij de beoordeling van macrostabiliteit, is de ligging van het freatisch vlak in de dijk van belang. Bij de bepaling van de hoogte van het freatisch vlak dient rekening te worden gehouden met water dat in de olopzone, kruin en het binnenbeloop van de dijk infiltreert (zie ook paragraaf 0).

Bij de beoordeling van het mechanisme macrostabiliteit binnenwaarts kan gebruik worden gemaakt van zonering [21]. Voor de toepassing van zonering geldt echter een grens van 0,1 l/s per m.

Bij zonering wordt rekening gehouden met het waterkerende vermogen van het restprofiel na het optreden van een afschuiving. Indien een dijk een zekere overbreedte heeft dan hoeft een afschuiving, zelfs als deze door de kruin gaat, niet direct te leiden tot het falen van de dijk. Ook het afschuiven van een berm of de kant van een teensloot hoeft niet te leiden tot inundatie, zodat voor de stabiliteitsfactor van dergelijke glijvlakken een lagere eis geldt. Er wordt bij de zonering echter in beperkte mate rekening gehouden met de eventuele gevolgen van erosie door golfoverslag na het optreden van een afschuiving. Na een afschuiving komt de kern van de dijk bloot te liggen. Zeker in het geval van een zanddijk zal eventuele overslag snel tot erosie van het kernmateriaal leiden, gevolgd door falen van de dijk. In het geval van een kleidijk zal er zeker nog een zekere reststerkte tegen erosie aanwezig zijn. Het bepalen van de hoeveelheid erosie zal hierbij lastig zijn, omdat het patroon van scheuren dat ontstaat als gevolg van afschuivingen, de waterstroming over de dijk kan concentreren. Een kant en klaar recept voor het bepalen van de gevolgen van erosie van de dijk kern na een afschuiving is momenteel nog niet beschikbaar.

5.4.3 Piping

Grote hoeveelheden overslag kan het opsporen van zandmeervoerende wellen belemmeren, waardoor het opkisten hiervan onmogelijk wordt. Dit is een aandachtspunt voor dijken, waarbij golfoverslag door hoge golven in combinatie met piping voorkomt.

6 Modellen

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden gedrags- en schademodelen beschreven met betrekking tot gedrag van grasbekledingen onder hydraulische belasting. De modellen voor het voorspellen van schade door golfoverslag (erosie en afschuiven) zijn opgebouwd aan de hand van de resultaten van meerdere jaren onderzoek in het kader van SBW (Sterkte en Belastingen Waterkeringen). Het voorspellen van schade op het buitentalud door golfklappen is eveneens in dit kader onderzocht en is met name gebaseerd op een her-analyse van eerder uitgevoerde golfgootproeven in combinatie met numerieke rekentechnieken [26]. Voor het modelleren van de overige faalmechanismen (zie Paragraaf 5.4), wordt verwezen naar de modellen in de vigerende leidraden en technische rapporten.

6.2 Erosie grasbekleding binnentalud bij golfoverslag

De onderzoeken die in de afgelopen jaren zijn uitgevoerd hebben de kennis over het gedrag van grasbekledingen aanzienlijk vergroot. Enkele jaren geleden was nauwelijks iets bekend over de werkelijke sterkte van een grasbekleding op kruin of binnentalud. Nu is het mogelijk een verantwoorde schatting te maken van de toelaatbare belasting gegeven de kwaliteit van de grasbekleding. Het is nog geen volledig geïntegreerd gedragsmodel dat de relatie grondsoort-vegetatie-beheer-doorworteling-sterkte-belasting omvat, maar het beschikbare model is al goed bruikbaar voor het eenvoudig en gedetailleerd toetsen van de grasbekleding. Verder zijn er aanzetten om uiteindelijk te komen tot dat geïntegreerd gedragsmodel.

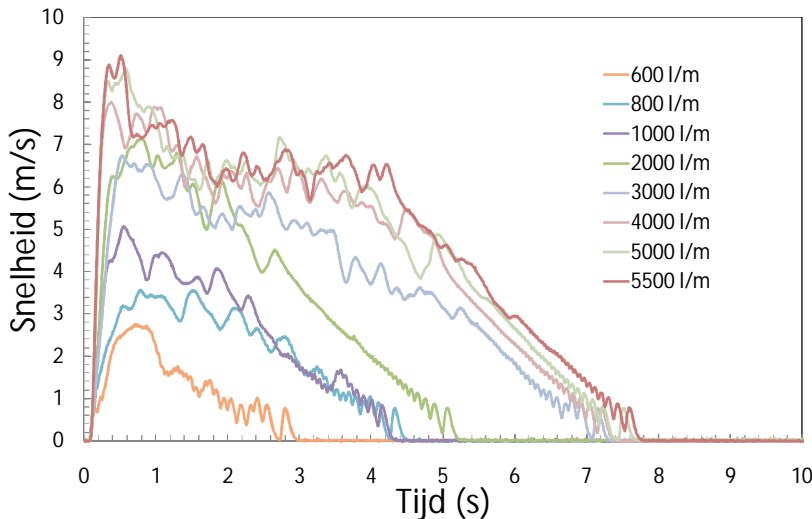
Golfoverslagproeven zijn op locatie uitgevoerd om de sterkte van een grasbekleding op kruin en binnentalud te kunnen bepalen onder winterse omstandigheden, wanneer het gras op zijn zwakst is, en de kans op golfoverslag het grootst. Bij het onderzoek is veel aandacht besteed aan de optredende belasting; stroomsnelheden, laagdikten, turbulentie. Ook is de schade vastgelegd, zodat een model kon worden opgesteld dat de schade voorspelt als functie van de belastinggrootte, belastingduur, maar ook eigenschappen van de grasbekleding zoals grondsamenstelling en graskarakteristieken.

Er zijn verschillende soorten golfoverslagproeven uitgevoerd. Allereerst de “gewone” proeven op een talud zonder obstakels. Daarnaast zijn proeven uitgevoerd naar de erosiebestendigheid van een horizontale overgang of oprit. Hier is sprake van jet erosie (zie hoofdstuk 5 voor de beschrijving van de mechanismen). Er zijn ook proeven uitgevoerd op een aantal niet waterkerende objecten. Deze staan apart beschreven in Hoofdstuk 7. Het gaat dan om taludtrappen en bomen. Tot slot is er een eerste pilotproef gedaan naar golfoploop. De meeste zee- en meerdijken hebben een grasbekleding boven toetspeil en dat taluddeel wordt bij een maatgevende storm zwaar belast.

6.2.1 Karakterisering belasting

Bij continu overstromend water wordt de belasting vaak beschreven door de diepte gemiddelde snelheid van de stroming, u (m/s). Bij het dynamische verloop van een overslaande golf kan ook van de snelheid in de overslaande golftong worden uitgegaan, maar daarbij wordt dan de maximale snelheid genomen tijdens de periode van golfoverslag. In werkelijkheid bouwt de snelheid zich zeer snel op naar dit maximum en loopt dan meer of

minder lineair af naar nul. Figuur 6.1 geeft een voorbeeld van gemeten snelheidsverlopen (proeven Vechtdijk, februari 2010), bij verschillende overslaande golfvolumes.



Figuur 6.1 Gemeten snelheidsverlopen voor verschillende overslaande golfvolumes (proeven Vechtdijk, februari 2010).

Uit de overslagproeven is komen vast te staan dat er nauwelijks een grenslaag is als de snelheid vrij hoog is, zoals bij overslaande volumes van $1 \text{ m}^3/\text{m}$ en meer. Dat betekent dat de (maximale) snelheid bovenin de overstromende laag (waar is gemeten), gelijk is aan de frontnelheid van het overslaande golffront en gelijk is aan de diepte gemiddelde snelheid. De belasting bij golfoverslag wordt daarmee beschreven door de (maximale) snelheid, u , in een overslaande golf, waarbij de tijd dat deze snelheid aanhoudt mogelijk nog een rol kan spelen.

Meestal zal er sprake zijn van een variërende waterstand. Door hiermee rekening te houden, wordt doorgaans een gunstiger toetsresultaat verkregen, zie paragraaf 7.3.3.

6.2.2 Kritische snelheid

De sterkte wordt door veel parameters bepaald maar is uiteindelijk terug te leiden tot één parameter, namelijk de kritische snelheid, u_c (m/s). Als deze kritische snelheid tijdens een overslaande golf wordt overschreden, dan "gebeurt" er iets met het talud. Maar het is niet één golf die het talud kapot maakt, het is het cumulatieve effect van meerdere golven. Dean et al. (2010) [24] hebben verschillende theorieën op een rij gezet en kort samengevat zijn er drie mogelijkheden om de belasting en sterkte aan elkaar te koppelen:

- Erosie door overschrijden van de snelheid: $E = K \sum (u - u_c) t$ (6.1)

- Erosie door overschrijden van de schuifspanning: $E = K \sum (u^2 - u_c^2) t$ (6.2)

- Erosie door overschrijden van de arbeid: $E = K \sum (u^3 - u_c^3) t$ (6.3)

In deze formules is K een groepsfactor die alle mogelijke parameters kan bevatten. Dean et al. [24] kwamen tot een voorkeur voor formule 6.3, gebaseerd op een vergelijking tussen bestaande relaties van sterkte grasbekleding en continu overstromend water en golfoverslag.

Het werk binnen het SBW-kader heeft zich tot nu toe gericht op formule 6.2, erosie ten gevolge van het overschrijden van de schuifspanning. Deze benadering heet ook wel de

erosion-rate methode en is voor het eerst gepubliceerd door Partheniades [25]. Verder onderzoek zal moeten uitwijzen wat de beste methode is.

De overslagproeven met de golfoverslagsimulator hebben duidelijk de ervaring gegeven dat kleine overslaande golfvolumes niet in staat zijn de grasbekleding te beschadigen. Het is het herhaaldelijk simuleren van golven, die een bepaald volume of snelheid overschrijden, die uiteindelijk voor de schade en uitbreiding hiervan zorgen. Daarmee is het toepassen van een kritische snelheid een juiste methode en ook het "optellen" van de belastingen per overslaande golf.

De kritische snelheid u_c is afhankelijk van de kwaliteit van de graszode en, in mindere mate, de grond. Een categorisering van de kwaliteit van de graszode wordt gegeven in paragraaf 6.4.2. Een goede relatie tussen de kritische snelheid en de graszode- en grondkwaliteit is nog niet bekend. Voor een gesloten zode (paragraaf 6.4.2) kan echter wel worden uitgegaan van een minimale waarde van u_c (paragraaf 6.2.6).

6.2.3 Cumulatieve overbelasting

De golfoverslagproeven hebben ook laten zien dat het golffront in deze grote overslaande golven met een grote snelheid over het binnentalud naar beneden stroomt. Binnen tienden van een seconde wordt de maximum snelheid bereikt. Het grastalud voelt dit als een soort impact, min of meer vergelijkbaar met de golfklap van een brekende golf, en het is deze impact die vaak schade veroorzaakt of uitbreidt. Uit deze waarnemingen is de conclusie getrokken dat de tijdsduur dat een grote snelheid op het talud aanwezig is (een tot enkele seconden, zie Figuur 6.1) in feite niet het belangrijkste is, maar veel meer de maximale snelheid zelf en het aantal overslaande golven dat de kritische snelheid overschrijdt. Deze conclusie betekent dat bij golfoverslag de tijd t in formules 6.1 - 6.3 niet direct belangrijk is. Dit heeft geleid tot de definitie van de cumulatieve overbelasting:

$$\Sigma(u^2 - u_c^2) \quad [m^2/s^2] \quad (6.4)$$

Van elke overslaande golf is het volume tijdens de proeven bekend en daarmee de snelheid u (zie paragraaf 4.2.4). Bij een vastgestelde kritische snelheid van u_c kan dus voor elke overslaande golf die deze snelheid overschrijdt de overbelasting worden bepaald en door deze belastingen van alle overslaande golven op te tellen ontstaat de cumulatieve overbelasting.

In feite is formule 6.4 niet alleen een belasting, maar zit de sterkte in de kritische snelheid u_c . Daarnaast is het tijdsaspect nog steeds aanwezig, want sommatie van overslaande golven, die de kritische snelheid overschrijden, kan gekoppeld worden aan de proefduur of stormduur. De belasting bouwt zich vrijwel lineair in de tijd op. Dus als de cumulatieve overbelasting in 1 uur bijvoorbeeld is vastgesteld op $50 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dan is deze in 15 minuten $12,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Ook kunnen cumulatieve belastingen bij verschillende gemiddelde overslagdebieten bij elkaar worden opgeteld. De cumulatieve overbelasting na 10 l/s per m gedurende 3 uur kan worden opgeteld bij een daaropvolgende cumulatieve belasting van 2 uur en 25 l/s per m . Dit zou een schematisering kunnen zijn van de golfoverslag in het getijdegebied: eerst 1,5 uur met 10 l/s per m , een piek van 2 uur met 25 l/s per m en dan opnieuw 1,5 uur na de piek met 10 l/s per m .

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 0.5$ m		
		$u_c = 4$ m/s	$u_c = 5$ m/s	$u_c = 6.3$ m/s
uur	l/s per m	$V_c = 0.5$ m ³ /m	$V_c = 1$ m ³ /m	$V_c = 2$ m ³ /m
1	0.1	0	0	0
1	1	0	0	0
1	5	0	0	0
1	10	0	0	0
1	30	54	0	0
1	50	262	24	0
1	75	752	132	3

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 1$ m		
		$u_c = 4$ m/s	$u_c = 5$ m/s	$u_c = 6.3$ m/s
uur	l/s per m	$V_c = 0.5$ m ³ /m	$V_c = 1$ m ³ /m	$V_c = 2$ m ³ /m
1	0.1	0	0	0
1	1	0	0	0
1	5	4	0	0
1	10	22	1	0
1	30	258	41	1
1	50	702	170	14
1	75	1439	459	66

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 2$ m		
		$u_c = 4$ m/s	$u_c = 5$ m/s	$u_c = 6.3$ m/s
uur	l/s per m	$V_c = 0.5$ m ³ /m	$V_c = 1$ m ³ /m	$V_c = 2$ m ³ /m
1	0.1	1	0	0
1	1	8	1	0
1	5	58	11	0
1	10	149	37	3
1	30	685	255	47
1	50	1363	605	156
1	75	2294	1153	366

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 3$ m		
		$u_c = 4$ m/s	$u_c = 5$ m/s	$u_c = 6.3$ m/s
uur	l/s per m	$V_c = 0.5$ m ³ /m	$V_c = 1$ m ³ /m	$V_c = 2$ m ³ /m
1	0.1	3	1	0
1	1	17	5	1
1	5	119	45	8
1	10	263	111	25
1	30	942	487	162
1	50	1699	969	381
1	75	2689	1656	744

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 4$ m		
		$u_c = 4$ m/s	$u_c = 5$ m/s	$u_c = 6.3$ m/s
uur	l/s per m	$V_c = 0.5$ m ³ /m	$V_c = 1$ m ³ /m	$V_c = 2$ m ³ /m
1	0.1	0	0	0
1	1	33	11	0
1	5	158	78	19
1	10	330	175	55
1	30	1057	642	274
1	50	1847	1200	581
1	75	2834	1945	1037

Tabel 6.1 Cumulatieve overbelastingen bij verschillende hydraulische regimes, gemiddelde overslagdebieten en verschillende kritische overslagvolumes of snelheden; De waarden gelden voor een enkele proef (dus niet cumulatief) en voor een duur van 1 uur en zijn gebaseerd op formule 6.2.

6.2.4 Uitwerking voor verschillende golfhoogten

Tabel 6.1 geeft een overzicht van verschillende cumulatieve overbelastingen en wel voor vijf verschillende golfcondities (deels gegeven in tabellen 4.1 en 4.2) van 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m en 4 m golfhoogte. Voor een aantal verschillende overslagdebieten, beginnend bij 0,1 l/s per m en eindigend bij 75 l/s per m, is de cumulatieve overbelasting gegeven en wel voor drie kritische snelheden van 4 m/s; 5 m/s en 6,3 m/s, overeenkomende met overslaande golfvolumes van respectievelijk 0,5; 1 en 2 m³/m. De waarde 4 m/s of 0,5 m³/m kan als een ondergrens worden gezien van dijken met een goede, op het oog gesloten, grasbekleding (geen ruigtebegroeiing, intensieve beweiding, fragmentarische zode, etc.), welke is vastgesteld voor de zanddijk bij Zwolle (Vechtdijk).

Bij een gegeven verloop van golf- en golfoverslagcondities kan de cumulatieve golfoverbelasting precies worden berekend, maar met behulp van Tabel 6.1 is het vrij eenvoudig een goede schatting te maken. Een aanname hierbij is dat lineair geïnterpoleerd mag worden. Als voorbeeld kan bovengenoemde conditie worden genomen: 3 uur met 10 l/s per m overslag plus 2 uur met 25 l/s per m.

Als de golfhoogte 1 m is en de kritische snelheid is 4 m/s, dan volgt uit de tweede tabel van Tabel 6.1 dat de cumulatieve overbelasting $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3 \times 22 + 2 \times 199 = 464 \text{ m}^2/\text{s}^2$. De 199 m²/s² is gevonden door te interpoleren tussen 22 en 258 m²/s², geldend voor 10 en 30 l/s per m overslag. Als we bij deze golfconditie de kritische snelheid stellen op 5 m/s en 6,3 m/s, dan ontstaan cumulatieve overbelastingen van respectievelijk $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 65$ en $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$. De cumulatieve overbelasting neemt snel af als de kritische snelheid toeneemt.

Nemen we een kritische snelheid van 5 m/s als uitgangspunt, dan vinden we voor de gegeven overslagcondities bij respectievelijk een golfhoogte van 1 m, 2 m en 3 m cumulatieve overbelastingen van 65, 513 en 1119 m²/s². De belasting neemt behoorlijk toe als de golven hoger zijn (en bij gelijkblijvende gemiddelde overslagdebieten). We kunnen ook interpoleren naar een andere golfhoogte. Voor bijvoorbeeld $u_c = 5 \text{ m/s}$ en een golfhoogte van 2,5 m vinden we door lineaire interpolatie van bovenstaande 513 en 1119 m²/s² een cumulatieve overbelasting van 816 m²/s².

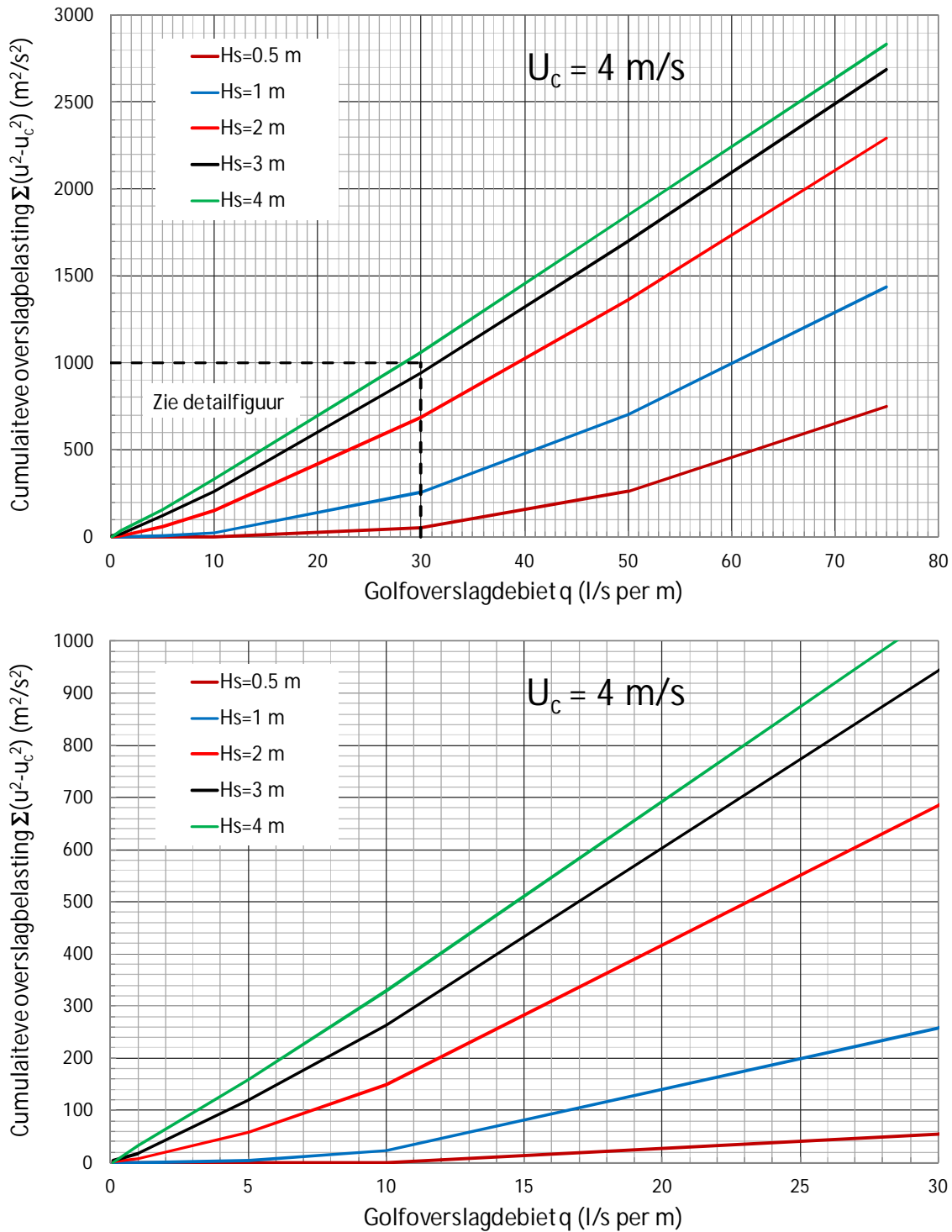
Overigens valt uit Tabel 6.1 direct al op te maken dat de cumulatieve overbelasting behoorlijk toeneemt bij eenzelfde gemiddeld overslagdebiet en kritische snelheid, maar ook bij toenemende golfhoogte. Voor bijvoorbeeld 10 l/s per m gedurende 1 uur en een kritische snelheid van 5 m/s worden voor $H_s = 0,5 \text{ m}, 1 \text{ m}, 2 \text{ m}, 3 \text{ m}$ en 4 m respectievelijk cumulatieve overbelastingen gevonden van 0, 1, 37, 111 en 175 m²/s².

Met de cumulatieve overbelasting $\Sigma(u^2 - u_c^2)$ kunnen verschillende golf- en overslagcondities met elkaar worden vergeleken. De grote vraag is nog wel hoe de kritische snelheid moet worden vastgesteld voor een specifiek talud.

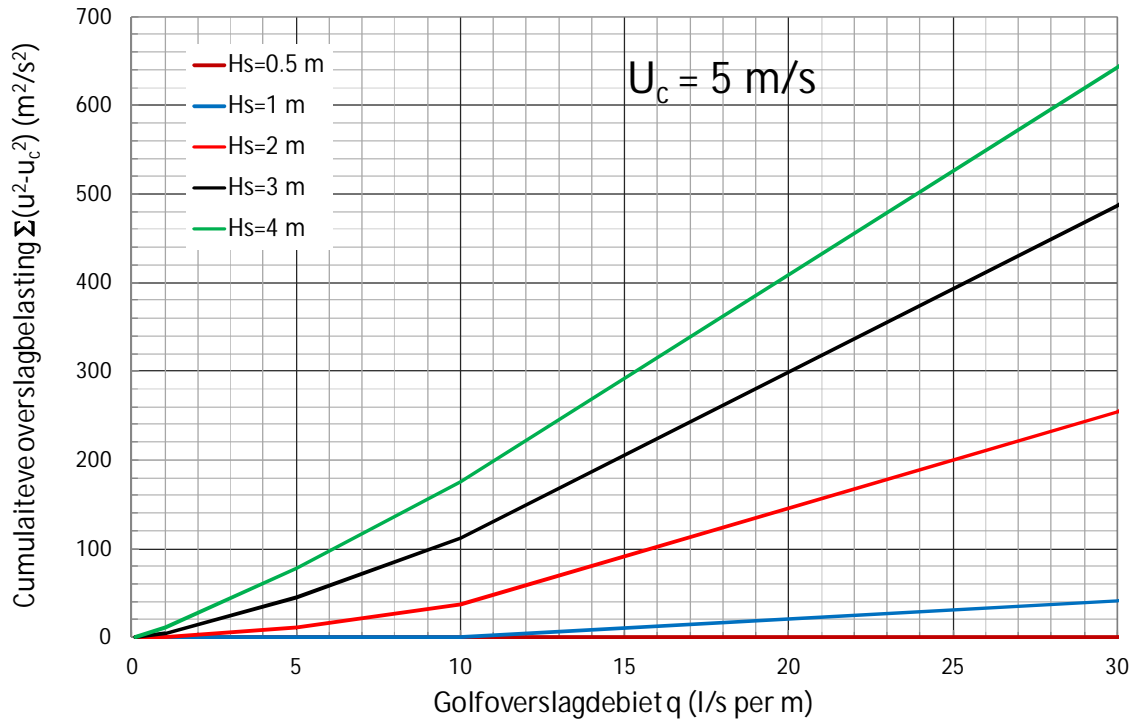
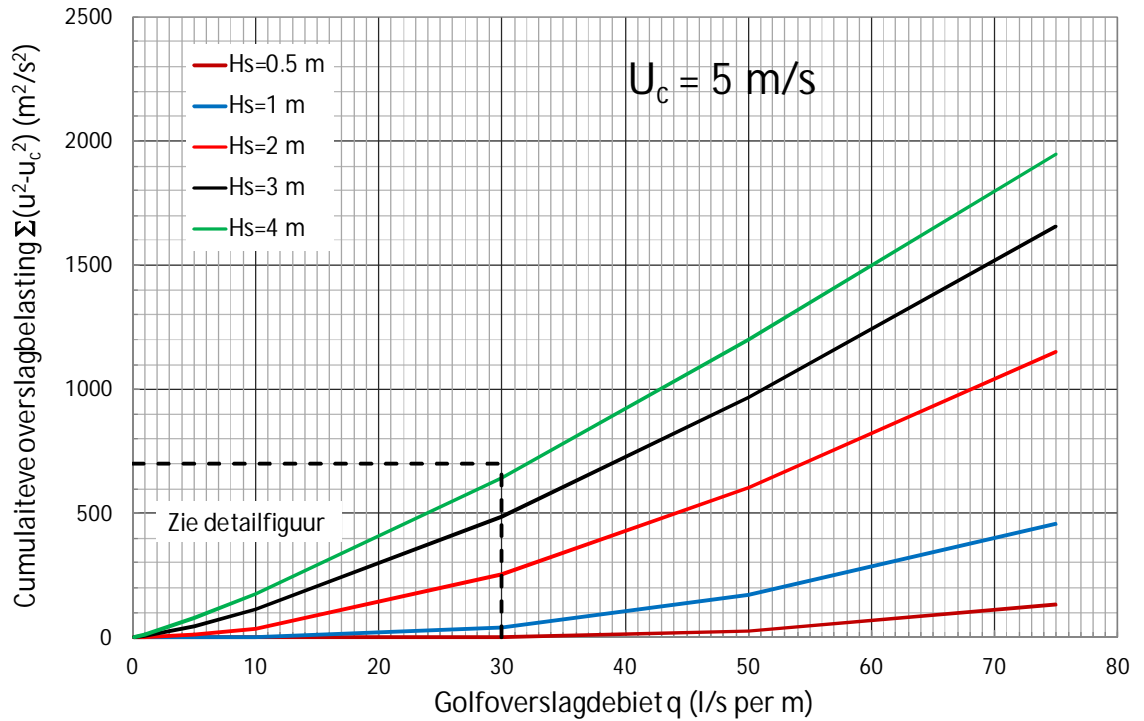
6.2.5 Cumulative overslagbelasting in praktische grafieken

Een alternatief voor bovenstaande uitwerking met tabellen zijn grafieken. Figuur 6.2 tot Figuur 6.4 geven een overzicht, waarbij de tweede figuur steeds een detailfiguur is van de bovenste figuur. Op de horizontale as is het overslagdebiet uitgezet en verticaal de cumulatieve overbelasting. Er zijn lijnen gegeven voor de vijf golfhoogten van 0,5, 1, 2, 3 en 4 m. Figuren 6.2-6.4 geven de relaties voor respectievelijk 4, 5 en 6,3 m/s. De grafieken gelden voor een

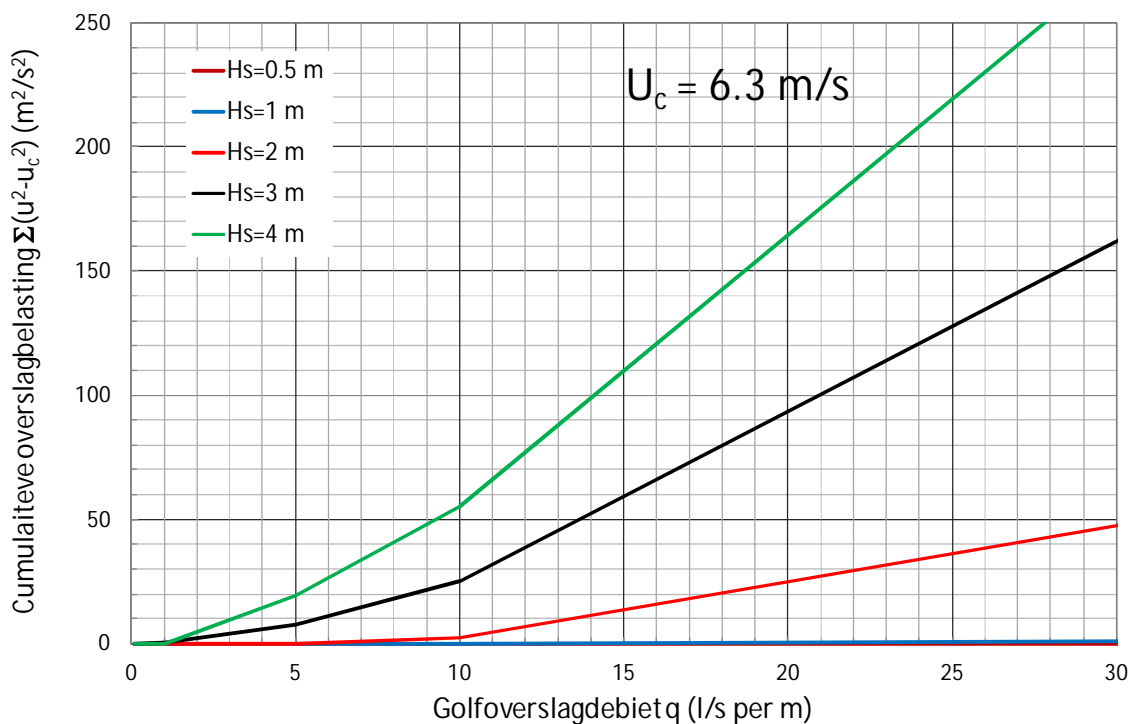
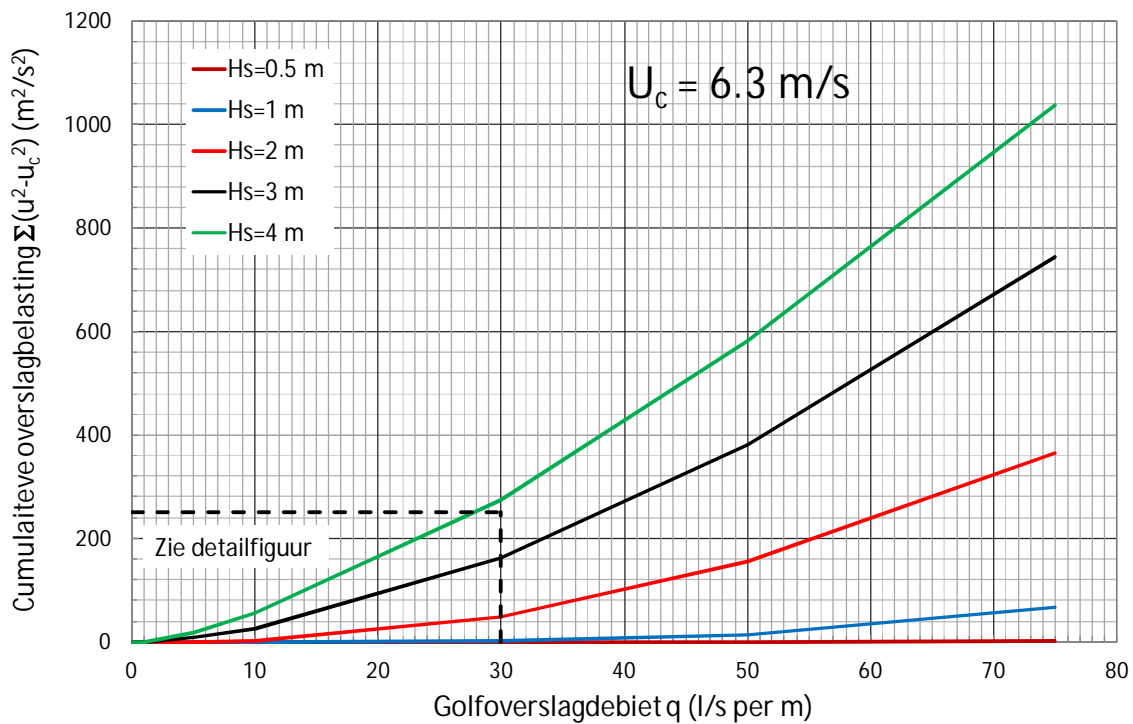
storm- of proefduur van één uur. Voor een belastingduur kleiner of groter dan één uur dient de waarde uit de grafiek te worden gecorrigeerd. Voor een belastingduur van bijvoorbeeld twee uur wordt de waarde uit de grafiek vermenigvuldigd met twee en voor een belastingduur van bijvoorbeeld 20 minuten wordt de waarde uit de grafiek gedeeld door drie.



Figuur 6.2 Cumulatieve overbelasting $\Sigma(u^2 - u_c^2)$ als functie van gemiddeld overslagdebiet en golfhoogte voor een kritische snelheid van $4 m/s$ en voor een belastingduur van 1 uur. De onderste grafiek is een detail van de bovenste.



Figuur 6.3 Cumulatieve overbelasting $\Sigma(u^2 - u_c^2)$ als functie van gemiddeld overslagdebiet en golfhoogte voor een kritische snelheid van 5 m/s en voor een belastingduur van 1 uur. De onderste grafiek is een detail van de bovenste.



Figuur 6.4 Cumulatieve overbelasting $\Sigma(u^2 - u_c^2)$ als functie van gemiddeld overslagdebiet en golfhogte voor een kritische snelheid van 6.3 m/s en voor een belastingduur van 1 uur. De onderste grafiek is een detail van de bovenste.

De eerste berekening is voor 3 uur 10 l/s per m plus 2 uur 25 l/s per m. Voor een golfhogte van 1 m en een kritische snelheid van 4 m/s kunnen we de onderste grafiek in Figuur 6.3 gebruiken. Aflezen geeft voor 10 l/s per m een waarde van 20 m²/s² en voor 25 l/s per m een

waarde van $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$. De totale cumulatieve overbelasting wordt daarmee $3 \times 20 + 2 \times 200 = 460 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Directe interpretatie via Tabel 6.1 leverde $464 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Door dezelfde procedure op de lijnen voor een kritische snelheid van 5 m/s (Figuur 6.3) en $6,3 \text{ m/s}$ (Figuur 6.4), vinden we cumulatieve belastingen van $60 \text{ m}^2/\text{s}^2$, respectievelijk $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Directe interpretatie uit de tabel gaf $65 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Stel een getijkromme met de volgende golfhoogte- en overslaggegevens:

- Voor en na de piek van de waterstand: $H_s = 2,2 \text{ m}$ gedurende 4 uur met 13 l/s per m golfoverslag;
- Tijdens de piek: $H_s = 2,6 \text{ m}$ gedurende 2 uur met 27 l/s per m golfoverslag.
- De sterkte van het gras wordt gekenmerkt door een kritische snelheid van $u_c = 5 \text{ m/s}$.

Voor deze kritische snelheid geldt Figuur 6.3. Verticale interpolatie voor 13 l/s per m tussen de lijnen voor 2 en 3 m golfhoogte levert een cumulatieve overbelasting van $90 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en voor 27 l/s per m $340 \text{ m}^2/\text{s}^2$. De totale cumulatieve overbelasting wordt dan $4 \times 90 + 2 \times 340 = 1040 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

6.2.6 Criterium voor cumulatieve overslagbelasting

Bij studies naar overstromingskansen en/of risico's is het belangrijk dat kan worden vastgesteld wanneer de dijk zal doorbreken. Het is dus belangrijk dat hiervoor het bezwijken van de toplaag van een grasbekleding bij golfoverslag kan worden berekend. Daarna kan de reststerkte van de onderlaag en kern mogelijk nog iets toevoegen. Dus ook hier is begin van schade aan het grastalud niet belangrijk. Als een goede schatting of berekening van de kritische snelheid kan worden gemaakt, dan geeft een cumulatieve belasting van $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ een goed idee van het bezwijken van de toplaag, vooropgesteld dat een op het oog gesloten grasmatt aanwezig is.

Bij de toetsing van dijken is het echter niet gewenst om op het bezwijkniveau te gaan zitten. Er moet voldoende veiligheid zitten tussen de toetsomstandigheid en het bezwijken van het talud bij overslag. Het mag echter duidelijk zijn dat een overslagdebiet van 1 l/s per m niet of nauwelijks een belasting betekent voor het mechanisme erosie bij golfoverslag, zie ook Tabel 6.1, en dat binnentaluds van dijken veel meer golfoverslag aankunnen, als er een goede gesloten grasmatt aanwezig is. Daardoor zit er kennelijk een grote veiligheid tussen de huidige toetscriteria en het bezwijken van kruin en/of binnentalud. Het is ook om deze reden dat de nieuwe toetsregel in veel gevallen van 5 l/s per m uit gaat (zie paragraaf 7.5).

Het verloop van de waterstand bij (extreme) storm geeft een piek van orde 4 uur. Tijdens deze periode zou 5 l/s per m overslag mogen bestaan. Maar ook bij opkomend en neergaand water rondom de piek zal er overslag zijn, maar kleiner. Voor de eenvoud wordt daarom gekozen voor 6 uur met 5 l/s per m.

Uit de analyse van alle overslagproeven komen de volgende schadedefinities naar voren:

Begin van schade	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (grote spreiding)
Meerdere kale plekken	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Bezwijken toplaag	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Conservatief is als we uitgaan van een zanddijk, zoals de Vechtdijk, met een kritische snelheid van 4 m/s. Voor kleine golfhoogten (kleiner dan 1 m), bestaan deze dijken in Nederland (zoals de onderzochte Vechtdijk). Voor grotere golfhoogten, zoals bij zee- en meerdijken, is dit waarschijnlijk een erg conservatieve aanname. Met behulp van Tabel 6.1, of met Figuur 6.2 tot en met Figuur 6.4, is de cumulatieve overbelasting bij 5 l/s per m te berekenen.

Zanddijk, $u_c = 4$ m/s, duur 6 uur, 5 l/s per m overslag

$$H_s = 1 \text{ m} \quad \Sigma(u^2 - u_c^2) = 24 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$H_s = 2 \text{ m} \quad \Sigma(u^2 - u_c^2) = 348 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$H_s = 3 \text{ m} \quad \Sigma(u^2 - u_c^2) = 714 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Alleen bij een zanddijk en 3 m golfaanval is begin van schade te verwachten, bij lagere golfhoogten zal er waarschijnlijk niets gebeuren. Gaan we uit van een grasmat op een kleidijk in plaats van een zanddijk, zoals op de proeflocatie bij St Philipsland, dan geldt een kritische snelheid van 5 m/s. De cumulatieve overbelasting bij 5 l/s per m wordt dan lager.

Slechte toplaag, $u_c = 5$ m/s, duur 6 uur, 5 l/s per m overslag

$$H_s = 1 \text{ m} \quad \Sigma(u^2 - u_c^2) = 0 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$H_s = 2 \text{ m} \quad \Sigma(u^2 - u_c^2) = 66 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$H_s = 3 \text{ m} \quad \Sigma(u^2 - u_c^2) = 270 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

In bovenstaand geval is helemaal geen schade te verwachten. Gezien bovenstaande uitkomsten van de cumulatieve overbelasting, die in praktische zin allemaal kleiner zijn dan $500 \text{ m}^2/\text{s}^2$, zou gesteld kunnen worden dat voor toetsomstandigheden een cumulatieve overbelasting van $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 250 - 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ aangehouden zou kunnen worden. Bij de hoogste waarde zou in sommige gevallen dan mogelijk op een enkele plek een beetje schade zijn (de waarde $500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ voor begin van schade heeft een grote spreiding).

Maar wat is nu de reserve veiligheid? De toplaag bezwijkt bij $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Met behulp van Tabel 6.1 is door middel van interpolatie ook uit te rekenen welk gemiddeld overslagdebiet nodig is gedurende 6 uur om tot deze bezwijkbelasting te komen. Dit kan ook door middel van Figuur 6.2 tot en met Figuur 6.4, waarbij het bezwijkcriterium is gegeven door de waarde van $3500/6 \text{ uur} = 583 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Duur overslag 6 uur	$u_c = 4$ m/s (zanddijk)	$u_c = 5$ m/s (minimum gras op klei)
$H_s = 1$ m	$q = 45$ l/s per m	$q > 75$ l/s per m
$H_s = 2$ m	$q = 26$ l/s per m	$q = 48$ l/s per m
$H_s = 3$ m	$q = 19$ l/s per m	$q = 35$ l/s per m

De zanddijk bij 3 m golfhoogte is natuurlijk het zwakste en zou bezwijken bij 19 l/s per m, wat bijna viermaal zoveel is als de overslag bij toetsomstandigheden. Maar zoals eerder gezegd, deze combinatie van zanddijk en grote golfhoogte komt in Nederland niet voor. Als van gras op een kleilaag toplaag wordt uitgegaan met $u_c = 5$ m/s, dan is de overslag bij bezwijken in dit geval 35 l/s per m en dat is veel hoger dan de overslag van 5 l/s per m bij toetsomstandigheden. De verschillen worden nog groter als er lagere golven kunnen worden aangehouden en/of van een sterkere toplaag mag worden uitgegaan met $u_c = 6,3$ m/s.

Al met al geeft een gemiddeld overslagdebiet van 5 l/s per m nog steeds een grote veiligheid ten opzichte van bezwijken van de toplaag van een grasbekleding. Bij een gedetailleerde toetsing zou van een ondergrens van 4 m/s voor de kritische snelheid kunnen worden

uitgegaan (gegeven een op het oog gesloten grasmat). Indien een geavanceerde toetsing nodig is, dan zou aan het vaststellen van de werkelijke kritische snelheid gedacht kunnen worden, maar mogelijk ook aan een proef met de golfoverslagsimulator.

Voor de validatie van de cumulatieve overslagbelasting aan de hand van de uitgevoerde golfoverslagproeven wordt verwezen naar Bijlage D.

6.3 Afschuiven grasbekleding binnentalud bij golfoverslag

6.3.1 Afbakening belasting en geometrie

Een gemiddeld golfoverslagdebiet tot en met 0,1 l/s per m zal de bekleding niet zodanig kunnen verzwakken dat deze afschuift. Een talud van 1:4 en flauwer zal eveneens niet kunnen afschuiven, mits de dijk niet bestaat uit veen. In deze gevallen hoeft verder geen aandacht te worden besteed aan het mechanisme afschuiven van de bekleding.

Indien een kleidijk is opgebouwd uit 'stevige klei' (zie paragraaf 3.3.2) met een binnentalud van 1:3 (of flauwer), dan zal ook bij volledige verzadiging van de bekleding geen afschuiven optreden. Stevige klei heeft voldoende schuifsterkte om afschuiven van de bekleding gedurende de beperkte duur van golfoverslag te voorkomen.

De schuifsterkte stevige klei met bodemstructuur, in de doorgaans onverzadigde zone, is enkele tientallen kilopascal of meer [26]. Dit is ruim meer dan de aandrijvende belasting (spanning) bij een 1:3 talud, welke tot circa 10 kPa kan bedragen. Deze aandrijvende belasting (spanning) in de richting langs het taludoppervlak op een diepte d (m) onder het taludoppervlak, is namelijk gelijk aan het volumieke gewicht van de natte grond γ_n (kN/m³) keer de sinus van de taludhelling α keer de diepte d . Uitgaande van een diepte van 1,5 m onder het taludoppervlak, de laag met bodemstructuur, een taludhelling van 1:3 en een gewicht van 18 kN/m³ geeft 8,5 kPa.

Voor dijken die zijn opgebouwd uit zand, 'schrone klei' of 'erosiegevoelige grond' (zie paragraaf 3.3.2) moet bij een golfoverslagdebiet groter dan 0,1 l/s per m en/of een taludhelling steiler dan 1:4 worden gekeken of de stabiliteit van de bekleding voldoende is gewaarborgd. In de praktijk zal bij een taludhelling van 1:3 niet snel afschuiven optreden. Alleen bij ongunstige gevallen, waarbij of de schuifsterkte zeer gering is, of het freatisch vlak in de dijk heel hoog kan oplopen, kan er wel afschuiven optreden.

6.3.2 Waterspanningsopbouw als gevolg van golfoverslag

Bij een langdurige golfoverslagdebiet groter dan 0,1 l/s per m, kan worden verondersteld dat de dijk volledig wordt verzadigd. Indien het talud stabiel is bij volledige verzadiging, dan hoeft er verder geen aandacht te worden besteed aan de waterspanningsopbouw als gevolg van infiltratie. Als dit niet het geval is, dan kan via onderstaande methode worden gekeken of, en hoeveel, de waterspanning minder is dan in het geval van volledige verzadiging.

De potentiële waterspanningsopbouw in en onder de bekledingslaag is afhankelijk van het type dijk (kleikern of zandkern met bekledingslaag), de infiltratiecapaciteit van de bekleding en van de tijd dat er een waterlaagje op het talud aanwezig is. Ook neerslag en de indringing van een hoge buitenwaterstand kan, indien deze tot onder het binnentalud reikt, zorgen voor extra waterspanningen die een bedreiging vormen voor de stabiliteit van de bekleding. Hoe de waterspanningsopbouw als gevolg van neerslag en een hoge buitenwaterstand kunnen

worden berekend staat in het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken en dienen te worden opgeteld bij de waterspanningsopbouw als gevolg van golfoverslag.

De potentiële waterspanningsopbouw als gevolg van golfoverslag kan als volgt worden bepaald:

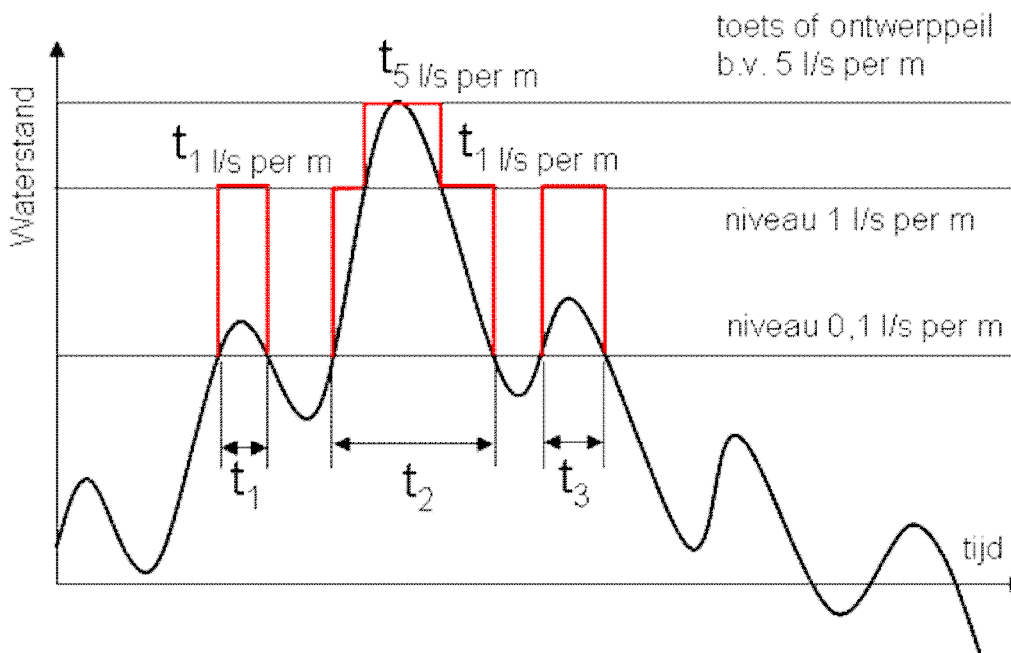
- 1 Bepaling infiltratietijd gedurende een storm.
- 2 Bepaling van de infiltratiecapaciteit van de bekleding en het infiltratievolume.
- 3 Bepaling van de potentiële drukopbouw.

De potentiële waterspanningsopbouw moet worden gebruikt bij de beoordeling van de stabiliteit van de bekleding.

Stap 1 – bepaling infiltratietijd

De infiltratietijd is de tijd dat het talud nat is en er infiltratie optreedt. Uit golfoverslagproeven op verschillende Nederlandse dijken blijkt dat elk overslagvolume het talud tot circa 30 s kan voorzien van een waterlaagje (zie paragraaf 4.2.6).

Voor de bepaling van de infiltratietijd zijn het waterstandsverloop en het verloop van golfkarakteristieken met de tijd van belang. Tevens moet gebruik worden gemaakt van de formules in hoofdstuk 4 voor de berekening van het gemiddelde overslagdebiet.



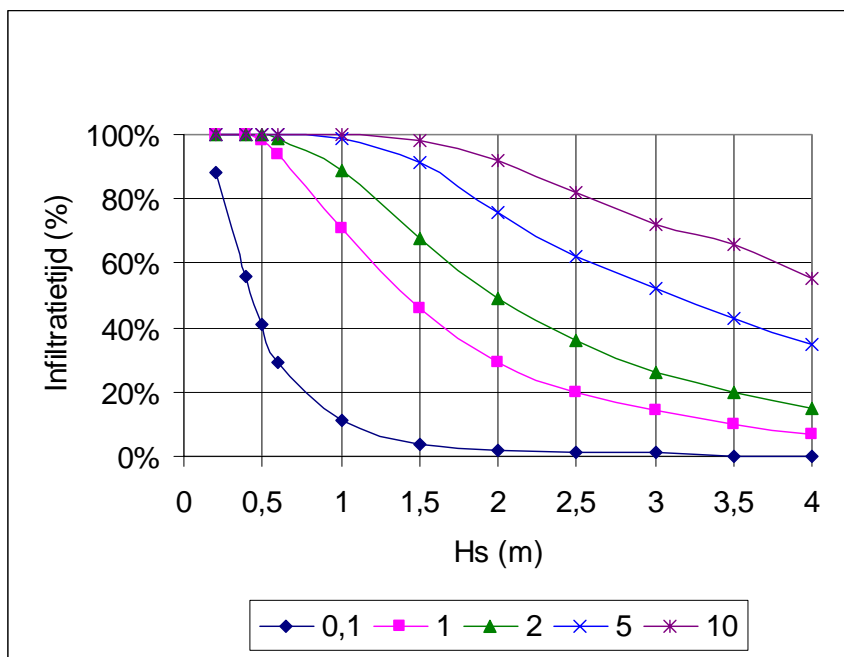
Figuur 6.5 Voorbeeld schematisatie waterstandsverloop voor de bepaling van de infiltratietijd

Vanaf het moment dat de waterstand in combinatie met het golfregime hoger wordt dan de waterstand die hoort bij een gemiddeld overslagdebiet van 0,1 l/s per m, moet rekening worden gehouden met infiltratie door golfoverslag. Onder deze waarde van 0,1 l/s per m kan infiltratie door golfoverslag worden verwaarloosd.

Het eenvoudigst is om uit te gaan van constante golfkarakteristieken gedurende de tijd dat een overslagdebiet groter dan 0,1 l/s per m optreedt. In het voorbeeld van Figuur 6.5 betekent dit dat er wordt uitgegaan van een gemiddeld overslagdebiet van 5 l/s per m

gedurende $t_1+t_2+t_3$. Optimalisatie is mogelijk door de tijdsperiode op te knippen, bijvoorbeeld in een tijd waarbinnen het overslagdebiet 1 l/s per m is (t_1+t_2 gedeeltelijk + t_3) en een tijd waarbinnen deze 5 l/s per m is (t_2 gedeeltelijk). Ook de golfhoogte en periode kunnen scherper worden bepaald, bijvoorbeeld door de waterdieptebeperking van de golfhoogte mee te nemen.

Voor de combinatie(s) van waterstand en bijhorende golfkarakteristieken kan uit de grafieken in Figuur 6.6 worden afgelezen hoeveel procent van de tijd het talud nat is.



Figuur 6.6 Grafieken voor de bepaling van de infiltratietijd (% van stormduur) afhankelijk van de significante golfhoogte H_s (m) voor een gemiddelde overslagdebiet (0,1-1-2-5 en 10 l/s per m)

Vermenigvuldiging van dit percentage met $t_1+t_2+t_3$, of de deeltijden indien deze is opgeknipt, wordt de infiltratietijd verkregen. De grafieken zijn gemaakt voor gemiddelde overslagdebieten van 0,1 tot en met 10 l/s per m. Tussen deze waarden kan worden geïnterpoleerd. De grafieken zijn gebaseerd op berekeningen volgens het Technisch Rapport Golfloop en Overslag [6], voor een glad buitentalud 1:4 en een golfsteilheid van 0,05 (-) gebaseerd op de diepwater golf lengte en de piekperiode. Het rekenen met andere buitentaluds en golfsteilheden, binnen de grenzen van wat normaal voorkomt langs de Nederlandse dijken, levert slechts geringe wijzigingen op. Daarom kan de grafiek algemeen worden gebruikt. Alleen in extreme situaties kan worden gekeken of het zinvol is om hiervan af te wijken.

Stap 2 – Bepaling infiltratiecapaciteit en infiltratievolume

De infiltratiecapaciteit is het volume water per seconde per vierkante meter dijkoppervlak dat kan infiltreren, gegeven de aanwezigheid van een waterlaagje op het oppervlak. De dikte van het waterlaagje heeft bij golfoverslag een zeer beperkte invloed op de infiltratiecapaciteit. Het infiltratievolume is het product van de infiltratietijd (stap 1) en de infiltratiecapaciteit.

De infiltratiecapaciteit van klei met bodemstructuur ligt tussen 1×10^{-5} en 1×10^{-4} m³/s per m², wat gelijk is aan 0,01 – 0,1 l/s per m² dijkoppervlak. Deze waarden zijn in aanloop naar het Technisch Rapport Klei voor Dijken bepaald aan de hand van veldinfiltratieproeven op

tientallen dijken in Nederland. In het kader van de golfoverslagproeven in de periode 2007-2010 zijn op verschillende locaties en op verschillende manieren veldinfiltratieproeven uitgevoerd die het bereik van 1×10^{-5} en 1×10^{-4} m³/s per m² bevestigen. Totaal werden 21 veldinfiltratieproeven uitgevoerd op vier dijken: één zanddijk, één kleidijk en twee zanddijken met een kleibekleding.

Een infiltratiecapaciteit van 1×10^{-4} m³/s per m² kan worden gebruikt als een conservatieve waarde bij het bepalen van de potentiële waterspanningsopbouw als gevolg van golfoverslag. Hiermee kan een eerste analyse worden uitgevoerd. Dijken waarbij de infiltratietijd kort is, kunnen mogelijk zonder verdere bepaling van de infiltratiecapaciteit worden beoordeeld.

De schatting van de infiltratiecapaciteit kan worden aangescherpt door het uitvoeren van veldinfiltratieproeven. Met behulp van deze proeven is al snel een factor 2 te winnen, wat zich direct doorvertaalt naar een factor 2 (lager) in de potentiële drukopbouw. Het gemiddelde van de veldinfiltratieproeven uitgevoerd bij de golfoverslagproeven was bijvoorbeeld $2,4 \times 10^{-5}$ m³/s per m².

Voor het uitvoeren van veldinfiltratieproeven bestaat geen norm. De proeven kunnen worden uitgevoerd door het in de bekleding drukken van een stalen buis en daarin een waterlaag van enkele decimeters te zetten die langzaam in de dijk infiltreert. De snelheid van de daling van de waterspiegel geeft direct de infiltratiecapaciteit. Aandachtspunten bij het uitvoeren van deze proeven zijn als volgt:

- De buis dient vertikaal in het talud te worden gedrukt.

- De diameter van de buis is minimaal 0,4 m.

- Een lasrandje aan de binnenzijde van de buis bij de steekmond zorgt voor het verminderen van de kleef langs de buisrand.

- Bij een zanddijk met een kleibekleding dient de buis tot op het zand te worden gedrukt.

- Bij een kleidijk dient de buis in de orde van 0,4 m of dieper te worden gedrukt.

- De proeven moeten tijdens een vochtige periode worden uitgevoerd, zodat de grond zacht is en de buis zonder al teveel geweld kan worden ingedrukt.

Opgemerkt wordt dat standaard laboratoriumproeven (constant head en falling head proeven) op standaard grondmonsters met een diameter van ongeveer 6 cm volstrekt ongeschikt zijn gebleken voor het schatten van de bulk-doorlatendheid van klei met bodemstructuur. De in het laboratorium verkregen doorlatendheden waren telkens veel te laag, tot een orde 1000 keer lager dan op basis van veldinfiltratieproeven.

Het infiltratievolume is gelijk aan de infiltratietijd (Stap 1) vermenigvuldigd met de infiltratiecapaciteit. Door het volume te delen door de porositeit n (-) van de grond (zie stap 3) wordt het volume grond verkregen dat als gevolg van infiltratie kan worden verzadigd.

Stap 3 – Bepaling potentiële drukopbouw

De potentiële drukopbouw in een dijk als gevolg van infiltratie is, naast het infiltratievolume (Stap 2), afhankelijk van de dijkopbouw. Zo lang er een ongehinderde infiltratie in de dijk plaatsvindt, neemt de druk niet toe tot waarden die voor een normaal talud leiden tot instabiliteit. Pas als het infiltratiefront een minder doorlatende laag bereikt, of het freatische vlak in de dijk, dan kan de waterdruk oplopen, wat vervolgens kan leiden tot instabiliteit van de bekledingslaag.

Voor de bepaling van de potentiële drukopbouw wordt daarom onderscheid gemaakt tussen:

- a. Dijken met een kleikern
- b. Dijken met een zandkern

In het geval van een kleidijk vormt de relatief ondoorlatende kern van de dijk een barrière. Een zanddijk of een zanddijk met een kleibekleding heeft geen barrière in de vorm van een minder doorlatende laag. De zandkern heeft namelijk een doorlatendheid die van gelijke orde is als de kleibekleding. In dit geval zal de druk pas oplopen als het infiltratiefront het freatisch vlak bereikt en deze doet stijgen.

Stap 3a - Kleidijk

Een ongunstige situatie voor de stabiliteit ontstaat wanneer de bekleding van een dijk volledig is verzadigd en een grondwaterstroming ontstaat parallel aan het taludoppervlak. De bijbehorende drukverdeling is het uitgangspunt bij het Edelman-Joustra stabiliteitscriterium.

Door de vorming van bodemstructuur in de jaren na aanleg van een kleidijk, zal de zone tussen het maaiveld en een diepte van circa 1,5 m onder het maaiveld een veel hogere doorlatendheid krijgen dan de kern van de dijk. De opbouw van de bodemstructuur is zodanig dat de doorlatendheid afneemt met toenemende diepte onder het maaiveld.

Het water dat vanaf het maaiveld relatief makkelijk infiltreert tussen de losse aggregaten zal met toenemende diepte meer weerstand ondervinden, omdat de aggregaten met de diepte groter worden en de stapeling van aggregaten dichter wordt. Onder een niveau van 0,8 à 1 m komen nog voornamelijk verticale scheuren voor. De toenemende weerstand zorgt ervoor dat verdere infiltratie wordt bemoeilijkt en er ontstaat een grondwaterstroming in de richting parallel aan het talud.

De opbouw van de bodemstructuur is afhankelijk van een groot aantal factoren: samenstelling van het basismateriaal, (te hoog of te laag) vochtgehalte tijdens aanbrengen klei, vochthuishouding, neerslag en verdamping en de ontwikkeling van bodemleven (planten en dieren). Toch blijkt de opbouw van de bodemstructuur in heel veel gevallen ongeveer hetzelfde te zijn. Uitzonderingen worden gevormd door dijken waarbij de klei veel te nat is aangebracht, waarbij na aanleg grote scheuren ontstaan die later niet meer dicht gaan.

Indien het infiltratievolume volgend uit stap 2 meer is dan 125 l/m^2 , dan wordt aanbevolen om uit te gaan van volledige verzadiging en een stabiliteitcontrole met de formule van Edelman-Joustra (paragraaf 6.3.3) uit te voeren. Het volume van 125 l/m^2 is een conservatieve, lage, schatting van het macroporiënvolume dat moet worden gevuld voordat een grondwaterstroming parallel aan het talud kan ontstaan, over de volle dikte van de laag met bodemstructuur.

Stap 3b – Zandkern

Bij een zanddijk en een zanddijk met kleibekleding is geen barrière aanwezig die de verticale infiltratie hindert. Het infiltrerende water bereikt door de kleibekleding en de zandkern het (initiële) freatisch vlak, dat als gevolg van het infiltrerende water zal stijgen.

De potentiële stijging van het freatisch vlak is gelijk aan het infiltratievolume, zie stap 2, gedeeld door de effectieve porositeit van het zand. Met de effectieve porositeit wordt bedoeld het poriënvolume dat nog dient te worden gevuld om te komen tot verzadiging van het zand. Zand boven het freatisch vlak is vaak al vochtig. Uit laboratoriumonderzoek is gebleken dat

een effectieve porositeit van ongeveer 0,3 (-) kan worden aangehouden, door de aanwezigheid van een watergehalte onder dagelijkse omstandigheden van circa 5-10% (-).

De op deze manier berekende stijging van het freatisch vlak moet worden opgeteld bij een eventueel berekende stijging als gevolg van de indringing van water als gevolg van een hoge buitenwaterstand door het buitentalud. Dit levert uiteindelijk het freatisch vlak in de zandkern die moet worden gebruikt voor de controle van de stabiliteit (Paragraaf 6.3.3).

6.3.3 Stabiliteitmodellen

De modellen waarmee de stabiliteit van de bekledingslaag op het binnentalud tegen afschuiven kunnen worden beoordeeld vallen uiteen in drie categorieën: analytische modellen, glijvlakmodellen (Spencer en Bishop) en de eindige elementen methode (EEM).

Voor de beschrijving van de stabiliteitmodellen wordt verwezen naar [4].

6.4 Erosie grasbekleding buitentalud door golfklappen

6.4.1 Inleiding

Er is een studie uitgevoerd voor het ontwerpen van kleibekledingen op het buitentalud van dijken in het rivierengebied. Dit heeft ook geresulteerd in een aantal wijzigingen voor de beoordeling van een grasbekleding op het buitentalud in de golfklapzone [26].

6.4.2 Karakterisering sterkte

De karakterisering van de sterkte van het gras die in deze paragraaf wordt gegeven wordt ook gebruikt voor de toetsing van erosie van het binnentalud bij golfoverslag.

De belasting wordt gevormd door een significante golfhoogte en de tijd dat deze belasting aanwezig is (zie paragraaf 4.3). De sterkte wordt gevormd door een combinatie van klei en gras, welke bij een bepaalde belasting (golfhoogte) kunnen standhouden. Het beoordelingsmodel vergelijkt de belastingstijd t_k met de standtijd van de bekleding. Het volledige standtijdmodel [26] geeft tevens de erosiediepte afhankelijk van de sterkte en de belasting, echter in dit rapport wordt het beoordelingsmodel beperkt tot de sterkte van de toplaag, waaronder de graszode. De sterkte van de klei onder de toplaag hoort bij reststerkte, die hier niet zal worden beschreven.

De karakterisering van de sterkte van de klei is beschreven in paragraaf 3.3.2. Er wordt onderscheid gemaakt tussen stevige klei (sterk) en schrale klei (zwak) [26]. Er mag in de klapzone geen grond worden gebruikt 'ongeschikt voor bekledingen' welke in dezelfde paragraaf wordt gedefinieerd.

De *kwaliteit van de graszode* wordt onderverdeeld in drie categorieën, waarbij de nadruk ligt op de dichtheid van het *wortelnetwerk*:

- I. *Dichte doorworteling*: gesloten dicht doorwortelde zodelaag. Nergens onderbrekingen van een op visuele beoordeling dicht gewoven wortelnet groter dan 0,2 m (lengte in doorsnede van de zode). Het vergt enige moeite om een los gestoken zodeplag (ca. $0,25 \times 0,3 \text{ m}^2$) uiteen te trekken: zo blijft een plag van een dichte zode grotendeels intact bij losmaken van de ondergrond met een spade;

- II. *Open doorworteling*: open doorwortelde zodelaag waarin er plaatselijk verdichtingen van een visueel overigens wijd gewoven wortelnet zijn. De zode valt uiteen bij loskomen van de ondergrond of valt uiteen bij geringe kracht. Slechts met de nodige voorzichtigheid kan een intacte plag (ca. 0,25 x 0,3 m²) van de graszode gestoken worden met een spade (behalve als de grond in natte toestand veelvuldig is betreden);
- III. *Fragmentarische doorworteling*: Fragmentarisch doorwortelde zodelaag waarin slechts plaatselijk verdichtingen van een visueel wijd gewoven wortelnet zijn en de wortelmat vaak over meer dan 0,2 m afstand nagenoeg of geheel afwezig is. Het is bijna niet mogelijk een intacte plag (ca. 0,25 x 0,3 m²) van het grondoppervlak te nemen (behalve als het oppervlak uit betreden, vochtige kleiige grond bestaat). Onder deze categorie vallen naast slecht beheerde grasbekledingen ook kale grond, ruigtebegroeiing, tuintjes, parken.

De kwaliteit van de grasbekleding op een talud wordt grotendeels bepaald door het beheer ervan. De verschillende beheersvormen en de resultaten ervan voor de grasbekleding worden beschreven in Paragraaf 3.2 en Paragraaf 3.4. Strategieën van maaien, hooien, beweiding en kunstmestgiften zijn dominante parameters in het beheer. Daarnaast kunnen het daarbij ingezette materieel en bepaalde details van beweiding grote effecten hebben op de kwaliteit van de grasbekleding.

Visuele inspectie voor de beoordeling van de zodekwaliteit

De veel voorkomende begroeiingstypen voor de drie categorieën *zodekwaliteit* kunnen worden herkend met visuele inspectie. Zo'n visuele inspectie omvat het schatten van de bedekking van recentelijk gemaaid talud bij het lopen over de grasmat en, vooral als het gras hoger dan ca. 0,1 m staat, regelmatig in meer detail de dichtheid van de begroeiing aan het grondoppervlak na te gaan.

De representatieve plantafstand wordt hier als criterium gehanteerd voor de mate van openheid van de begroeiing. De representatieve plantafstand is het visueel globaal geschatte gemiddelde (voor een stuk van zo'n 0,3 x 0,3 m²) van de afstand tussen planten waar deze uit de grond komen. Grasbekleding met een bepaalde plantafstand kan goed herkend worden bij het lopen over de grasbekleding, maar vergt daarbij regelmatig controleren door plaatselijk het grondoppervlak van het talud zelf te bekijken. De kwaliteit van de wortelmat kan bij twijfel gecontroleerd te worden met het steken van een plag voor representatieve strekkingen met dezelfde aanblik. Deze controle kan nodig zijn omdat de bovengrondse plantendelen niet altijd eenduidig de doorworteling representeren. De controle verschaft daarnaast informatie over eventuele afwijkingen in de opbouw van de zode en aard van de grond in de zode die, waar nodig geacht, genoteerd kunnen worden.

De begroeiing die karakteristiek is voor deze drie graszodecategorieën is als volgt beschreven;

- 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 x 0,15 m² zijn en gemiddeld over 25 m² 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 x 0,15 m² zijn en gemiddeld over 25 m² 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.

Het beheer is ook de dominante factor voor de mate van ruwheid van een dijkta-
lud met grasbekleding. Een gesloten graszode vormt zich niet als het microreliëf (binnen 1/10de m²) meer dan ongeveer 0,1 m is (zie Paragraaf 3.4.3). Een op het oog voldoende glad talud is daarom een voorwaarde voor een voldoende gesloten graszode, naast de effecten ervan op hydraulische condities.

Eenvoudige veldproef voor de beoordeling van de zodekwaliteit

Bij twijfel over de graszodekwaliteit op basis van de visuele beoordeling kan de kwaliteit van de wortelmat en daarmee de graszode op een eenvoudige manier worden gecontroleerd door op een representatieve locatie in een homogeen geachte strekking van het talud een plag uit te steken.

Er wordt met een geschikte spade een stuk zode losgesneden van ongeveer 0,25 x 0,3 m, die als plag van 70 - 100 mm dikte wordt opgetild, de kwalificatie van de doorworteling is als volgt:

- *Dichte doorworteling*: Het vergt enige moeite om een losgestoken zodeplag (ca. 0,25 x 0,3 m²) uiteen te trekken: zo blijft een plag van een dichte zode grotendeels intact bij losmaken van de ondergrond met een spade;
- *Open doorworteling*: Slechts met de nodige voorzichtigheid kan een intacte plag (ca. 0,25 x 0,3 m²) van de graszode gestoken worden met een spade (behalve als het vochtige keiige grond die is verdicht bij betreden of het steken zelf);
- *Fragmentarische doorworteling*: Het is bijna niet mogelijk een intacte plag (ca. 0,25 x 0,3 m²) van het grondoppervlak te nemen (behalve als het vochtige kleiige grond betreft die is verdicht bij betreden of het steken zelf).

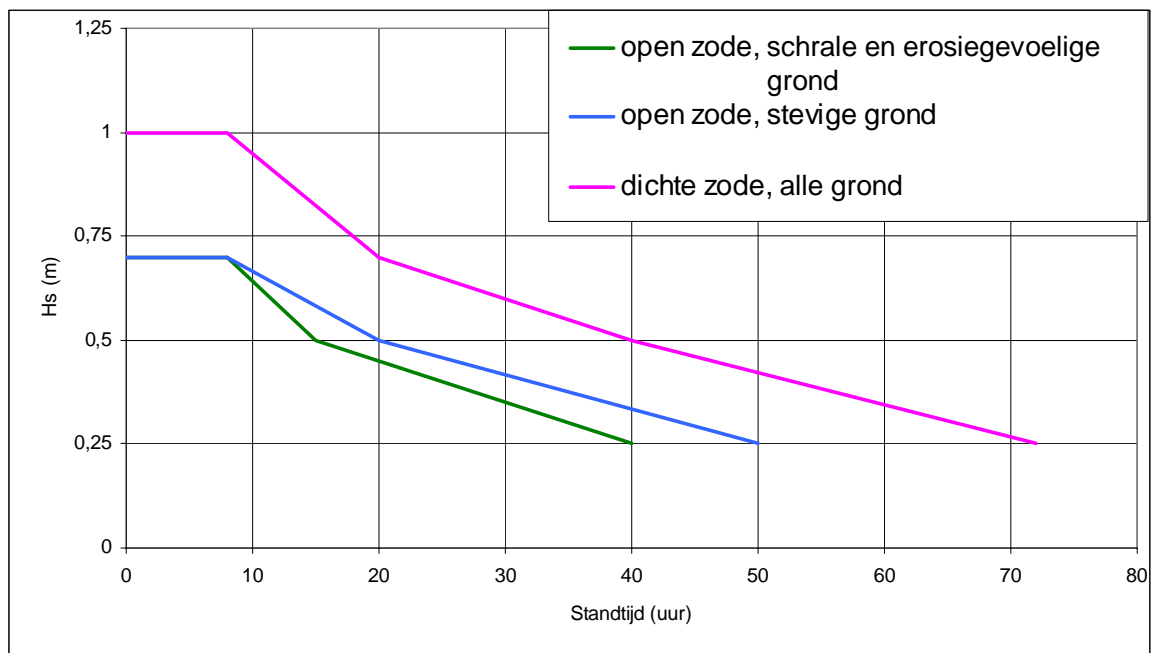
Het spreekt vanzelf dat de zode na beoordeling teruggeplaatst en aangedrukt wordt!

6.4.3 Standtijdmodel

Voor de gedetailleerde achtergrond van het standtijdmodel, inclusief die voor de kleilaag onder de toplaag, wordt verwezen naar [26]. Voor de sterkte van de toplaag, inclusief de graszode, is de veiligheidsmarge tussen proefresultaten en waarnemingen uit het veld en het standtijdmodel, ten opzichte van [26] wat groter gemaakt voor de hogere golfhoogtes (meer dan 0,5 m).

Een golfbelasting van minder dan 0,25 m geeft hooguit zeer beperkte schade. Er zal nooit schade kunnen ontstaan die het functioneren van de dijk in gevaar brengt, behalve als er sprake is van een fragmentarische zode. Onder bepaalde omstandigheden kunnen wel randen op het buitentalud ontstaan met een diepte van hooguit een paar decimeter (zie bijvoorbeeld Figuur 3.5).

Bij een golfhoogte van 0,25 tot 0,5 m zal bij een open of een gesloten zode (geen fragmentarische zode) de toplaag meer dan 20 uur standhouden. Dit is bijna altijd meer dan de belasting op één taludniveau zal zijn. Er kan bij deze lange belastingduur schade ontstaan aan de klei onder de zode met een diepte van 0,3 m.



Figuur 6.7 Standtijd van de toplaag voor verschillende significante golfhoogten, zodekwaliteit en grondsoort

Indien de golfbelasting hoger wordt dan 0,5 m dan kan met Figuur 6.7 worden gekeken wat de maximale standtijd is bij een bepaalde golfhoogte. Opgemerkt wordt dat het verschil tussen schrale en stevige klei niet sterk tot uiting komt in de standtijd indien alleen de toplaag wordt beoordeeld. Pas na een doorbraak van de toplaag gaat de categorie grond een belangrijke rol spelen. Dit valt echter onder reststerkte en wordt hier niet verder uitgewerkt (zie daarvoor par. 2.4.6 van de VTV2006).

Het gebruik van de grafieken wordt begrensd door een golfhoogte van 1 m. Dit is 0,35 m lager dan de maximale golfhoogte waarmee in golfgootexperimenten ervaring is opgedaan. Daarnaast worden de grafieken voor een golfhoogte groter dan 0,5 m begrensd op een taludhelling van 1:2,5.

Als er sprake is van erosiegevoelige grond dan moet de kwaliteit van de zode (open of gesloten) bepaald worden met de spadeproef, want een visuele beoordeling is dan niet voldoende. In sommige gevallen kan zich namelijk een ongeschikte vegetatie ontwikkelen op erosiegevoelige grond. In het ontwerp moet vermeden worden om erosie gevoelige grond toe te passen op dijktafstanden waar golfklappen kunnen optreden.

Het knippunt vanaf het horizontale grafiekgedeelte naar beneden bevindt zich op een standtijd van acht uur.

Meestal zal er sprake zijn van een variërende waterstand. Door hiermee rekening te houden, wordt doorgaans een gunstiger toetsresultaat verkregen, zie paragraaf 7.3.3.

6.5 Erosie grasbekleding buitentalud door golfoploop

Het onderzoek naar grasbekledingen van de afgelopen jaren heeft nog niet geleid tot een nieuwe modellering van erosie van grasbekledingen op het buitentalud in de golfoploopzone, ten opzichte van het model zoals beschreven in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [23].

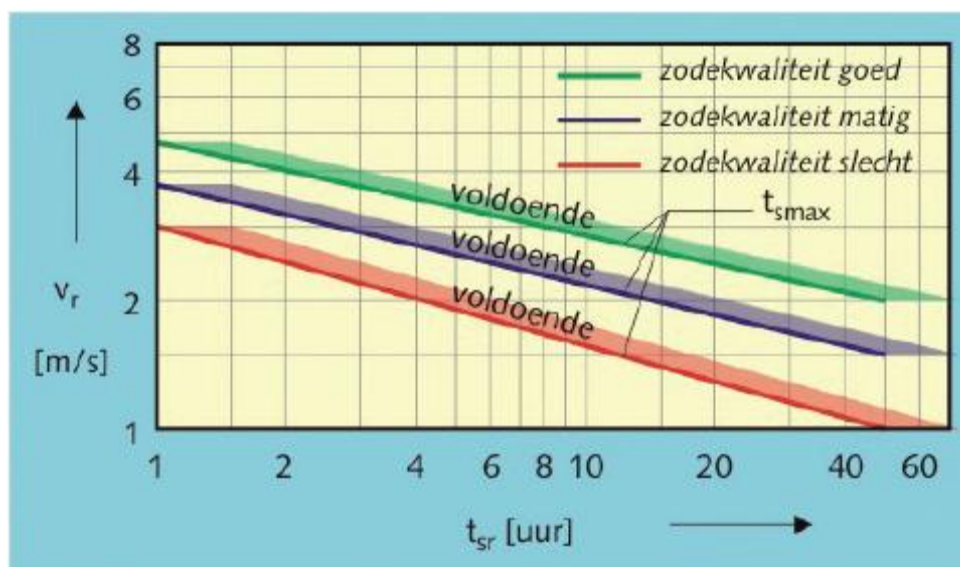
Het is aannemelijk dat de modellering die is ontwikkeld voor het binnentalud bij golfoverslag (Paragraaf 6.2) in een andere vorm ook toepasbaar is op het buitentalud in de golfoploopzone. Inspanningen in de ontwikkeling hiervan hebben echter nog niet geleid tot een gevalideerd resultaat. Er is een eerste pilot golfoploopproef uitgevoerd op het buitentalud van een dijk bij Poortvliet, gemeente Tholen (zie Figuur 5.9). Verwacht wordt dat in de komende jaren een model voor de oploopzone zal worden ontwikkeld. Tot die tijd kan gebruik worden gemaakt van het model zoals beschreven in [23].

Voor toepassing van het model moet worden voldaan aan de toepassingsvoorwaarden. Het toepasbaarheidgebied van het model wordt bepaald door de erosiebestendigheidscategorie van de klei in de zode in combinatie met de graskwaliteit. De bepaling van de erosiebestendigheid van de graszode en van klei wordt behandeld in respectievelijk Bijlage E en F, overgenomen uit [23].

De toepasbaarheidvoorwaarden zijn als volgt:

- bij een zodekwaliteit 'matig' of 'slecht' is het maximaal toelaatbare zandgehalte van de klei in de zode 50%;
- bij een zodekwaliteit 'goed' is het maximaal toelaatbare zandgehalte van de klei in de zode 70%.

Indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan, dan kan het model niet worden toegepast. Het model bestaat uit een vergelijking van de rekenwaarde van de belastingduur t_{sr} (zie paragraaf 4.4) met de maximaal toelaatbare belastingduur t_{smax} . Het model is weergegeven in Figuur 6.8. De formules zijn afkomstig uit [27].



Figuur 6.8 Gedetailleerde rekenmodel voor erosie door golfoploop

De maatgevende belastingduur t_{sr} staat op de horizontale as. Op de verticale as staat de belastingparameter v_r (zie paragraaf 4.4). De lijnen in de figuur geven de toelaatbare

belastingduur weer voor een score 'goed' of 'voldoende', afhankelijk van de zodenkwaliteit (G staat voor zodenkwaliteit 'goed', M voor zodenkwaliteit 'matig' en S voor zodenkwaliteit 'slecht'). De toelaatbare belastingduur voor een score 'voldoende' is 1,5 maal zo groot als voor een score 'goed'. Als de combinatie van belastingparameter en belastingduur leidt tot een punt in de grafiek rechts en boven de toepasbare lijn, is de tussenscore 'onvoldoende'; anders is de eindscore 'goed' of 'voldoende'. Ten hoogste een eindscore 'voldoende' kan worden toegekend als het zandgehalte van de klei in de zode tussen 50% en 70% ligt; een rekenscore 'goed' wordt in dat geval dus omgezet in een eindscore 'voldoende'.

Meestal zal er sprake zijn van een variërende waterstand. Door hiermee rekening te houden, wordt doorgaans een gunstiger toetsresultaat verkregen, zie paragraaf 7.3.3.

Indien het rekenmodel wordt gebruikt voor het ontwerp van een grasbekleding, wordt aanbevolen om minimaal uit te komen op een score 'goed' conform [23].

Aanvullend op [23] kan gebruik worden gemaakt van het gegeven dat een grasbekleding die in de klapzone voldoet, ook in de oploopzone zal voldoen, mits de sterkte niet significant afneemt met de hoogte op het talud.

7 Handreiking beoordeling grasbekleding

7.1 Inleiding

De primaire waterkeringen moeten, overeenkomstig de Waterwet, worden getoetst op veiligheid. De wijze waarop getoetst moet worden staat weergegeven in het vigerende Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (VTV2006) [23].

In de vorige hoofdstukken is de huidige stand van zaken ten aanzien van de kennis en de rekenmodellen m.b.t. grasbekledingen gegeven. In dit hoofdstuk worden de toetsregels² beschreven, die gebaseerd op de nieuwe kennis.

De toetsregels in deze hoofdstukken zijn van toepassing op gezaaid gras (type A) en graszoden en graszaad/zoden in kunststofmatten (type B). Over de erosie- en stabiliteitsverhogende werking van doorgroeibare kunststof matten (Type B) is nog onvoldoende bekend en het beperkte voorkomen van die matten rechtvaardigt geen aparte toetsingsmethodiek. Bij de veiligheidsbeoordeling van een grasmat wordt de aanwezigheid van dit type versterking dan ook niet in rekening gebracht. Type B wordt volgens de regels van type A getoetst.

De toetsregels zijn niet van toepassing op ruigtes, tuintjes, parken en gelijksoortige situaties. Deze begroeiing heeft in het algemeen een zeer lage en in de tijd vaak weinig continue worteldichtheid.

In dit hoofdstuk wordt gemakshalve de benaming 'grasmat' of 'grasbekleding' gebruikt. Er wordt echter een bekledingstype onder verstaan, bestaande uit graslandvegetatie met zijn ondergrond. In deze vegetatie kunnen, naast veel grassen, ook kruidachtige gewassen aanwezig zijn. Door de wijze van onderhoud voorkomt men de vestiging van houtige gewassen en hoog opschietende ruigtekruiden. In hoofdstuk 2 worden de definities aangegeven m.b.t. een grasbekleding zoals in dit hoofdstuk wordt gehanteerd.

Toepassingsgebied

De toetsregels zijn van toepassing op grasbekleding ouder dan vier jaar. In de eerste vier jaar na aanleg bevindt de grasmat zich in de ontwikkelingsfase en is minder of zelfs onvoldoende erosiebestendig. Dit betekent dat bij hoogwater in de eerste vier jaar aanvullende maatregelen nodig zijn. Gedacht kan worden aan afdekken van het talud of extra bewaking. De grasmat is in de ontwikkelingsfase ook kwetsbaarder voor bijvoorbeeld droogte en schade door berijden met zwaar materieel. Wanneer er in de ontwikkelingsfase iets mis gaat kan dat betekenen dat deze fase langer duurt. Het is aan de beheerder om aan te geven of grasmatten met een leeftijd ouder dan vier groeiseizoenen zich ook nog in de ontwikkelingsfase bevinden. Voor grasbekleding in de ontwikkelingsfase zijn geen toetsregels in deze handreikingen opgenomen.

² Deze toetsregels zijn bedoeld als een handreiking t.b.v. het opstellen van een beheerdersoordeel in het kader van de verlengde derde toetsronde. De (inhoudelijke) kwaliteit van deze regels is gewaarborgd door een positief advies van ENW. De regels zijn echter (nog) niet opgenomen in de vigerende voorschriften of technische rapporten.

7.2 Beoordeling grasbekleding in de Beheerdersoordeel

De toetsing van Grasbekledingen bestaat uit een beoordeling op erosie van de grasmat en een toets op afschuiving van het talud. Vier faalmechanismen worden onderscheiden:

- Erosie buitentalud
- Afschuiving buitentalud
- Afschuiving binnentalud
- Erosie binnentalud

Indien in de derde toetsronde niet mogelijk is gebleken om een eindscore te geven voor een of meer van deze faalmechanismen, kan de beheerder overwegen om een Beheerdersoordeel op te stellen (mede) op basis van de toetsregels in deze handreiking.

In paragraaf 7.3 t/m 7.6 wordt de eenvoudige en gedetailleerde toetsregels voor de vier faalmechanismen respectievelijk beschreven. Paragraaf 7.7 bevat enkele handvatten voor het uitvoeren van een geavanceerde beoordeling voor een grasbekleding. In Bijlage G is een samenvatting opgenomen van de benodigde parameters voor het uitvoeren van de toetsing op basis van de toetsregels in deze handreiking.

Afhankelijk van de eigenschappen en condities van de bekleding kan noodzakelijk zijn om de beoordeling van een faalmechanisme op meerdere niveaus (eenvoudige, gedetailleerd of eventueel geavanceerd) uit te voeren om te komen tot een eindoordeel. Het is van belang dat de beheerder aangeeft of de toetsresultaten op basis van de toetsregels in deze handreiking overeenkomen met zijn/haar ervaring en kennis van de waterkeringen.

7.3 Erosie buitentalud

7.3.1 Stap 1: Eenvoudige toetsregels

De eenvoudige beoordeling kan worden uitgevoerd op basis van het toetsschema uit Figuur 7- 1. De toets bestaat uit een toets op bewezen sterkte (stap 1a) en een eenvoudige analyse op basis van algemene kenmerken (stap 1b).

Stap 1a Bewezen sterkte

Onder de volgende voorwaarden kan de grasbekleding zonder verder onderzoek met 'voldoet' worden beoordeeld voor Erosie buitentalud:

- De laatste 10 jaar is geen schade aan de grasmat geconstateerd. Er mogen geen afslagranden of andere vormen van erosie zijn voorgekomen, die dieper zijn gegaan dan 5 cm.
- De laatste 10 jaar is het beheer niet veranderd
- De hydraulische belasting bestaande uit toetspeil, golfhoogte en golfperiode, is niet nadelig veranderd t.o.v. HR2001
- Maatgevende belastingen zijn echt opgetreden gedurende de periode waarin die ervaring is verkregen. Voor rivierdijken kan dit het geval zijn;

De belasting hoeft niet noodzakelijkerwijs te hebben gewerkt op het gehele met grasmat beklede waterkeringgedeelte. Een gunstige ervaring lager op de dijk mag (mits geldend voor een zelfde belastinggrootte) ook geldig worden verklaard voor een hoger gelegen plaats, mits de grasmat daar dezelfde kenmerken vertoont qua vegetatietype en kleisamenstelling.

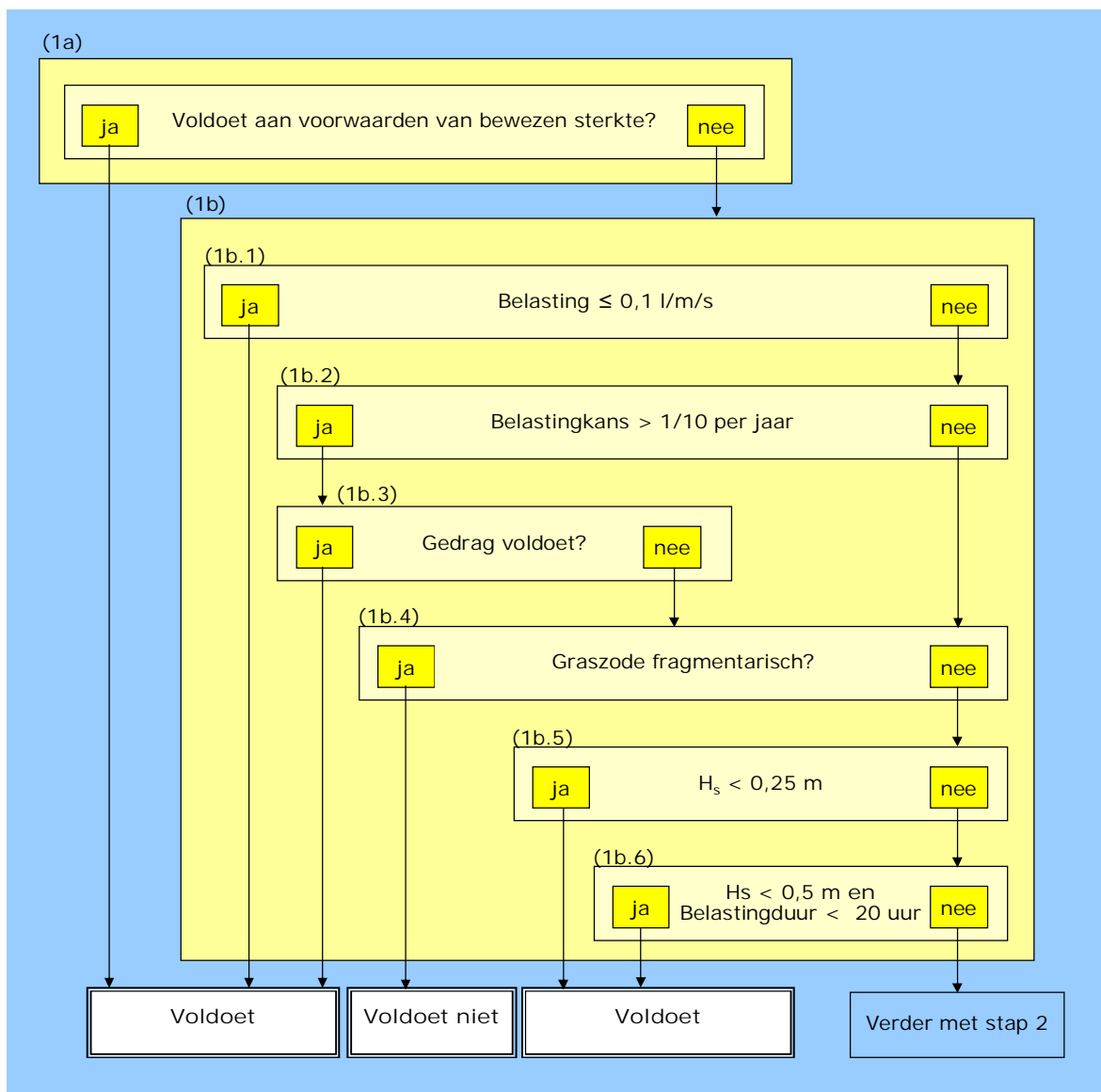
Indien niet aan bovengenoemde voorwaarden wordt voldaan, moet worden nagegaan of op basis van globale kenmerken voldoende sterkte van de grasbekleding kan worden aangetoond. De beoordeling gaat door met stap 1b.

Stap 1b Toets op basis van algemene kenmerken

In stap 1b wordt nagegaan of op basis van globale kenmerken voldoende sterkte van de grasbekleding kan worden aangetoond.

Stap 1b.1 belasting $\leq 0,1$ l/m/s

Het gedeelte van het buitentalud, waar het ophoopdebiet q kleiner is dan of gelijk aan $0,1$ l/m/s, wordt geacht de belasting te doorstaan zonder ontoelaatbare schade. De score is in dat geval 'voldoet'. Indien niet aan deze voorwaarde wordt voldaan, wordt de toetsing voortgezet met stap 1b.2.



Figuur 7-1 Schema eenvoudige toetsregels op Erosie buitentalud

Het ophoopniveau behorend bij $q = 0,1$ l/m/s wordt berekend met behulp van de HYDRA-rekenmodellen [Hoofdstuk 10] Bij complexe geometrie van het talud moeten eerst de randvoorwaarden (Toetspeil + toeslagen en golftrandvoorwaarden) worden bepaald met de HYDRA-rekenmodellen op basis van waarvan het overslagdebiet met het rekenmodel PC-

OVERSLAG berekend kan worden. De HYDRA-rekenmodellen en het rekenmodel PC-OVERSLAG gebruiken beiden de formuleringen uit het Technisch Rapport Golfloop en Golfoverslag bij Dijken [6], maar het rekenmodel PC-OVERSLAG heeft de mogelijkheid om een complexere geometrie (dan de HYDRA-rekenmodellen) toe te passen.

Stap 1b.2

Het gedeelte van het buitentalud met een belastingkans $> 1/10$ per jaar wordt in stap 1b.3 getoetst op gedrag (bewezen sterkte). De toets van het buitentalud met een belastingkans $\leq 1/10$ per jaar gaat verder met stap 1b.4.

Stap 1b.3 Gedrag

De bekleding 'voldoet' als er de laatste 10 jaar geen schade aan de grasmat is geconstateerd, waarbij er uiteraard wel een hydraulische belasting moet zijn opgetreden (bewezen sterkte). Er mogen geen afslagranden of andere vormen van erosie zijn voorgekomen, die dieper zijn gegaan dan 5 cm. Als deze schade wel is opgetreden wordt de toets vervolgd met stap 1b.4.

Stap 1b.4 kwaliteit graszode

Stap 1b.4 bestaat uit een beoordeling van de kwaliteit van de graszode. Hiertoe worden de bovengrondse plantendelen van de grasbekleding beoordeeld, bij twijfel aangevuld met lokale beoordeling van globale karakteristieken van een met een spade gestoken zode plag. Voor de beoordeling van de sterkte van de graszode worden drie kwaliteitscategorieën onderscheiden. Deze zijn beschreven in paragraaf [6.4](#).

Indien de graszode fragmentarisch is, is de score voor Erosie buitentalud "voldoet niet". Bij een open of gesloten graszode gaat de toets verder met stap 1b.5.

Stap 1b.5 $H_s < 0,25$ m

Indien de significante golfhoogte aan de teen van de waterkering kleiner is dan 0,25 m, wordt de score 'voldoet'. Zo neen, dan wordt de toetsing met Stap 1b.6 voortgezet.

Stap 1b.6 $H_s < 0,5$ m en belastingduur < 20 uur

Indien de significante golfhoogte kleiner is dan 0,5 m en de belastingduur is kleiner dan 20 uur, wordt de score 'voldoet'. Zo neen, dan moet de toetsing met de gedetailleerde beoordeling worden voortgezet.

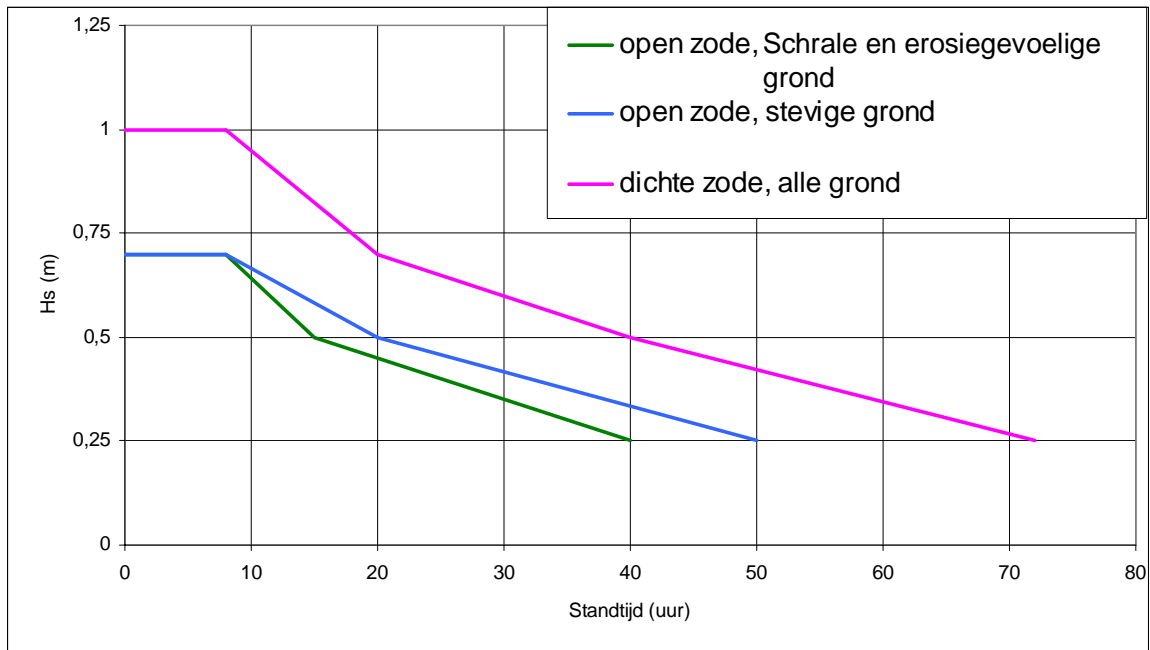
7.3.2 Stap 2: Gedetailleerde toetsregels

Erosie door golfklap

De grasmat gelegen lager dan Toetspeil + toeslagen wordt beoordeeld volgens de gedetailleerde beoordeling voor erosie door golfklap. Deze toets bestaat uit een controle aan de hand van diagrammen met taludhelling, grondtype en zode samenstelling. De diagrammen (Figuur 7-2) geven aan hoe lang een bepaalde graszode een bepaalde golfbelasting kan weerstaan. Als er sprake is van erosiegevoelige grond dan moet de kwaliteit van de zode (open of gesloten) bepaald worden met de spadeproef, want een visuele beoordeling is dan niet voldoende. In sommige gevallen kan zich namelijk een ongeschikte vegetatie ontwikkelen op erosiegevoelige grond.

Indien de golfbelasting hoger wordt dan 0,5 m dan kan met Figuur 7-2 worden gekeken wat de maximale standtijd is bij een bepaalde golfhoogte. Het gebruik van de grafieken wordt

begrensd door een golfhoogte van één meter. Dit is de maximale golfhoogte waarmee in golfgootexperimenten ervaring is opgedaan. Daarnaast worden de grafieken voor een golfhoogte groter dan 0,5 m begrensd op een taludhelling van 1:2,5.



Figuur 7-2 Standtijd van de toplaag voor verschillende significante golfhoogtes (m), zodekwaliteit en grondsoort

Erosie door golfoploop

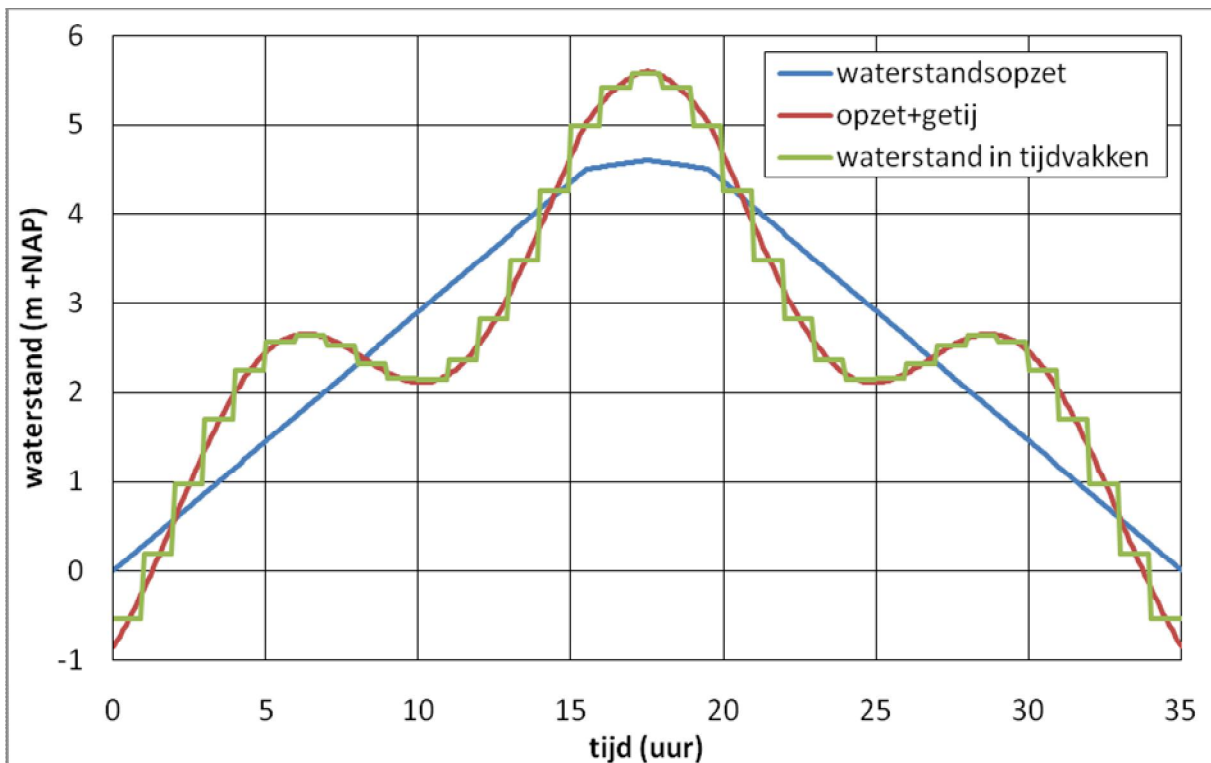
De grasmat boven Toetspeil + toeslagen wordt beoordeeld volgens de gedetailleerde toetsregels voor erosie door golfoploop. De gedetailleerde toets bestaat uit een vergelijking van de rekenwaarde van de belastingduur met de maximaal toelaatbare belastingduur.

Voor de gedetailleerde beoordeling voor erosie door golfoploop wordt verwezen naar paragraaf 6.5. Als het gras in de golfklapzone al is goedgekeurd, en in de golfoploopzone is de kwaliteit van het gras en ondergrond niet minder, dan geldt dat het in de oploopzone ook is goedgekeurd.

7.3.3 Stap 3: Geavanceerde toetsing

In een geavanceerde toetsing van het gras kunnen de belasting en de sterkte nader gedetailleerd worden en kunnen geavanceerde rekenmethoden toegepast worden om te komen tot een scherpere toetsing. In een aantal gevallen is daarvoor specialistische hulp nodig.

Het detailleren van de belasting, d.w.z. het nauwkeuriger in rekening brengen van het verloop van de waterstand en golfcondities, kan zonder specialistische hulp. Hiertoe wordt de toetsstorm in korte delen geknipt van bijvoorbeeld 1 uur. In elk deel worden de gemiddelde waterstand berekend en de bijbehorende golfcondities en golfoploophoogte. Het verloop van de waterstand wordt bepaald door het verloop van de stormopzet en het eventuele getij, of het verloop van de rivierwaterstand. Voor elk gebied zijn deze gegevens in de Hydraulische Randvoorwaarden die in elke toetsronde beschikbaar worden gesteld door het Ministerie van Infrastructuur & Milieu. Een voorbeeld van het verloop van de waterstand als functie van de tijd is gegeven in Figuur 7.2a (locatie met getij).



Figuur 7.2a, Verloop van de waterstand als functie van de tijd

Veelal zijn ook de maatgevende golfhoogte en periode bekend als functie van de waterstand (eventueel in tabelvorm). Zijn deze niet beschikbaar, dan wordt gerekend met golfcondities op toetspeil.

Voor elk tijdvak wordt met de dan heersende gemiddelde waterstand en golfcondities berekend hoe lang het gras bestand is tegen de golfaanval: t_{\max} (getrokken lijn in figuur 6.8). Daarvoor wordt de methode van paragraaf 4.4 en 6.5 gehanteerd. De mate van erosie (belasting) van het gras in dit tijdvak volgt uit $t_{\text{tijdvak}}/t_{\max}$, waarin t_{tijdvak} de gekozen duur van het tijdvak is. Door dit voor elk tijdvak te berekenen en te sommeren kan de totale erosie (effectieve belasting) en daarmee het toetsoordeel bepaald worden:

- Goed als: $\sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{tijdvak}}}{t_{\max}} < 1,0$
- Voldoende als: $1,0 \leq \sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{tijdvak}}}{t_{\max}} < 1,5$
- Onvoldoende als: $\sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{tijdvak}}}{t_{\max}} \geq 1,5$

Met:

i = nummer van het tijdvak (-)

N = aantal tijdvakken (-)

t_{tijdvak} = duur van elk tijdvak (uur)

t_{\max} = duur dat het gras bestand is tegen de golfaanval (grens voor 'goed') (uur)

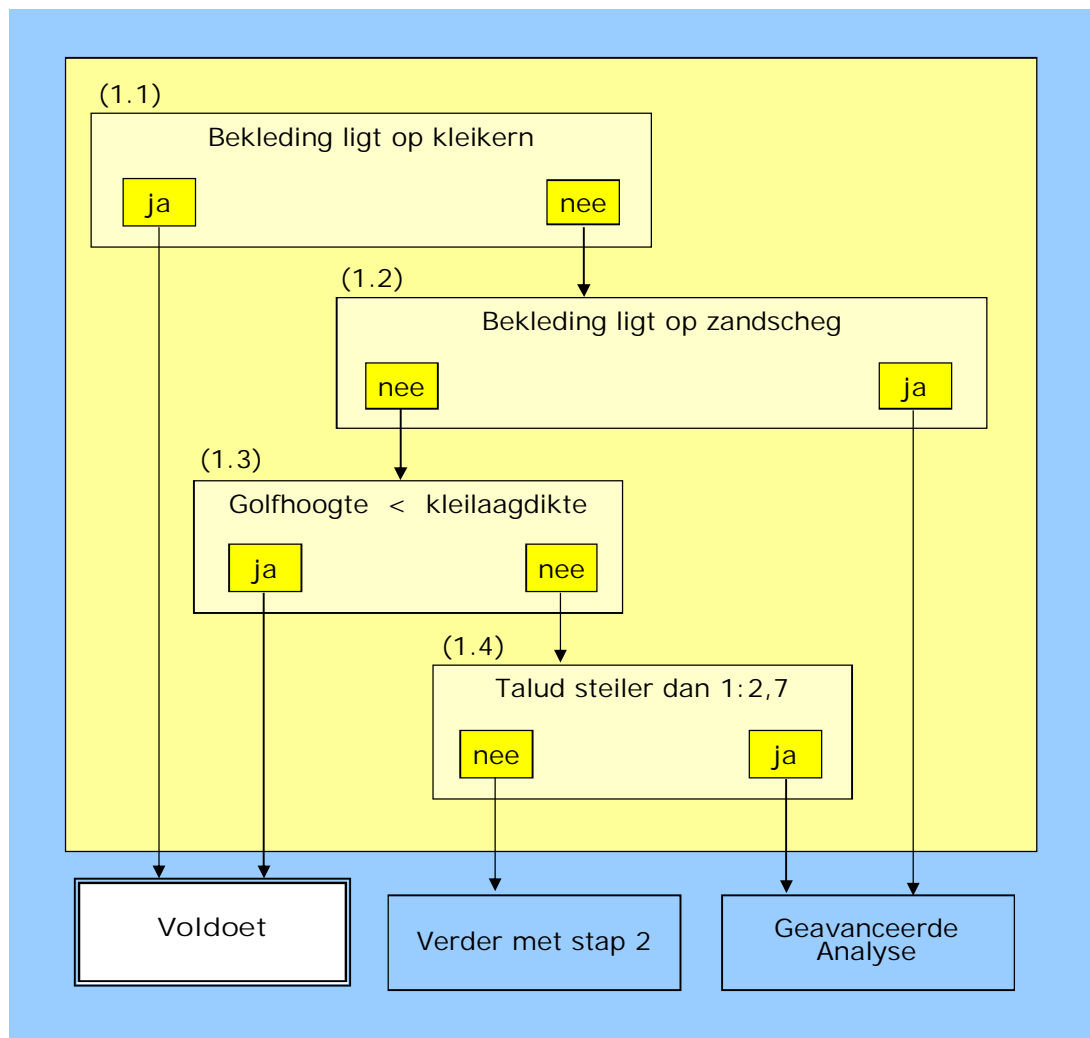
In gebieden met een tijdens toetsomstandigheden variërende waterstand neemt door bovenstaande detaillering van de belasting de nauwkeurigheid van de toetsing sterk toe.

De nauwkeurigheid in deze en andere gebieden kan nog enigszins verder verbeterd worden door ook de sterkte van het gras te detailleren en door de invloed van het dijprofiel (m.n. de invloed van bermen) in rekening te brengen. De methodes hiervoor zijn echter nog dermate experimenteel dat hiervoor specialistische hulp nodig is. Zie hiervoor ook paragraaf 7.7. Verder kan in een geavanceerde toetsing rekening gehouden worden met de nieuwste formules voor reststerkte, die ontwikkeld zijn ten behoeve van het wettelijk toetsinstrumentarium WTI-2017.

7.4 Afschuiving buitentalud

7.4.1 Stap 1: Eenvoudige toetsregels

De beoordeling vindt plaats volgens het schema in Figuur 7-3:



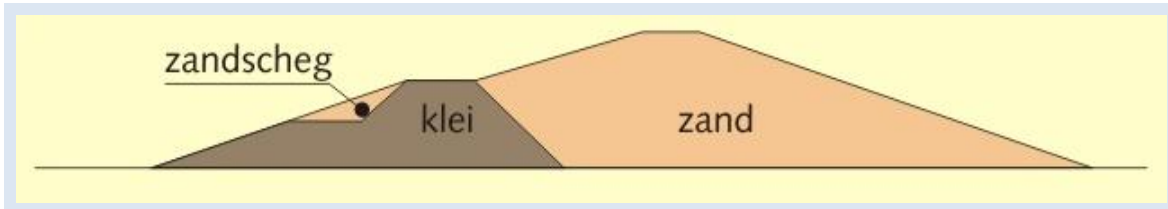
Figuur 7-3 Schema eenvoudige beoordeling op Afschuiving buitentalud

Stap 1.1

Indien de bekleding direct op een kleikern ligt, kan een score 'voldoet' worden gegeven;

Stap 1.2

Als zich vlak onder de bekleding een zandscheg bevindt dient een geavanceerde analyse te worden uitgevoerd. Een dijksprofiel met een zandscheg is weergegeven in Figuur 7-4



Figuur 7-4 Dijkprofiel met een zandscheg

Stap 1.3 Golfhoogte kleiner dan kleilaagdikte

De score is 'voldoet' als de kleilaag (de totale dikte van de deklaag) groter is dan de significante golfhoogte H_s . In de beoordeling moet worden gerekend met de golfhoogte H_s bij Toetspeil.

Stap 1.4 Talud steiler dan 1:2,7

Als de lokale taludhelling steiler is dan 1:2,7 kan de toetsing worden voortgezet met een geavanceerde analyse.

7.4.2 Stap 2: Gedetailleerde toetsregels

De gedetailleerde beoordeling is conform het vigerende VTV2006 [23] (zie Katern 8, § 4.4.6 Afschuiving buitentalud, stap 2 blz. 355)

7.5 Erosie kruin en binnentalud

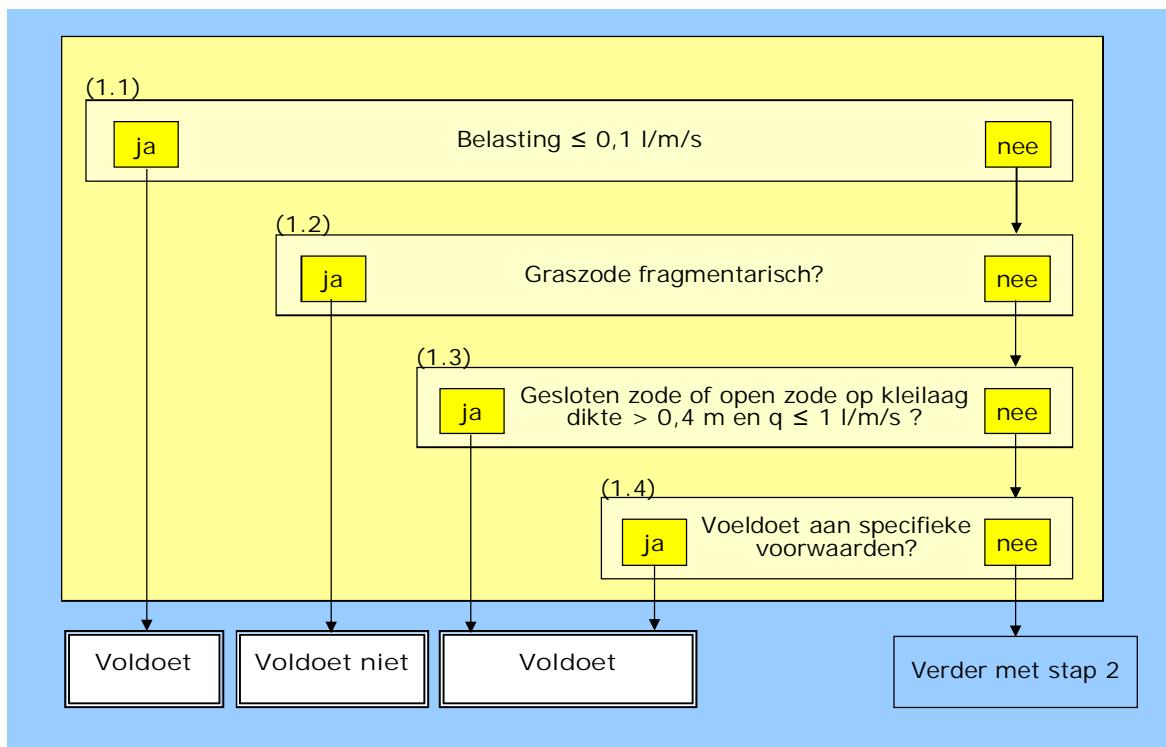
7.5.1 Stap 1: Eenvoudige toetsregels

De eenvoudige beoordeling wordt uitgevoerd volgens het beoordelingsschema uit Figuur 7-5. De toets bestaat uit een eenvoudige analyse waarin wordt nagegaan of op basis van globale kenmerken de veiligheid kan worden aangetoond.

Stap 1.1 belasting $\leq 0,1$ l/m/s

Bij een overslagdebiet q kleiner of gelijk aan 0,1 l/m/s, wordt verwacht dat de grasbekleding de belasting zonder ontoelaatbare schade kan weerstaan. De score is in dat geval 'voldoet'. Bij een overslagdebiet groter dan 0,1 l/m/s wordt de toetsing voortgezet met stap 1.2.

Het overslagdebiet wordt berekend met behulp van de HYDRA-rekenmodellen. Bij complexe geometrie van het talud moeten eerst de randvoorwaarden (Toetspeil + toeslagen en golfvandvoorwaarden) worden bepaald met de HYDRA-rekenmodellen op basis van waarvan het overslagdebiet met het rekenmodel PC-OVERSLAG berekend kan worden. De HYDRA-rekenmodellen en het rekenmodel PC-OVERSLAG gebruiken beiden de formuleringen uit het Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken [6] maar het rekenmodel PC-OVERSLAG heeft de mogelijkheid om een complexere geometrie (dan de HYDRA-rekenmodellen) toe te passen.



Figuur 7-5 Schema eenvoudige toetsregels op Erosie kruin en binnentalud

Stap 1.2 kwaliteit graszode

Stap 1.2 bestaat uit een beoordeling van de kwaliteit van de graszode. Hiertoe worden de bovengrondse plantendelen van de grasbekleding beoordeeld, bij twijfel aangevuld met lokale beoordeling van globale karakteristieken van een met een spade gestoken zodeplag. Voor de beoordeling van de sterkte van de graszode worden drie kwaliteitscategorieën onderscheiden. Deze zijn beschreven in paragraaf 6.4. Indien de graszode fragmentarisch is, is de score voor Erosie kruin en binnentalud gelijk aan “voldoet niet”. Indien de graszode open of dicht is wordt de toets voortgezet met stap 1.3.

Stap 1.3 belasting ≤ 1 l/m/s

Onder de volgende voorwaarden kan de grasbekleding met ‘voldoet’ worden beoordeeld:

- Bij een gesloten zode en overslagdebiet kleiner of gelijk aan 1 l/m/s
- Bij een open zode op kleilaagdikte van minimaal 0,4 m en overslagdebiet kleiner of gelijk aan 1 l/m/s.

Indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan wordt de toets voortgezet met stap 1.4.

Stap 1.4 Sterkte criterium

Onder de volgende voorwaarden kan de grasbekleding met ‘voldoet’ worden beoordeeld:

- gesloten zode (zie paragraaf 6.4)
- overslagdebiet q is kleiner of gelijk aan 5 l/m/s
- significante golfhoogte is kleiner dan 3 m;
- kleilaagdikte is groter dan 0,4 m of taludhelling flauwer dan 1:4;
- grootte van objecten (open plekken) is kleiner dan 0,15 m

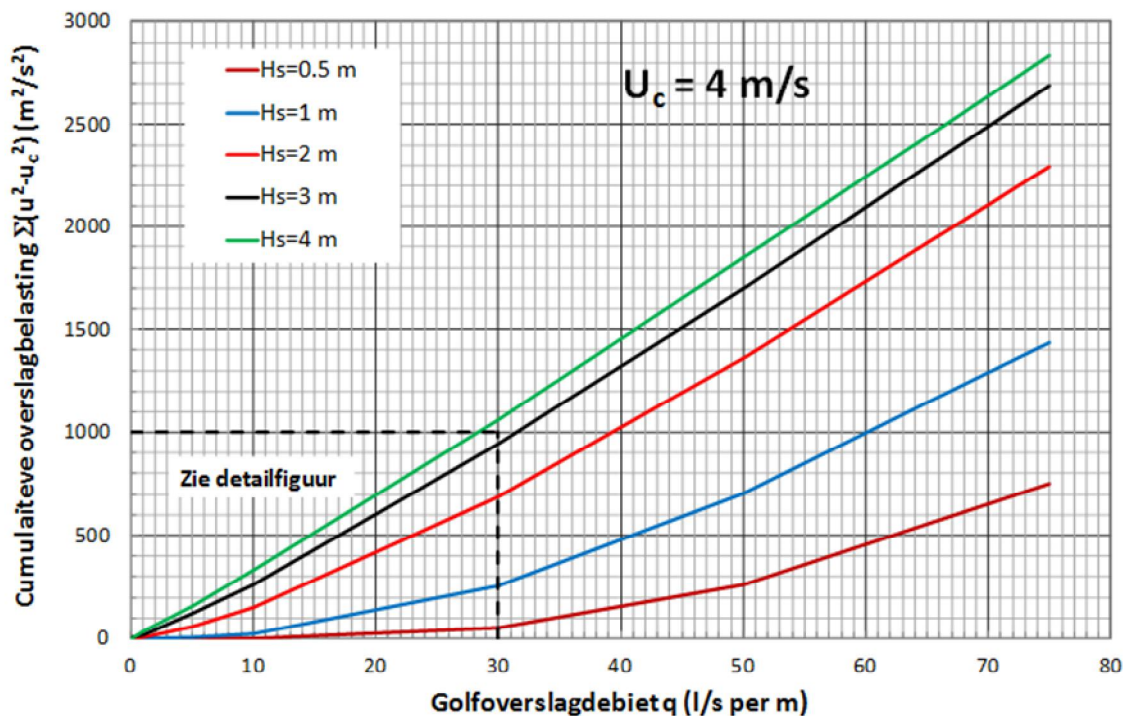
Indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan wordt de beoordeling voortgezet met de gedetailleerde toetsregels

7.5.2 Stap 2: Gedetailleerde toetsregels

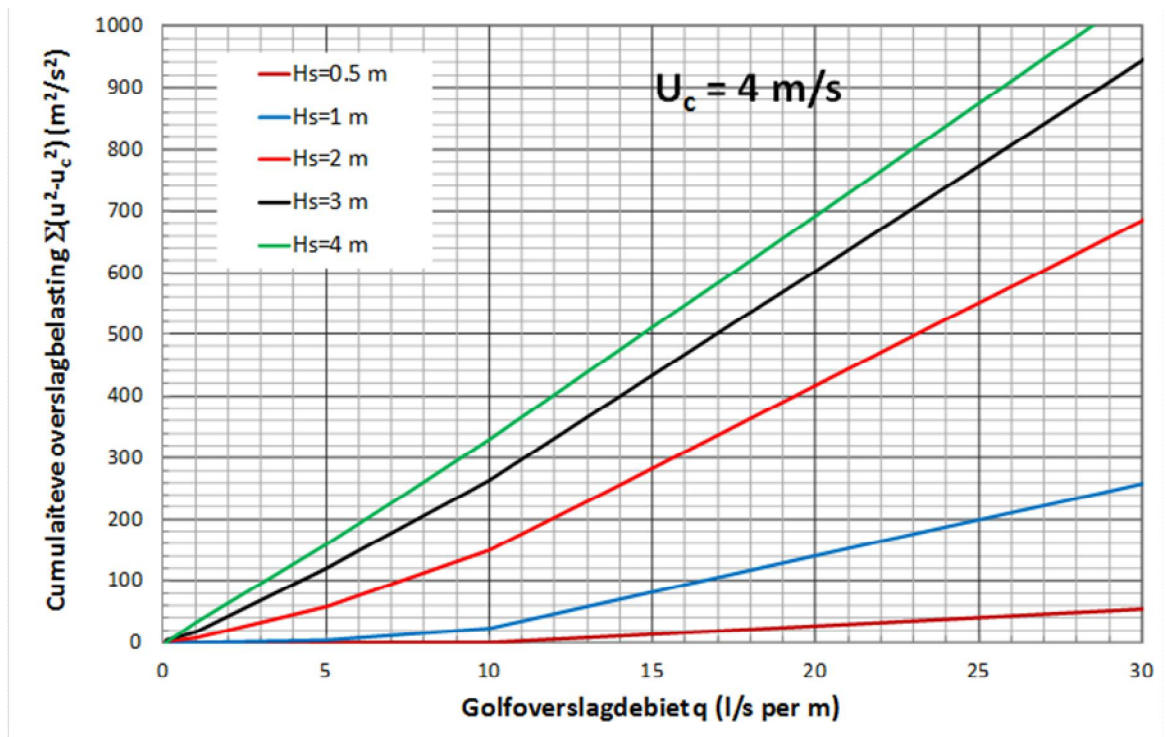
De gedetailleerde beoordeling gaat uit van de cumulatieve overbelastingmethode, zoals beschreven in paragraaf 6.2, waarbij wordt uitgegaan een kritische stroomsnelheid u_c van 4 m/s. Met deze kritische snelheid (die de sterkte van het talud beschrijft), kunnen onderstaande grafieken worden gebruikt om de cumulatieve overbelasting te bepalen en te toetsen aan een kritische waarde van $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Voor de veilige schatting van 4 m/s moet worden voldaan aan de volgende voorwaarden:

- De graszode moet gesloten zijn, niet open of fragmentarisch. Ruigte begroeiing, tuintjes en parken voldoen hier zeker niet aan.
- Bij een taludhelling steiler dan 1:4 moet er een kleilaag aanwezig zijn van minimaal 0,4 m dikte om uitspoeling van zand van onder de kleilaag door graverij te voorkomen.
- Er mogen geen objecten of beschadigingen in de stroming staan groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$.
- De taludhelling mag niet steiler zijn dan 1:2,3. Dit is de grens van de taludhelling waarbinnen bij de golfoverslagproeven ervaring is opgedaan. Hierbij wordt overigens opgemerkt dat bij steilere talud het lastiger zal zijn om te voldoen aan de eis van een 'gesloten zode' en dat ook het mechanisme afschuiven mogelijk dominant zal worden.

De grafieken geven de cumulatieve overbelasting voor een combinatie van golfhoogte en gemiddeld overslagdebiet voor de duur van 1 uur. Bij een langere, of kortere, belastingduur moet het resultaat van de grafiek worden vermenigvuldigd met de belastingduur (in uren).



Figuur 7.6a Cumulatieve overslagbelasting $\Sigma(u^2 - u_c^2)$ als functie van gemiddeld overslagdebiet, golfhoogte en kritische snelheid en voor een belastingduur van 1 uur.



Figuur 7.6b Cumulatieve overslagbelasting $\Sigma(u^2 - u_c^2)$ als functie van gemiddeld overslagdebiet, golfhoogte en kritische snelheid en voor een belastingduur van 1 uur. Detail van Figuur 7.6a.

7.6 Afschuiving binnentalud

7.6.1 Stap 1: Eenvoudige toetsregels

De eenvoudige toets voor Afschuiving van het binnentalud bestaat uit de toets op basis van geometrische kenmerken. De bekleding "voldoet" aan de toets op Afschuiving binnentalud indien aan één van bovengenoemde voorwaarden wordt voldaan:

- Het overslagdebiet q is kleiner dan 0,1 l/s per m.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1:4 en bestaat niet uit veen.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1:3 en de dijk bestaat uit stevige klei (beschrijving in Paragraaf 3.3.2)

Stevige klei is ongevoelig voor verweken onder de invloed van golfverslag, ook al zijn de macroporiën in de kleilaag met bodemstructuur binnen de duur van de golfverslag volledig verzadigd. De aggregaten van stevige klei houden hun sterkte en zijn daardoor, binnen de grenzen van de overslagduur voor Nederlandse watersystemen, vormvast. Door de nauwsluitende passing van de aggregaten en hun vormvastheid zal de laag stevige klei met bodemstructuur niet afschuiven bij een helling van 1:3 of flauwer.

7.6.2 Stap 2: Gedetailleerde toetsregels

Voor de gedetailleerde beoordeling kunnen afhankelijk van het type dijk (kleidijk/ zanddijk met kleibekleding/ zanddijk) de stabiliteitformules uit paragraaf 6.3.3 worden gebruikt, waarbij een conservatieve schatting van de waterspanningen wordt gebruikt, bijvoorbeeld een volledig verzadigde dijk. Het oordeel kan worden aangescherpt door:

- een betere bepaling van de waterspanningsopbouw (conform paragraaf 0) en/of door

- het toepassen van meer geavanceerde stabiliteitmodellen, zoals het willekeurig glijvlakmodel volgens de methode Spencer of een EEM berekening.

7.7 Geavanceerde analyse van een grasbekleding

In een geavanceerde analyse kan de rekenmethode voor de beoordeling van een grasbekleding nader worden beschouwd of kan worden gekeken of onzekerheden over parameters kunnen worden beperkt door meer onderzoek.

Voor alle mechanismen die leiden tot falen van de grasbekleding, geldt dat het mogelijk is om de belastingduur en belastingintensiteit nauwkeuriger te bepalen, als ook de sterkte van de grasmat beter te beoordelen. Bij de gedetailleerde toetsing geldt als uitgangspunt dat op alle niveaus, gedurende het hele verloop van het hoogwater, dezelfde maatgevende golfparameters worden gebruikt; het kan mogelijk zijn om in geavanceerde toetsing te werken met lagere golven bij lagere waterstanden, vanwege diepte beperking en of nog onvolgroeide golfhoogtes (zie paragraaf 7.3.3).

7.7.1 Erosie door golfoverslag

Bij de gedetailleerde toetsregels is uitgegaan van een ondergrens met betrekking tot de toe te passen kritische snelheid. Deze kritische snelheid beschrijft in feite de sterkte van de grasmat en de ondergrens is een gesloten grasmat op een zanddijk (Vechtdijk bij Zwolle, geen klei aanwezig). Een gesloten grasmat op een kleilaag kan veel sterker zijn, wat door de overslagproeven is bewezen.

Om een hogere kritische snelheid van bijvoorbeeld 5 m/s or 6 m/s te mogen toepassen, moet specialistische kennis worden ingeschakeld. Hierbij moet de grasmat als ook de ondergrond goed in kaart worden gebracht, waarna een oordeel geveld kan worden of de kritische snelheid verhoogd mag worden.

Een andere mogelijkheid is om met behulp van de golfoverslagsimulator een proefbelasting op het binnentalud uit te voeren. Vanaf 2007 is met de golfoverslagsimulator veel ervaring opgedaan bij het uitvoeren van onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras bij golfoverslag. Ten aanzien van de proefuitvoering is hierdoor enige routine ontstaan, waardoor de grootschalige proef mogelijk minder ingrijpend is dan het lijkt. Bij het inzetten van de golfoverslagsimulator voor een toetsing moet specialistische kennis worden ingeschakeld.

Enkele aandachtspunten bij het uitvoeren van een proef als onderdeel van de toetsing op maat:

- Bij de keuze van de proefstrook moet rekening worden gehouden met zowel uitvoeringsaspecten als de representativiteit van de grasbekleding voor de te toetsen dijkstrekking. Om te bepalen of de proefstrook representatief is moet een beeld bestaan van de variatie van de kwaliteit van de vegetatie en van de erosiebestendigheid van het substraat. Voor een eenvoudige uitvoering van de proef zijn een goede bereikbaarheid van de locatie met zwaar materieel en de aanwezigheid van water van belang.
- Er moet rekening mee worden gehouden dat de proef kan leiden tot schade aan de bekleding en dat deze gedurende het gesloten seizoen (oktober – medio maart) moet worden uitgevoerd, vanwege de mindere graskwaliteit in deze periode.
- De intensiteit en de duur van de belasting dienen te worden afgestemd op de toetsomstandigheden en de onzekerheden ten aanzien van variaties in de sterkte van de bekleding. De belasting dient zodanig hoog te worden gekozen dat de proef maatgevend is voor de te toetsen dijkstrekking. In de praktijk betekent dit dat de proefbelasting hoger zal zijn dan de toetsbelasting. De belasting hoeft niet noodzakelijkerwijs te worden

opgevoerd tot falen optreedt indien de bekleding deze belasting aan kan. Er is nog geen standaard methode om de juiste proefbelasting te bepalen. Hiervoor dient specialistische hulp te worden ingeschakeld.

7.7.2 Afschuiven bij golfoverslag

In bepaalde gevallen kan een geavanceerde analyse alsnog leiden tot een score 'goed' of 'voldoende'. Een geavanceerde analyse zal in veel gevallen betrekking hebben op het bepalen van waterspanningen in de toplaag en kern van de dijk of dam bij overslag. Het is verstandig om als eerste deelstap van een toetsing op maat na te gaan of de toetsing op maat zin heeft en welke methodes in aanmerking komen. Ook voor deze eerste deelstap is specialistische kennis nodig.

Gedacht kan worden aan:

- nauwkeuriger mechanismebeschrijving;
- geavanceerde niet-stationaire grondwaterstromingsberekeningen;
- geavanceerde proeven of meettechnieken.

Het is mogelijk om een grote schaal proef te gebruiken als toetsing op maat. Hierbij wordt over een typische dijkstrekking van 30 m gelijkmatig water over het talud gestroomd. Het debiet is minimaal voldoende om het hele talud gedurende de proef nat te houden. Op enkele locaties in Nederland is deze proef inmiddels uitgevoerd voor onderzoek naar het mechanisme afschuiven bij overslag en een enkele keer ook als geavanceerde toetsing (zie Paragraaf 4.2.6).

Aandachtspunten bij het uitvoeren van een proef als onderdeel van de toetsing op maat zijn:

- Bij de keuze van de proefstrook moet rekening worden gehouden met zowel uitvoeringsaspecten als de representativiteit van de bekleding voor de te toetsen dijkstrekking. Om te bepalen of de proefstrook representatief is moet een beeld bestaan van de variatie van de kwaliteit en opbouw van de bekledingslaag en de taludhelling. Voor een eenvoudige uitvoering van de proef zijn een goede bereikbaarheid van de locatie met materieel en de aanwezigheid van water van belang.
- Er moet rekening mee worden gehouden dat de proef kan leiden tot schade aan de bekleding en zelfs afschuiven van de bekleding als geheel. In tegenstelling tot een proef naar de erosiebestendigheid hoeft de proef niet in het gesloten seizoen te worden uitgevoerd.
- De intensiteit en de duur van de belasting, het overloopdebiet, dient te worden afgestemd op lokale omstandigheden en de toetsbelasting. Het aanbod van water dient voldoende te zijn om het hele talud gedurende de proef nat te houden. Het is niet nodig om veel meer dan dit debiet over het talud te laten stromen, ook al volgt een hoger gemiddeld overslagdebiet uit de toetsresultaten. Het hogere debiet zal niet of nauwelijks leiden tot meer infiltratie en alleen de proefuitvoering bemoeilijken. De ervaring tot dusver is dat het overloopdebiet minder dan 2 l/s per m hoeft te zijn, maar meer dan 1 l/s per m.
- De belasting hoeft niet noodzakelijkerwijs te worden voortgezet tot falen optreedt. Er moet alleen met voldoende zekerheid worden aangetoond dat de toetsomstandigheden kunnen worden weerstaan. In de praktijk betekent dit dat de proefbelasting langduriger zal zijn dan de toetsbelasting. Er is nog geen standaard methode om de juiste proefbelasting en duur exact te bepalen. Hiervoor dient specialistische hulp te worden ingeschakeld.
- Bij kleidijken leidt het resultaat van de proef vrij direct tot het oordeel 'voldoet' of 'voldoet niet'. De waterspanningen in het binnentalud worden bij deze dijken hoofdzakelijk bepaald door overslag. De proefbelasting komt dus goed overeen met de toetsomstandigheden.

- Bij zanddijken met een kleibekleding zal het effect van de indringing van een hoge buitenwaterstand en infiltratie van water op het buitentalud moeten worden meegenomen bij de beoordeling. Omdat de proef alleen bestaat uit infiltratie op het binnentalud, zal hiervoor een geavanceerde berekening nodig zijn, waarmee de effecten van een hoge buitenwaterstand worden opgeteld bij de gevolgen van infiltratie zoals gemeten tijdens de proef. Met de totale berekende waterspanningen kan dan een stabiliteitberekening worden gemaakt. Bij de interpretatie van de waterspanningsmetingen zal rekening moeten worden gehouden met 3D-effecten.
- Een grote schaalproef als een toetsing op maat is veel beter geschikt voor kleidijken dan voor zanddijken.

7.7.3 Erosie door golfklappen

Ook voor het mechanisme erosie door golfklappen geldt dat het mogelijk is om de belastingduur en belastingintensiteit nauwkeuriger te bepalen, als ook de sterkte van de grasmat beter te beoordelen. Bij de gedetailleerde toetsregels geldt als uitgangspunt dat op alle niveaus, gedurende het hele verloop van het hoogwater, dezelfde maatgevende golfparameters worden gebruikt; het kan mogelijk zijn om in geavanceerde toetsing te werken met lagere golven bij lagere waterstanden, vanwege diepte beperking en of nog onvolgroeide golfhoogtes (zie paragraaf 7.3.3).

Verder kan in een geavanceerde toetsing rekening gehouden worden met de nieuwste formules voor reststerkte, die ontwikkeld zijn ten behoeve van het wettelijk toetsinstrumentarium WTI-2017.

Een andere mogelijkheid is om met behulp van grootschalig onderzoek met de in ontwikkeling zijnde golfklapgenerator een proefbelasting op het binnentalud uit te voeren. Bij het inzetten van de golfklapgenerator voor een toetsing moet specialistische kennis worden ingeschakeld.

Voor het uitvoeren van proeven met de golfklapgenerator gelden dezelfde aandachtspunten als voor het uitvoeren van proeven met de golfoverslagsimulator.

8 Niet waterkerende objecten en discontinuïteiten

De erosiebestendigheid van waterkeringen kan in gevaar komen door objecten die niet bedoeld zijn om water te keren en die zich binnen de zone bevinden waarbij zij invloed op de erosiebestendigheid kunnen hebben. De bedoelde objecten worden samengevat onder de naam niet-waterkerende objecten. Voorbeelden zijn: trapopgangen, bomen, hekwerken, dijk- en verkeersmeubilair, bebouwing, etc.

Feitelijk betreft het objecten die invloed uitoefenen op de stroming van overslaand water en op de sterkte van de bekleding rondom de objecten. In dit hoofdstuk betreft het alleen die objecten die invloed kunnen hebben op de schadeontwikkeling door concentratie van overslaand water rondom het object. In de dijk aanwezige kabels en leidingen maken hier geen deel van uit. Zolang deze ondergronds blijven hebben ze geen invloed op het falen van de toplaag. Een lekkende leiding die een ontgrondingskuil veroorzaakt, veroorzaakt daarmee instantaan falen van de toplaag. Hetzelfde geldt voor onwortelde bomen. De ontwortelingskuilen zijn altijd dieper dan de toplaag dik is, waardoor deze als bezweken moet worden beschouwd. Niet onwortelde bomen worden wel behandeld.

Naast de invloed die niet-waterkerende-objecten op het waterkerende vermogen van de dijk kunnen hebben, zijn ook discontinuïteiten een bron van mogelijk initiatie van schade die de inleiding kan zijn van falen van de waterkering. Discontinuïteiten zijn onder andere: overgangen van talud naar horizontale vlakken (berm of teen onderaan het talud), schades als gevolg van mechanische of dierlijke activiteiten en overgangen van zachte bekleding naar harde materialen zoals bijvoorbeeld (onderhouds)wegen, steenbekledingen, doorgroeistenen, parkeerplaatsen etc.

Een niet waterkerend object (NWO) kan het waterkerend vermogen van de waterkering tijdens golfoverslag negatief beïnvloeden doordat de afdekkende grasbekleding wordt aangetast. Dit kan op drie verschillende wijzen, welke in de volgende paragrafen op hoofdzakelijk kwalitatieve wijze worden behandeld. De beschrijvingen zijn gebaseerd op ervaringen bij met name de golfoverslagproeven. Een praktisch toepasbaar en gevalideerd model voor de beoordeling van de invloed van niet waterkerende objecten en overgangen ontbreekt nog.

8.1 Stromingsconcentraties langs objecten

Een effect dat kan optreden is te zien bij verticale obstakels, zoals bomen en brede palen, in de baan van het overslaande water. De waterstroom wordt geblokkeerd en moet zich splitsen. Dit splitsen veroorzaakt hevige turbulentie net achter het object, hetgeen een extra eroderende werking met zich mee brengt. Daarnaast concentreert zich aan beide zijden van het object de stroming waardoor ook naast het object een hogere belasting optreedt. De mate van turbulentie en stroomconcentratie is afhankelijk van de breedte en vorm van het opstaande object. Uit proeven is gebleken dat kleinere opstaande objecten, tot een breedte van circa 0,15 m, minder tot geen effect hebben op de belasting door het overslaande water. Figuur 8.1 geeft een beeld van schade veroorzaakt door een boom op de binnenteen.



Figuur 8.1 Schade als gevolg van stroomconcentratie en turbulentie na grote overslagdebieten (Golfoverslagproeven Vechtdijk, 5½ uur 50 l/s per m)

Een ander voorbeeld is de stromingsconcentratie langs een taludtrap. De trap is een opstaand element waarbij het overslaande water zich concentreert langs de zijkanten van de opgang en vervolgens zorgt voor een waterjet onderaan de opgang bij de overgang van talud naar horizontaal. De geconcentreerde stroom geeft een extra erosieve werking. Een overgang die niet gedimensioneerd is op een dergelijke waterstroom (bescherming tegen waterjet of geleiding van waterjet) is kwetsbaar. Figuur 8.2 en Figuur 8.3 geven een impressie van het resultaat van een praktijktest.



Figuur 8.2 Schade als gevolg van stroomconcentratie na zeer grote overslagdebieten (Golfoverslagproeven Afsluitdijk, 6 uur 50 l/s per m)



Figuur 8.3 Schade als gevolg van stroomconcentratie in combinatie met verminderde sterkte door onder andere het gebruik van onkruidwerend middel langs de trap (Golfoverslagproef op dijk bij Poortvliet, Tholen, na 2 uur 5 l/s per m)

8.2 Strooming rond niet goed beheerbare delen

Een tweede effect van een niet-waterkerend object betreft beperkingen in beheer en onderhoud. Veel dijken worden mechanisch onderhouden. Het is echter niet goed mogelijk om met bijvoorbeeld machines rondom de niet-waterkerende objecten te maaien of te klepelen. Ook schapen houden het gras niet exact tot aan of rondom de objecten kort. Het gevolg hiervan is dat organisch materiaal zich ophoopt ter plaatse van het object. Dit wordt nog eens versterkt door vang van stof en los organisch materiaal door het opstaande object. Het opgehoopte organische materiaal vormt op den duur een sponsachtige ophoging op het talud, berm of achterland, een geliefde habitat voor muizen en andere kleine dieren. Deze ophoging kan een zwakke plek vormen in de grasbekleding en is een aangrijpingspunt voor het overslaande water. Onder andere onder hekwerken kan dit mogelijk tot initiatie van schade leiden.

Hoe de sponsachtige ophoging de erosiebestendigheid beïnvloedt, is niet eenduidig vastgesteld bij de golfoverslagproeven. Bij een overslagproef bij Poortvliet (Tholen) is waargenomen dat de sponsachtige verhoging bij een hekwerk dwars op de dijk de stroming juist afleidde van deze plek, waardoor de belasting hier minimaal was. Het talud bezweek op een andere plek dan het hekwerk, al bij een lage overslagbelasting (Figuur 8.4).



Figuur 8.4 Sponsachtige ophoging langs hekwerk (Golfoverslagproef op dijk bij Poortvliet Tholen)

8.3 Overgangen/discontinuïteiten

Uit proeven met de golfoverslagsimulator is gebleken dat scherpe overgangen van een talud naar een berm of achterland gevoelig zijn voor initiatie van schade. Figuur 8.5 geeft hier een voorbeeld van. Het stromende water uit overslaande golven heeft een jetwerking op de horizontale berm. Reeds bij proeven met 10 l/s per m is initiatie van schade gebleken. Uit de proeven is verder gebleken dat een geleidelijke overgang van talud naar horizontale berm of achterland, dit mechanisme niet optreedt. Een geleidelijke overgang is dus minder gevoelig voor initiatie van schade.

Een discontinuïteit als gevolg van schade (rijsporen en dergelijke) op de kruin, talud, teen of berm kunnen grote invloed hebben op de initiatie van doorgaande schade in omstandigheden met golfoverslag. De discontinuïteiten in de vorm van een verdieping (hol of rijspoor o.i.d.) moeten dan wel van een omvang zijn waarbij de waterstroom vat kan krijgen op de benedenstroomse rand van de verdieping. Daarbij speelt ook de ondergrond een rol. Zo zijn bijvoorbeeld molgaten in een kleiige grasmat minder gevoelig voor doorgaande schade dan een molgat in een zandige ondergrond. Verder is het van belang of in het beschadigde deel

nog een wortelstelsel aanwezig is of niet. Als dit wel zo is, dan is niet direct schade te verwachten.



Figuur 8.5 Schade aan teen na 30 l/s per m (Golfoverslagproeven Boonweg, Fryslân)



Figuur 8.6 Overgang van talud naar wegovorgang met doorgroeistenen (Golfoverslagproeven Vechtdijk)

9 Literatuur

- [1] Technisch Rapport Erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding, TAW, 1998.
- [2] Technisch Rapport Grasmatt als dijkbekleding, TAW, 1999.
- [3] Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, TAW 2004, ISBN-90-369-5565-3.
- [4] Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, TAW 2001, + 'Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies', ENW, 2007.
- [5] Technisch Rapport Klei voor Dijken, TAW, 1996.
- [6] Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij dijken, TAW, Delft, 2002.
- [7] EuroOtop, European Overtopping Manual, Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, August 2007, ISBN 978-3-8042-1064-6, <http://www.overtopping-manual.com/eurotop.pdf>.
- [8] Grondslagen voor Waterkeren, TAW, ISBN 90-369-373-5-3, Delft, januari 1998.
- [9] Handreiking Constructief ontwerpen, Onderzoek en berekening naar het constructief ontwerp van de dijkversterking, TAW, Delft, april 1994.
- [10] Fliervoet, L.M. Aanleg en beheer van grasland op rivierdijken. Unie van Waterschappen, 's-Gravenhage & IKC-NBLF, Wageningen, 1992.
- [11] Sprangers, J.T.C.M. Extensief graslandbeheer op zeedijken – effecten op vegetatie, wortelgroei en erosiebestendigheid. Landbouwuniversiteit Wageningen, Wageningen, 1996.
- [12] Sprangers, J.T.C.M & W.J. Arp, Toetsingsparameters dijkgrasland. Indicatorsoorten dijkgraslandtypen en worteldichtheidsbepalingen (handmethode). Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Wageningen, 1999.
- [13] Frissel, J.Y. & Huiskes, H.P.J. Doorworteling en zodeparameters van de dijkgrasland op de Boonweg 2007/2008. Alterra-rapport 1756. Alterra, Wageningen, 2008.
- [14] Schaffers, A.P., J.Y. Frissel, M.H.C. van Adrichem & H.P.J. Huiskes, Seizoensverloop in de doorworteling van dijkgrasland. VTV-toetsing buiten het winterseizoen nader bekeken. Alterra-rapport 2014. Alterra, Wageningen, 2010.
- [15] V&W, Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag 2007.
- [16] Provincie Gelderland (z.j.). Aanleg en beheer van rivierdijken, terugkeer van soortenrijk grasland door gerichte maatregelen. Polderdistrict Groot Maas en Waal. Provincie Gelderland.
- [17] Sprangers, J.T.C.M. & J.A. Muijs, Groene zeedijken in Noord-Duitsland en Denemarken. RWS-DWW-rapport W-DWW-97-003, Delft, 1997.
- [18] Schippers, W. & M.G. Gardeniers, Introductie van inheemse flora. Handreiking voor een verantwoorde keuze en aanpak met een accent op multifunctionele terreinen. IKC-Natuurbeheer, Wageningen, 1998.
- [19] Föhse D., N. Claassen & A. Jungk. Phosphorus efficiency of plants. II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. *Plant Soil* 132: 261–272, 1991.
- [20] López-Bucio J., E. Hernández-Abreu, L. Sánchez-Calderón, M.F. Nieto-Jacobo, J. Simpson & L. Herrera-Estrella. Phosphate availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in the Arabidopsis root system. *Plant Physiol.* 129: 244–256, 2002.
- [21] Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken, ENW, maart 2009
- [22] Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken Deel 1 – bovenrivierengebied, TAW, Staatsuitgeverij - 's-Gravenhage, september 1985.

- [23] Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (VTV2006), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, september 2007.
- [24] Dean, R.G., J.D. Rosati, T.L. Walton, B.L. Edge. Erosional equivalences of levees: Steady and intermittent wave overtopping, *Ocean Engineering*, 37, 104-113, 2010.
- [25] Partheniades, E.. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 91(HY1), 105-139, 1965.
- [26] Kruse, G.A.M., Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied, Deltares 1202512-000-GEO-0002, Delft, juli 2010.
- [27] Waterbeweging in de golfoploop/-overslagzone bij dijken in relatie tot de erosiebestendigheid van grasmatten - Notitie bij de Leidraad Toetsen op Veiligheid, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, december 1999.
- [28] Technisch Rapport Steenzettingen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, In 3 delen: Ontwerp, Toetsing en Achtergronden, (ISBN 90-369-5551-3), RWS-DWW-2003-097, Delft, december 2003.
- [29] Criteria voor de toepassing van bekledingen op waterkeringen, hulpmiddel voor ontwikkeling van innovatieve dijkbekledingen. Witteveen+Bos, concept februari 2010.
- [30] Waterwet, http://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/geldigheidsdatum_01-10-2013.
- [31] Documentatie Steentoets2014, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen, M. Klein Breteler. Deltares Rapport 1208045-009, Delft, juli 2014.
- [32] Toetsen Grasbekledingen op Dijken, J.W. van der Meer, H.J. Verheij, G.J.C.M. Hoffmans, M.P.C.P. Paulissen, G.J. Steendam, A. van Hoven. Deltares, Delft, mei 2012.
- [33] Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, november 2002.
- [34] State of the art asfaltdijkbekledingen, STOWA, rapportnummer 2010-W06, Amersfoort, 2010.
- [35] Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, ISBN 978-90-369-5761-8, Den Haag, september 2007.

10 Hydraulische randvoorwaarden en belastingen

- HYDRA-K Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de bekleding van primaire waterkeringen langs de Hollandse Kust en estuaria.
Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006) [35]
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007.
Voor meer informatie: www.helpdeskwater.nl
- HYDRA-M Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de kruinhoogte van primaire waterkeringen langs het Markermeer.
Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006) [35]
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007.
Voor meer informatie: www.helpdeskwater.nl
- HYDRA-Q Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de bekleding van primaire waterkeringen langs het IJsselmeer en Markermeer
Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006) [35]
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007.
Voor meer informatie: www.helpdeskwater.nl
- HYDRA-R Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de kruinhoogte en de bekleding van primaire waterkeringen in het bovenrivierengebied
Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006) [35]
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007.
Voor meer informatie: www.helpdeskwater.nl
- HYDRA-VIJ Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de kruinhoogte van primaire waterkeringen in de Vechtdelta.
Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006) [35]
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007.
Voor meer informatie: www.helpdeskwater.nl

A Begrippenlijst

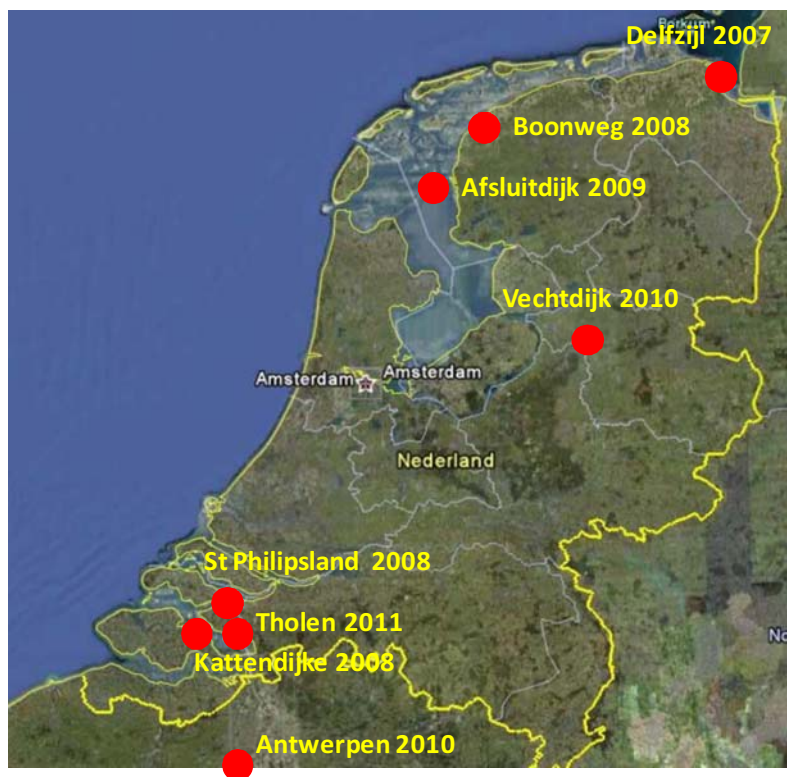
Aggregaten	Natuurlijk gevormde brokken grond met afmetingen van millimeters tot decimeters.
Gras	Individuele plantensoort (enkelvoud) of begroeiing met een grasachtig uiterlijk (meervoud; dan ook 'grasland', 'grasvegetatie'). Echte grassen (Poaceae) of verwante eenzaadlobbige soorten zijn dominant of beeldbepalend. In de meeste dijkgraslanden komen echter ook kruiden voor.
Graszode	Het intensief doorwortelde bovenste deel van de top laag, bestaande uit substraat plus wortels. In de zode zijn de wortels van individuele spruiten meestal sterk vervlochten. De zode is gewoonlijk tot ca. 5 cm dik.
Kruiden	Tweezaadlobbige plantensoorten, vaak gekenmerkt door een weinig 'grasachtig' uiterlijk en – in vergelijking met grassen – veel opvallender bloemen. In natuurlijke graslanden en ook op de meeste dijkgraslanden komen naast grasachtigen ook kruiden voor.
Ruigte	begroeiing met doorgaans vrij forse en hoog opgaande plantensoorten. Dit kunnen forse grassen zijn, zoals Kroppaar (<i>Dactylis glomerata</i>) of Kweek (<i>Elytrigia repens</i>). Echter, vaak domineren kruiden zoals Fluitenkruid (<i>Anthriscus sylvestris</i>), Gewone berenklaauw (<i>Heracleum sphondylium</i>), Grote brandnetel (<i>Urtica dioica</i>) of Japanse duizendknoop (<i>Fallopia japonica</i>). Kenmerkend voor veel ruigtevegetaties is de relatief lage soortenrijkdom en de matig tot zeer slechte bedekkings- en doorwortelingsgraad.
Schaardijk	Dijk die onmiddellijk aan de rivier ligt en niet door uiterwaarden daarvan gescheiden is.
Schrale klei	Weinig erosiebestendige klei.
Stevige klei	Klei die voldoet aan de voorwaarden van erosiebestendige klei.
Vegetatie	Begroeiing, in casu op dijken. Een voorbeeld van een dijkvegetatie is een 'grasmat' (bestaande uit grasachtigen en kruiden) of een ruigte.
Zode	Zie graszode.

B Samenvatting kengetallen en resultaten golfoverslagproeven

Bijlage en onderbouwing

Soorten proeven, locaties en bevindingen

De golfoverslagsimulator is ontworpen en gebouwd in 2006, waarna in de jaren daarna, meestal in februari/maart, proeven zijn uitgevoerd op diverse dijken in Nederland. In 2007 zijn in ComCoast-kader proeven uitgevoerd op de dijk bij Delfzijl. Daarna zijn proeven in het kader van SBW uitgevoerd. In 2008 betroffen dit proeven op de Waddenzeedijk (Boonweg) in Friesland en op twee locaties in Zeeland (St Philipsland en Kattendijke). De proeven in Zeeland zelf werden door Rijkswaterstaat Zeeland opgedragen, terwijl verdere uitwerking in SBW-kader plaats vond. In 2009 werd de Afsluitdijk onderzocht en in 2010 een zanddijk langs de Vecht bij Zwolle. Eind 2010 werden rivierdijken in Vlaanderen onderzocht, net ten zuiden van Antwerpen. De proeven vonden plaats in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium te Antwerpen. Gedetailleerde uitwerking binnen SBW-kader heeft nog niet plaatsgevonden. Tot slot zijn begin 2011 proeven uitgevoerd op Tholen, in opdracht van Rijkswaterstaat Zeeland. Ook op deze proeven is nog geen gedetailleerde uitwerking binnen SBW-kader uitgevoerd. De locaties zijn gegeven in figuur B1.



Figuur B1. Overzicht van locaties waar proeven zijn uitgevoerd met de golfoverslagsimulator tot en met 2011.

Vaak zijn meerdere secties op dezelfde locatie onderzocht. Van elk onderzoek is een factual report beschikbaar en vanuit SBW-kader ook vaak predictie-, evaluatie- en modelontwikkelingsrapporten. Onderstaand is het overzicht gegeven met beschikbare rapporten van onderzoek met de golfoverslagsimulator van 2007 - 2011. De namen van de rapporten zijn ontleend aan de onderzoekscyclus van Model – Predictie – Proef – Evaluatie – Modelontwikkeling. Elk van deze fasen is vaak apart gerapporteerd.

- Fase 1D Evaluatie Delfzijl
- Fase 2A Modelontwikkeling Boonweg
- Fase 2B Predictie Boonweg
- Fase 2C Proefuitvoering Boonweg (factual report)
- Fase 2D Evaluatie Boonweg

Fase 3A Modelontwikkeling Afsluitdijk
Fase 3B Predictie Afsluitdijk
Fase 3C Proefuitvoering Afsluitdijk (factual report)
Fase 3D Evaluatie Afsluitdijk
Fase 4A Modelontwikkeling Vechtdijk
Fase 4B Predictie Vechtdijk
Fase 4C Proefuitvoering Vechtdijk (factual report)
Fase 4D Evaluatie Vechtdijk
Fase 5C Proefuitvoering Zeeland (factual report St. Philipsland en Kattendijke)
Fase 5D Evaluatie Zeeland St. Philipsland en Kattendijke
Verslag golfoverslagproeven Tielrode (factual report)
Overslagproeven en olooppoef Tholen (factual report)

De fase 1A tot en met 1C zijn niet als rapportage beschikbaar. Het factual report is een rapport van ComCoast (www.comcoast.org). Ook fase 5A en 5B ontbreken. De proeven zijn in een ander kader uitgevoerd, waardoor de modelontwikkeling en predictie achterwege zijn gebleven. Hetzelfde geldt voor de laatste twee rapporten omtrent proeven bij Antwerpen (Tielrode) en op Tholen.

Proeven zijn uitgevoerd door met de golfoverslagsimulator een bepaald gemiddeld overslagdebiet meestal gedurende 6 uur op te leggen en de daarbij behorende overslaande golfvolumes te simuleren. Na deze 6 uur werd een nieuw en hoger overslagdebiet opgelegd. De volgende overslagdebieten werden meestal gesimuleerd: 0,1; 1; 10; 30; 50 en 75 l/s per m. Bij de proeven in Vlaanderen (Antwerpen - Tielrode) werd van een getij hoogwater op een rivier uitgegaan en was de proefduur per overslagdebiet maar 2 uur. De ervaring met de proeven leerde dat het meestal niet een goed grastalud is wat de (eerste) schade liet zien, maar iets anders, zoals de teen van de dijk, een taludovergang, een boom, een parkeerplek van klinkers aan de teen of een trap op het binnentalud.

Deze bijlage geeft op twee manieren een totaaloverzicht van de resultaten van vijf jaar lang uitvoeren van golfoverslagproeven. Als eerste is dit een tabel met zoveel mogelijk alle gegevens. Ten tweede wordt de meeste ruimte in beslag genomen door een fotobijlage, die ook weer gekoppeld is aan de overzichtstabel. Voor precieze uitvoering, resultaten en details wordt verwezen naar de afzonderlijke rapporten. Tabel B1 geeft de meeste basisgegevens. In chronologische volgorde van uitvoeren van de proeven worden eerst de locaties genoemd. Elke locatie is weer onderverdeeld naar de sectie die is onderzocht en deze kan weer onderverdeeld zijn in het talud zelf (zonder aanduiding) of een specifiek deel, zoals de teen, een trap, een boom, etc. Daarna wordt de observatie gegeven van dat betreffende deel, waarbij zoveel mogelijk is gezocht naar "begin schade", "meerdere kale plekken" en "bezwijken". Soms ontstond geen schade en dan is dat aangegeven. De volgende kolom geeft de overslagbelasting aan die het betreffende deel voor de gegeven observatie heeft ondergaan. De duur van elk overslagdebiet was 6 uur, tenzij anders aangegeven.

Met de gesimuleerde overslag is daarna voor elke sectie de cumulatieve overbelasting bepaald, waarbij kritische snelheden zijn aangehouden van 0; 3,1; 4; 5 en 6,3 m/s, overeenkomende met kritische overslaande golfvolumes van 0; 0,25; 0,5; 1 en 2 m³/m.

Deze tabel met overslaggegevens is verder geanalyseerd, waarbij uiteindelijk de in hoofdstuk 4 gegeven conclusies zijn getrokken omtrent de cumulatieve overslagbelasting van $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ voor bezwijken toplaag en de kritische snelheden die horen bij de verschillende onderzochte dijklocaties.

De volgende helft van de tabel geeft de gegevens van het grastalud en de klei, overeenkomstig de classificaties in de VTV 2006. De beheercategorieën A-D zijn in paragraaf 3.4.2 beschreven. De betekenis van de beheertypen is onderstaand gegeven.

Beheertype	Betekenis
HH-	hooibeheer zonder nabeweiden, geen kunstmestgift
HH++	hooibeheer zonder nabeweiden, met kunstmestgift > 70 kg N/ha/jaar
HW-	hooibeheer met nabeweiden, geen kunstmestgift
KG+	klepel-gazonbeheer (elke 2-3 weken klepelmaaien zonder afvoer), met kunstmestgift
WW-	weidebeheer schapen, geen kunstmestgift
WW+	weidebeheer schapen met kunstmestgift < 70 kg N/ha/jaar

De grondeigenschappen zijn gekarakteriseerd door de volgende parameters:

- Erosiebestendigheidscategorie
- Plasticiteitindex
- Zandgehalte.

Voor de verschillende erosiebestendigheidscategoriën (c1, c2 en c3) volgens het VTV2006 [23] gelden de volgende voorwaarden:

c1 Erosiebestendig	$WI > 45\%$ én $I_p > 0,73 \cdot (WI - 20)\%$ én $Zk < 40\%$
c2 Matig erosiebestendig	$WI < 45\%$ én $I_p > 18\%$ én $Zk < 40\%$
c3 Weinig erosiebestendig	$I_p < 0,73 \cdot (WI - 20)\%$ en/of $I_p < 18\%$ en/of $Zk > 40\%$

Waarin:

WI = vloeigrens [%]

I_p = plasticiteitindex [%]

Zk = zandgehalte = massapercentage korrels met een diameter van 63 μ m tot 2 mm [%]

De plasticiteitsindex I_p (%) is het verschil in watergehalte van de grond tussen de uitrofgrens en de vloeigrens (WI).

ID	Beschrijving	Type	Tijd	Methode	Materiaal	Opmerkingen	Geometrie		Metingen		Resultaten		Status	Datum
							Breedte	Diepte	W1	W2	W1	W2		
B2	Start head cut erosie mechanisme	g	na 0,1; 1; 5; 3 uur 10					na vt	na vt	na vt	na vt	na vt	1	35
B4	5-10 cm oppervlakte erosie	g	na 0,1; 1; 5; 10					na vt	na vt	na vt	na vt	na vt	1	35
B6	Geen schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50					D	D	D	D	Slecht	1	35
B8	Na initiële schade aangebracht	g	na 50					D	D	D	D	Slecht	1	35
B9	Geen schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75					B	B	B	B	goed	3	6
B10	Geen schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75					A	A	A	A	goed	3	6
B11	Begin van schade (opbolmechanisme)	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 1 uur 75					A	A	A	A	goed	3	6
B12	Vrijwel bezwijken na opbolmechanisme	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75					A	A	A	A	goed	3	6
B13	Begin van schade (opbolmechanisme)	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5 uur 75					A	A	A	A	goed	3	6
B14	Bezwijken na opbolmechanisme	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5,45 uur 75					A	A	A	A	goed	3	6
B17	Begin schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 2 uur 50					B	B	B	B	goed	3	6
B18	Begin schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 2 uur 75					A	A	A	A	goed	3	6
B19	Begin schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50					A	A	A	A	goed	3	6
B20	Begin schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50					A	A	A	A	goed	3	6
B21	Begin schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50					A	A	A	A	goed	3	6
B22	Begin schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75					A	A	A	A	goed	3	6
B23	Begin schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50					A	A	A	A	goed	3	6
B24	Geen schade	g	na 0,1; 1; 10; 30; 50					A	A	A	A	goed	3	6
B25	Geen schade	g	na 30; 75; 125					na vt	na vt	na vt	na vt	na vt	3	10
B26	Geen schade	g	na 30; 75; 125					na vt	na vt	na vt	na vt	na vt	3	10
B27	Begin schade	g	na 1; 10; 30; 1 uur 50					B	B	B	B	matig	3	16
B28	Begin schade	g	na 1; 1; 15; 1 uur 10					B	B	B	B	matig	3	16
B29	Begin schade	g	na 1; 10; 2 uur 30					B	B	B	B	matig	3	16
B30	Meerdere locaties kale plekken	g	na 1; 10; 30; 4 uur 50					B	B	B	B	matig	3	16
B31	Meerdere locaties kale plekken	g	na 1; 10; 30					B	B	B	B	matig	3	16
B32	Meerdere locaties kale plekken	g	na 1; 10; 30; 50; 75					B	B	B	B	matig	3	16
B33	Niet bezwijken van talud	g	na 1; 10; 30; 50; 75					B	B	B	B	matig	3	16
B34	Begin schade	g	na 1; 10; 30					B	B	B	B	matig	3	16
B35	Begin schade	g	na 1; 10; 30					B	B	B	B	matig	3	16
B36	Begin schade	g	na 1; 10; 30					B	B	B	B	matig	3	16
B37	Begin schade	g	na 1; 10; 30					B	B	B	B	matig	3	16
B38	Begin schade	g	na 1; 10; 30					B	B	B	B	matig	3	16
B39	Erosiekuil 0,30 m diep	g	na 1; 10; 30; 50; 75					B	B	B	B	matig	3	16
B40	Erosiekuil door trap, 1,0 m diep	g	na 1; 10; 30; 50; 2 uur 75					B	B	B	B	matig	3	16
B41	Begin schade	g	na 1; 10; 3 uur 30					B	B	B	B	matig	3	16
B42	Begin schade	g	na 1; 10; 4 uur 30					B	B	B	B	matig	3	16
B43	Begin schade	g	na 1; 10; 30; 50; 1,44 uur 75					B	B	B	B	matig	3	16
B44	Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	g	na 0,1; 6:00 uur 1					A	A	A	A	goed	3	16
B45	Meerdere locaties kale plekken (")	g	na 0,1; 1; 5; 3:00 uur 10					A	A	A	A	goed	3	16
B46	Meerdere locaties kale plekken (")	g	na 0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50					A	A	A	A	goed	3	16
B47	Geen bezwijken talud na:	g	na 0,1; 1; 5; 4:00 uur 10					A	A	A	A	goed	3	16
B48	Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	g	na 0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30					A	A	A	A	goed	3	16
B49	Meerdere locaties kale plekken (")	g	na 0,1; 1; 5; 10; 30; 1:01 uur 50					A	A	A	A	goed	3	16
B50	Geen schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	g	na 0,1; 1; 10; 1:58 uur 30					A	A	A	A	goed	3	16
B51	Meerdere locaties kale plekken (")	g	na 0,1; 1; 10; 6:00 uur 30					A	A	A	A	goed	3	16
B52	Zand komt vrij (door de afdeklaag)	g	na 0,1; 1; 10; 30; 2:00 uur 50					A	A	A	A	goed	3	16
B53	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	g	na 0,1; 1; 10; 30; 2:07 uur 50					A	A	A	A	goed	3	16
B54	Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	g	na 0,1; 1; 2:00 uur 5					A	A	A	A	goed	3	16
B55	Meerdere locaties kale plekken (")	g	na 0,1; 1; 6:00 uur 5					A	A	A	A	goed	3	16
B56	Zand komt vrij (door de afdeklaag)	g	na 0,1; 1; 5; 6:00 uur 10					A	A	A	A	goed	3	16
B57	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	g	na 0,1; 1; 5; 10; 1:03 uur 30					A	A	A	A	goed	3	16
B58	Begin ondermijning overgang	g	na 0,1; 1; 5; 6:00 uur 10					A	A	A	A	goed	3	16
B59	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	g	na 0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50					A	A	A	A	goed	3	16
B60	Eerste wortel geodeerd	g	na 0,1; 1; 5; 4:00 uur 10					A	A	A	A	goed	3	16
B61	Grote erosie van wortels, zand zichtbaar	g	na 0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30					A	A	A	A	goed	3	16
B62	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	g	na 0,1; 1; 5; 10; 5:30 uur 30					A	A	A	A	goed	3	16

B65	Begin schade overgang kruin-talud	na 1; 10; 30; 50; alles 2 uur	4442	1360	285	11
B66	Kleine schade overgang kruin-talud	na 1; 10; 30; 50; alles 4 uur	8883	3172	578	22
B67	Uitbreiding schade aangebracht gat	na 1; 10; 30; 50; alles 2 uur	4442	1586	289	11
B69	Begin schade	na 1; 2 uur	460	0	0	0
B70	Meerdere kale plekken + zand	na 1; 10; 28 min 30; alles 2 uur	5898	100	11	0
B71	Bezwaken talud	na 1; 10; 40 min 30; alles 2 uur	6684	141	16	0
B72	Begin schade	na 1; 2 uur	460	0	0	0
B73	Meerdere kale plekken + zand	na 1; 1 uur 10; alles 2 uur	2262	3	0	0
B74	Bezwaken talud	na 1; 10; 0:21 uur 30; alles 2 uur	5440	330	9	0
B75	Begin schade	na 1; 1 uur 5; alles 2 uur	692	153	55	9
B76	Meerdere kale plekken + zand	na 1; 5; alles 2 uur	1205	490	272	100
B77	Bezwaken talud	na 1; 5; alles 2 uur; 3 uur 10	4133	1810	1062	434
B78	Begin schade open talud	na 1; 4:00 uur 10	5569	1510	645	152
B79	Meerdere plekken schade open talud	na 1; 10; 1:03 uur 30	11159	3490	1663	494
B81	Meerdere plekken schade langs trap	na 1; 1; 2 uur 5	812	153	48	4
B82	Bezwaken talud	na 1; 2:00 uur 5	2082	452	163	25
B83	Bezwaken trap	na 1; 4:00 uur 5	3352	751	279	47
B84	Volledig bezwaken trap en talud	na 1; 5; 2:26 uur 10	7515	1876	757	159
B86	Eerste schade talud	na 1; 2 uur 5	2082	452	163	25
B87-90	Meerdere plekken schade/verzakt	na 1; 2:20 uur 5	2293	502	182	29
B91	Bezwaken talud	na 1; 3:10 uur 5	2823	627	230	38
B92	Geen schade afrastering	na 1; 5; 10; 30; 0:40 uur 50	33202	12008	6307	2223
B93	Begin erosie paal 0,2x0,2 m	na 1; 5; 10; 1:30 uur 30	16345	4946	2317	673
B94	Einde proeferosie paal 0,2x0,2 m	na 1; 5; 10; 30; 0:40 uur 50	33202	12008	6307	2223
B95	Begin schade talud	na 1;	812	153	48	4
B96	Meerdere plekken schade talud	na 1; 4:00 uur 5	3352	751	279	47
B97/98	Zakking van het talud door zandverlies	na 1; 5; 10; 2:30 uur 30	19404	6186	3002	928
B99	Bezwaken talud	na 1; 5; 10 3:26 uur 30	20729	6723	3299	1038
B100	Meerdere plekken schade teen	na 1;	812	153	48	4
B101	Bezwaken teen	na 1; 5; 4 uur 10	9378	2408	992	217
B103	Begin schade talud	na Ru2% op bermniveau	Methode bij oploop nog niet toegepast			
B104	Meerdere plekken schade op talud	na Ru2% 0,8 m boven berm	Methode bij oploop nog niet toegepast			
B106/107	Schade na de proef	na Ru2% 2,4 m boven berm	Methode bij oploop nog niet toegepast			

de meest relevante gegevens van alle proeven met de golfoverslagsimulator, 2007-2011 (vervolg)

C Fotobijlage golfoverslagproeven



Foto B1. Delfzijl. Kale klei. Vooraf met kleine beschadigingen in het midden.



Foto B2. Delfzijl. Kale klei. Net voordat het rechtse gat zich ontwikkelt tot head cut erosie.



Foto B3. Delfzijl. Kale klei. Ontwikkeling van head cut erosie bij het rechtse gat.



Foto B4. Delfzijl. Kale klei. Vrijwel aan het eind van de proef; 5-10 cm oppervlakte erosie.



Foto B5. Delfzijl. Kale klei. Na de proef.



Foto B6. Delfzijl. Grastalud. Voor (links) en na de proef (rechts).



Foto B7 Delfzijl. Grastalud. Initiële schade aangebracht op het talud.



Foto B8. Delfzijl. Grastalud. Afstropen van het gras beneden de initiële schade. Links grastalud, rechts met geotextiel versterkt.



Foto B9. Boonweg. Sectie 1. Na de proef, geen schade aan het talud wel aan de teen

Foto B10. Boonweg. Sectie 2. Na de proef, geen schade aan het talud wel aan de teen.



Foto B11. Boonweg. Sectie 3. Na de proef, schade aan het talud en aan de teen.



Foto B12. Boonweg. Sectie 4. Begin van schade (opbolmechanisme) aan het talud.



Foto B13. Boonweg, Friesland, sectie 4. Direct nadat de eerste opbolling was weggespoeld.



Foto B14. Boonweg, Friesland; sectie 4. Direct na het wegslaan van de eerste opbolling ontstond een tweede opbolling. Deze "lekte" water.



Foto B15. Boonweg, Friesland; sectie 4. Wegslaan van de tweede opbolling.



Foto B16. Boonweg, Friesland; sectie 4. Ontwikkeling head cut erosie.



Foto B17. Boonweg. Sectie 4. Na de proef, bezwaken talud en geen schade aan de teen.



Foto B18. St Philipsland. Begin van schade aan het talud (twee plekken)



Foto B19. St Philipsland. Talud bezweken en ook de reeds afgedekte teen.



Foto B20. Kattendijke, Zeeland, sectie 1. Talud vol met mollengaten.



Foto B21. Kattendijke. Sectie 1. Schade aan teen voordat meetwagen moest worden verplaatst.



Foto B22. Kattendijke. Sectie 1. Aan het einde van de proef. Geen schade aan het talud, bezwijken van teen met onderhoudsweg, leidende tot headcut erosie op het talud.



Foto B23. Kattendijke. Sectie 2. Initiële schade door mestinjecteur op benedentalud.



Foto B24. Kattendijke. Sectie 2. Benedentalud met teen, na de proef. De onderhoudsweg was afgedekt en kon niet worden beschadigd.



Foto B25. Kattendijke. Elastocoast. Proef met 125 l/s per m. Identiek aan open asfaltbeton.



Foto B26. Afsluitdijk. Sectie 1. Begin van schade aan teen.



Foto B27. Afsluitdijk. Sectie 1. Begin van schade aan het talud.



Foto B28. Afsluitdijk. Sectie 1. Meerdere kale plekken op talud en gras verdwenen bij teen.



Foto B29. Afsluitdijk. Sectie 1. Erosie van de teen 0,30 m diep; talud wel kaal, maar niet bezweken.



Foto B30. Afsluitdijk. Sectie 2. Grotere/meerdere kale plekken op talud. Begin schade teen.



Foto B31. Afsluitdijk. Sectie 2. Bezwijken van de klinkerbestrating op zand.



Foto B32. Afsluitdijk. Sectie 3. Begin van schade aan de teen.



Foto B33. Afsluitdijk. Sectie 3. Meerdere/grotere kale plekken op het talud.



Foto B34. Afsluitdijk. Sectie 3. Bezwijken van de trap.



Foto B35. Afsluitdijk. Sectie 3. Erosiekuilen, 1,0 m diep door stroomconcentratie langs de trap.



Foto B36. Vechtdijk. Zeeregime met overgang, proef 1; Vooraf.



Foto B37. Vechtdijk. Zeeregime met dijkoevergang, proef 1; Eerste schade talud.

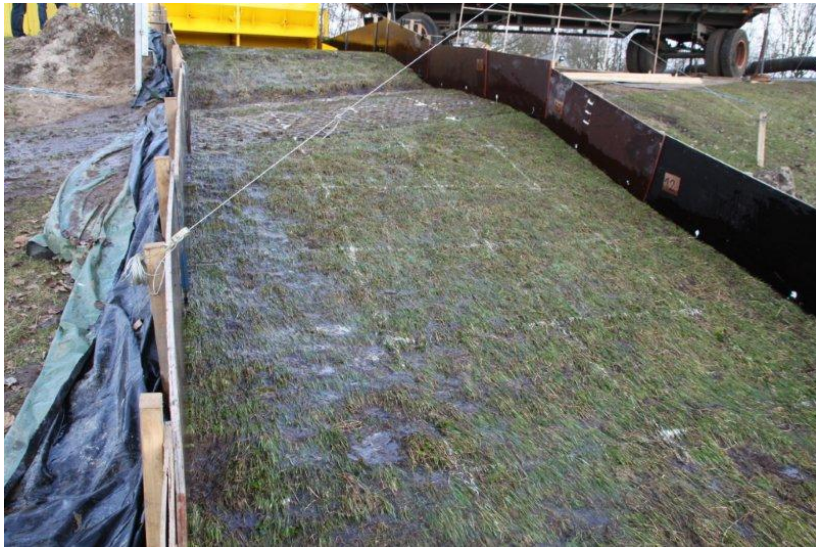


Foto B38. Vechtdijk. Zeeregime met dijkovergang, proef 1; Meerdere locaties kale plekken talud.



Foto B39. Vechtdijk. Zeeregime met dijkovergang, proef 1; Talud na de proef niet bezweken.



Foto B40. Vechtdijk. Zeeregime met dijkovergang, proef 1; Begin ondermijning van de overgang.



Foto B41. Vechtdijk. Zeeregime met dijkovergang, proef 1; Proef gestopt, overgang bezwaken.



Foto B42. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Vooraf.



Foto B43. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Eerste schade aan talud.



Foto B44. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Meerdere kale plekken talud.



Foto B45. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Gestopt, talud niet bezwiken.



Foto B46. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Eerste boomwortel geërodeerd.



Foto B47. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Grote erosie boomwortels, zand komt vrij.



Foto B48. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Gestopt, headcut erosie bovenstrooms van boom.



Foto B49. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Vooraf.



Foto B50. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Eerste schade talud.



Foto B51. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Meerdere kale plekken talud.



Foto B52. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Zand komt vrij door afdeklaag.



Foto B53. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Zand komt vrij door afdeklaag.



Foto B54. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Gestopt, talud bezweken.



Foto B55. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Vooraf



Foto B56. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Eerste schade



Foto B57. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Meerdere kale plekken.



Foto B58. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Meerdere kale plekken.



Foto B59. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Zand komt vrij door afdeklaag.



Foto B60. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Gestopt, bezweken talud.



Foto B61. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Vooraf.



Foto B62. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Na de metingen.



Foto B63. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Na de metingen.



Foto B64. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Na de metingen.



Figuur B65. Tielrode, België. Durmedijk. Na eerste serie. Begin schade overgang asfaltkruin naar gras. Geen schade aan talud of boom.



Figuur B66. Tielrode, België. Durmedijk. Na alle series. Geringe uitbreiding schade overgang asfaltkruin naar gras. Geen schade aan talud of boom.



Figuur B67. Tielrode, België. Durmedijk. Na alle series. Geringe uitbreiding aangebrachte schade van 0,32x0,32 m en 0,02 m diep.



Tabel B68. Tielrode België. Talud met ruigtebegroeiing voor secties 1, 2 en 4. Geen onderhoud.



Figuur B69. Tielrode, België. Sectie 1. Begin van schade.



Figuur B70. Tielrode, België. Sectie 1. Meerdere plekken schade en twee zandvoerende openingen.



Figuur B71. Tielrode, België. Sectie 1. Bezweken talud.



Figuur B72. Tielrode, België. Sectie 2. Begin van schade.



Figuur B73. Tielrode, België. Sectie 2. Meerdere plekken schade.



Figuur B74. Tielrode, België. Sectie 2. Bezweken talud.



Figuur B75. Tielrode, België. Sectie 4. Begin schade.



Figuur B76. Tielrode, België. Sectie 4. Meerdere plekken schade.



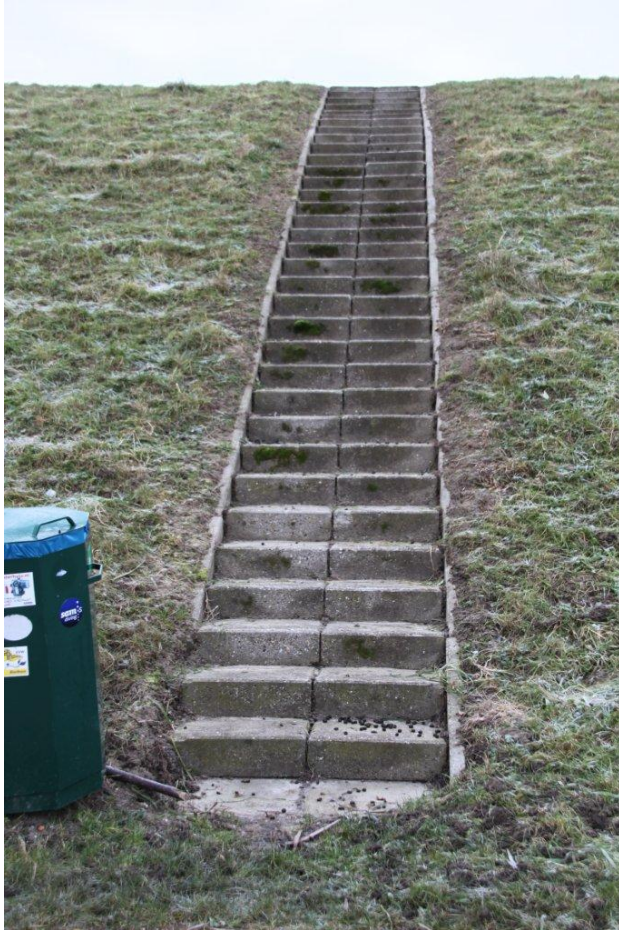
Figuur B77. Tielrode, België. Sectie 4. Bezweken talud.



Figuur B78. Tholen. Sectie, buitentalud. Begin van schade open deel.



Figuur B79. Tholen. Sectie, buitentalud. Ondermijning en opdrukken asfaltberm. Einde proef. Eveneens meerder plekken schade aan open talud.



Figuur B80. Tholen. Sectie 2, trap. Vooraf.



Figuur B81. Tholen. Sectie 2, trap. Meerdere plekken schade langs de trap.



Figuur B82. Tholen. Sectie 2, trap. Bezweken talud.



Figuur B83. Tholen. Sectie 2, trap. Bezweken trap.



Figuur B84. Tholen. Sectie 2, trap. Volledig bezweken trap en talud.



Figuur B85. Tholen. Sectie 3, afrastering. Talud met afrastering, vooraf.



Figuur B86. Tholen. Sectie 3, afrastering. Eerste schade, onderaan talud en op overgang.



Figuur B87. Tholen. Sectie 3, afrastering. Meerdere plekken schade aan talud.



Figuur B88. Tholen. Sectie 3, afrastering. Verzakking van het talud (rechts).



Figuur B89. Tholen. Sectie 3, afrastering. Zandmeevoerende wellen.



Figuur B90. Tholen. Sectie 3, afrastering. Opbolmechanisme. Bol wordt gevuld door zand.



Figuur B91. Tholen. Sectie 3, afrastering. Bezweken talud.



Figuur B92. Tholen. Sectie 3, afrastering. Geen schade aan afrastering door aflopend water.



Figuur B93. Tholen. Sectie 3, afrastering. Begin erosie rondom paal 0,2x0,2 m.



Figuur B94. Tholen. Sectie 3, afrastering. Einde proef, erosie rondom paal 0,2x0,2 m. Diepte: 0,65 m.



Figuur B95. Tholen, sectie 4, binnentalud. Begin schade talud.



Figuur B96. Tholen, sectie 4, binnentalud. Meerder plekken schade talud.



Figuur B97. Tholen, sectie 4, binnentalud. Verzakking talud.



Figuur B98. Tholen, sectie 4, binnentalud. Verzakking talud veroorzaakt door zandmeevoerende wel.



Figuur B99. Tholen, sectie 4, binnentalud. Bezweken talud (en teen - onderaan).



Figuur B100. Tholen, sectie 4, binnentalud. Meerdere plekken schade aan de teen.



Figuur B101. Tholen, sectie 4, binnentalud. Bezweken teen.



Figuur B102. Tholen, sectie A, oploop buitentalud. Vooraf.



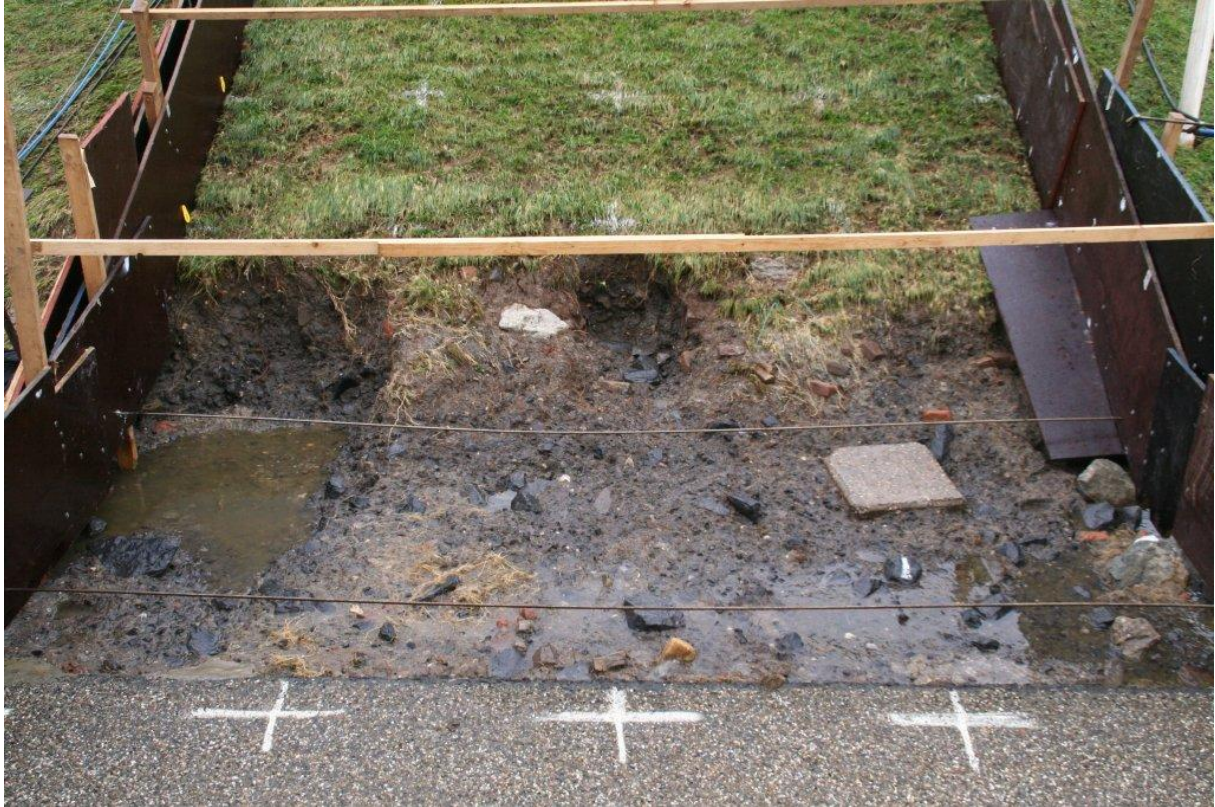
Figuur B103. Tholen, sectie A, oploop buitentalud. Na Ru_{2%} op bermniveau.



Figuur B104. Tholen, sectie A, oploop buitentalud. Na $Ru_{2\%}$ op 0,8 m boven bermniveau.



Figuur B105. Tholen, sectie A, oploop buitentalud. Na $Ru_{2\%}$ op 1,6 m boven bermniveau.



Figuur B106. Tholen, sectie A, oploop buitentalud. Einde proef, na $Ru_{2\%}$ op 2,4 m boven bermniveau.



Figuur B107. Tholen, sectie A, oploop buitentalud. Einde proef, na $Ru_{2\%}$ op 2,4 m boven bermniveau.

D Validatie cumulatieve overslagbelasting met uitgevoerde proeven

Bij het begin van de proeven met de golfoverslagsimulator in 2007 is er voor gekozen om eerst van een "karakteristieke" toetsconditie voor zee- en meerdijken uit te gaan, met een golfhoogte van 2 m. Ook bij de proeven in 2008 en 2009 is deze conditie aangehouden. Met deze proeven is de theorie van de vorige paragraaf lastig te valideren, omdat er maar één golfhoogte is onderzocht. In 2010 zijn bij de Vechtdijk echter proeven uitgevoerd met als randvoorwaarden golfhoogten van 1 m (rivierdijk); 2 m (zeedijk) en 3 m (extreme golfconditie op zee). Uit vergelijking van de resultaten kon de theorie van cumulatieve overbelastingen wel worden gefundeerd. Met name de kritische snelheid kon worden vastgesteld.

De Vechtdijk was een volledige zanddijk met daarop een 0,15 - 0,20 m laag doorworteld zand met gras. De normale grasbekleding met circa een 0,6 m dikke erosiebestendige onderlaag van klei ontbrak en deze dijk mag daarom als zeer zwak worden beschouwd ten opzichte van normale zee- en meerdijken (en mogelijk ook rivierdijken). Bij deze dijk was het dan ook zinvol om een golfconditie met 1 m golfhoogte te beproeven, omdat daarbij schade was te verwachten.

Bij de golfconditie van 2 m werd een proef uitgevoerd met een taludovergang en een proef met een grote boom op het binnentalud. Zowel de taludovergang als de bekleding rondom de boom bezweken eerder dan het grastalud. Bij deze proeven is het grastalud dan ook niet bezweken. Bij de proeven met 1 m en 3 m golfhoogte is het grastalud wel bezweken en kon de theorie van cumulatieve golfverbelasting worden geanalyseerd. In beide proeven zaten er bovenaan het binnentalud veel mollengaten en hierdoor is mogelijk het talud eerder bezweken dan bij de proeven met een 2 m golfhoogte, waar dit minder het geval was.

De analyse van de proeven bracht ook aan het licht dat er meerdere definities van schade nodig zijn en dat de cumulatieve overbelasting vaak moet toenemen om de schade te laten toenemen. De eerste definitie is "begin van schade". Dit is een klein gat in de zode, die nog niet door de toplaag heen gaat. Het is niet een erg betrouwbare definitie, want er hoeft maar één zwak plekje op het talud te zijn en begin van schade ontstaat al vrij vroeg. Een meer betrouwbare definitie is "meerdere kale plekken". Eigenlijk is dit begin van schade, maar dan wel hier en daar op het talud en niet toevallig op de zwakste plek alleen. Als de toplaag bezwijkt dan houdt de onderlaag het ook vaak niet lang meer, omdat daar nauwelijks wortels in zitten en omdat kale klei een grote overbelasting niet lang aan kan. Bij de Vechtdijk was er alleen maar een toplaag, dus als deze was bezweken dan kwam direct het zand eronder vrij. Dit werd "bezwijken talud" genoemd. Bij de proeven met 2 m golfhoogte kon de sterkte van de grasbekleding niet worden vastgesteld, omdat de taludovergang, respectievelijk de toplaag rondom de boom (als gevolg van de aanwezigheid van de boom) op het binnentalud, eerder bezweken. Maar daardoor is er wel een cumulatieve belasting waarvoor geldt "niet bezwijken van het talud".

Bij elke proef werd een golfoverslagdebiet opgelegd voor 6 uur. Daarna werd het overslagdebiet verhoogd voor opnieuw 6 uur. De gemiddeld overslagdebieten waren achtereenvolgens 0,1; 1; 10; 30 en 50 l/s per m. Het talud bij het rivierregime (1 m golfhoogte) bezweek na 2 uur bij 50 l/s per m. Bij het zeer zware zeeregime (golfhoogte 3 m) was dit al na 1 uur bij 30 l/s per m. Het zwaardere golfregime leidde dus eerder tot schade, wat ook de verwachting was.

Voor de Vechtdijk werd vastgesteld dat een kritische snelheid van 4 m/s moest worden aangehouden om de resultaten van de verschillende golfregimes met elkaar vergelijkbaar te maken. Voor de Vechtdijk zijn globaal de volgende cumulatieve belastingen verantwoordelijk voor de volgende schadecriteria ($u_c = 4$ m/s):

Begin van schade	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Meerdere kale plekken	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Vroeg bezwijken door mollengaten	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Niet bezwijken bij "normaal" talud	$\Sigma(u^2 - u_c^2) < 6000 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Omdat de volledig uit zand bestaande Vechtdijk met veel mollengangen waarschijnlijk tot een van de minst erosiebestendige dijken van Nederland behoort, maar wel onder de voorwaarde van een goede op het oog gesloten grasmat, is de kritische snelheid van 4 m/s als ondergrens genomen in Tabel 6.1. Bij de taludovergang ontstaat dan ondermijning bij $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1296 \text{ m}^2/\text{s}^2$, wat dicht in de buurt zit van het schadecriterium "meerdere kale plekken". Die kale plekken hielden het echter langer vol dan de taludovergang, want deze bezweek bij $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 5926 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Dit is echter hoger dan de cumulatieve belasting bij bezwijken van het grastalud als er een concentratie aan mollen zit.

Bij de proef met de boom was er duidelijk een wortel geërodeerd bij $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 997 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en dit komt precies overeen met meerdere kale plekken op het talud. Zand werd zichtbaar bij $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 2665 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en als het gat rondom de boom niet met doek was afgedekt, dan was dit ook ongeveer de bezwijkbelasting. Deze komt dan goed overeen met de bezwijkbelasting voor de taluds met een geconcentreerde locatie met mollengaten.

Bij de Vechtdijk zijn op een aparte sectie van de dijk hydraulische metingen uitgevoerd, waarbij snelheden, laagdikten, overslagduren en luchtinsluitingen werden gemeten. Hierbij ging het dus niet om het gedrag van het talud, maar alleen om de metingen. Bij de hydraulische metingen is de simulatie van golfoverslag volkomen anders uitgevoerd dan bij de normale proeven. Bij de normale proeven is steeds gedurende zes uur een gemiddeld golfoverslagdebiet gesimuleerd door de daarbij behorende overslaande golfvolumes in willekeurige volgorde over het talud los te laten. Bij de hydraulische metingen is maar een relatief klein aantal overslaande golfvolumes los gelaten en dan ook nog steeds in toenemende grootte. In totaal zijn maar 40 overslaande golfvolumes losgelaten, oplopend van 200 l/s per m naar 5500 l/s per m.

Als het idee van cumulatieve overbelasting werkt, zou het ook bij deze serie van hydraulische metingen moeten werken. Voor en na de hydraulische metingen zijn foto's gemaakt. Na de hydraulische metingen waren over het talud meerdere (kleine) kale plekken te zien en was onderaan het talud een wat grotere plek ontstaan. De foto's passen het best bij het schadecriterium "meerdere kale plekken op het talud".

De cumulatieve overbelasting bij de hydraulische metingen, met $u_c = 4$ m/s, bedroeg $964 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Dit is vrijwel dezelfde belasting die gevonden is voor meerdere kale plekken met $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$. De schade bij deze erg korte meetsessie, met wel een aantal grote overslaande golfvolumes, kan dus goed worden vergeleken met de schade bij de andere proeven, waar gedurende lange tijd een bepaald overslagdebiet is aangehouden. Daarmee is dit een eerste validatie van het concept van cumulatieve overbelasting.

Het traject van begin van schade naar bezwijken kan echter aanzienlijk verschillen. Bij de proeven op de Boonweg (2008) ontstond er tot een groot overslagdebiet van 75 l/s per m geen enkele schade aan het talud. Bij twee van de vier proeven ontstond bij dit overslagdebiet wel een eerste schade en deze leidde binnen korte tijd tot bezwijken van het talud. Begin van schade en bezwijken zaten hier heel dicht bij elkaar. Op de Afsluitdijk (2009) stroopte het gras gemakkelijk van het talud. Begin van schade werd hier dan ook bij een laag overslagdebiet al geconstateerd (soms al bij 10 l/s per m). Maar de resterende toplaag met wortels was zeer erosiebestendig en het talud kon gemakkelijk het overslagdebiet van 75 l/s per m aan en is niet bezwijken.

Deze voorbeelden tonen aan dat begin van schade niet een geschikt criterium is voor ontwerp of toetsing. Veel meer moet worden gekeken naar wanneer de grasbekleding als geheel, inclusief de toplaag van de grasbekleding, bezwijkt. Een eerste analyse van alle uitgevoerde proeven met de theorie van cumulatieve overbelasting en vastgestelde kritische snelheid voor de Vechtdijk van 4 m/s, heeft een voorlopig totaalbeeld gegeven.

Globaal zouden we op basis van de analyse kunnen zeggen dat bezwijken van een talud optreedt bij een cumulatieve belasting van $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Dit is een enigszins conservatieve schatting. De volgende kritische snelheden gelden dan voor de onderzochte dijken (met tussen haakjes het kritische overslaande golfvolume):

Delfzijl:	6.3 m/s ($2 \text{ m}^3/\text{m}$) - aanname dat het talud meer dan 50 l/s per m kon hebben
Boonweg:	6.3 m/s ($2 \text{ m}^3/\text{m}$)
St Philipsland:	5 m/s ($1 \text{ m}^3/\text{m}$)
Kattendijke:	6.3 m/s ($2 \text{ m}^3/\text{m}$)
Afsluitdijk:	> 6.3 m/s ($> 2 \text{ m}^3/\text{m}$)
Vechtdijk:	4 m/s ($0,5 \text{ m}^3/\text{m}$)

In de periode dat deze handreiking werd geschreven zijn verdere proeven uitgevoerd in België (bij Tielrode, ten zuiden van Antwerpen, aan de Schelde) en ook op Tholen. In beide gevallen zijn daar dijksecties onderzocht die veel eerder bezwijken dan bij de onderzoeken in al de jaren daarvoor, zoals boven omschreven. Zie ook de Bijlage B met foto's en overzichtstabel. In de onderzochte gevallen was sprake van een zeer slechte grasmat, zoals ruigtebegroeiing (België, geen enkel grasbeheer) of zeer intensief beweide grasland (erg kaal, veel mos) of maaibeheer dat resulteerde in veel open plekken zonder gras of wortels (Tholen). Eigenlijk was geen grasmat aanwezig die enige bescherming bood tegen erosie door overslaande golven. Bij aanvang van de proeven in België was snelle schade en bezwijken wel verwacht, mede omdat de ondergrond niet uit klei maar uit leemhoudend zand bestond. Samen met de ruigtebegroeiing was wel ingeschat dat dit geen sterke dijk zou zijn.

Bij Tholen was dit in eerste instantie niet ingeschat. Pas na afloop van de proeven en met het gereed komen van het grasonderzoek (uitsluitend "slecht gras", zie ook de overzichtstabel in de Bijlage B) werd duidelijk dat deze grasmat nauwelijks enige bescherming bood tegen erosie door golfoverslag. Eerste schade ontstond vaak al bij 1 l/s per m overslag en bezwijken van het talud bij 5-30 l/s per m. De cumulatieve overbelasting is veel kleiner dan $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$, bij aanname van de laagst te hanteren kritische snelheid van 4 m/s (overzichtstabel Bijlage B).

De onderzoeken in België en Tholen zijn momenteel wel in een factueel report beschreven, maar nog niet in detail geanalyseerd, zoals voor eerdere onderzoeken wel is gedaan. Het is wel duidelijk geworden dat de beoordeling van de grasbekleding essentieel is en dat er grote

verschillen zijn tussen de erosiebestendigheid van een goede grasbekleding en een slechte grasbekleding. Een tussenvorm, zoals bijvoorbeeld aangehouden in [23] ('matige graszode') lijkt niet aan de orde. Een goede grasbekleding is een op het oog gesloten grasmat, zonder grote (0,15 m x 0,15 m) open plekken. Een slechte grasbekleding is een bekleding die hier niet aan voldoet. Een goede grasbekleding geeft een grote sterkte tegen golfoverslag, een slechte nauwelijks. Er is nog wel onderscheid in de sterkte van de grasbekleding als er een goede graszode aanwezig is, zie de verschillende kritische snelheden die bovenstaand zijn gevonden, maar deze hangt niet alleen af van de graszode zelf, maar ook van de ondergrond. Momenteel is nog niet direct te voorspellen wat de werkelijke kritische snelheid voor een bepaald talud zal zijn en hier is meer onderzoek voor nodig. Wat niet betekent dat de methode van cumulatieve overbelasting niet kan worden gebruikt, zie Paragraaf 6.2.6.

De recente proeven hebben aangetoond dat er grasbekledingen zijn waarbij de grasmat geen of nauwelijks sterkte geeft tegen erosie door golfoverslag. Dit betekent dat de methode van cumulatieve belasting hier ook niet moet worden toegepast, ook niet met een erg lage waarde voor de kritische snelheid. Bij dit soort grasbekledingen moet gesteld worden dat er niet of nauwelijks golfoverslag in maatgevende omstandigheden mag worden toegelaten. De toetsing is hier inmiddels ook op ingericht (zie paragraaf 7.5).

De overslagproeven met de golfoverslagsimulator in de jaren 2007-2011 hebben veel resultaat en inzicht opgeleverd omtrent sterkte van een op het oog gesloten grasbekleding op kruin en binnentalud van dijken bij golfoverslag. De snelheden in overslaande golven zijn belangrijk en deze kunnen bij gegeven golf- en overslagcondities worden berekend. De grote vraag bij het toepassen van de methode van cumulatieve golfoverbelasting is echter: wat is de kritische snelheid die voor de dijk moet worden aangehouden?

Ten eerste geldt dat deze kritische snelheid moet worden gebaseerd op de te verwachten sterkte van de toplaag, dus van de eerste 0,2 m bestaande uit de graszode en rest van de doorwortelde toplaag. Het gaat dus niet om begin van schade aan het grastalud en ook niet om schade op meerdere plekken op het talud, maar om bezwijken van de toplaag. Een toplaag blijkt erg erosiebestendig te kunnen zijn, zelfs als deze uit zand bestaat, wat zonder meer is aangetoond bij de proeven op de Vechtdijk. Het vaststellen of de toplaag gecementeerd is (zie paragraaf 3.3.1), zou daarbij een sterke aanwijzing kunnen geven. Ook de doorwortelde toplaag van de Afsluitdijk was veel erosiebestendiger dan aangenomen mocht worden op basis van de kleikwaliteit. Ook hier zou cementatie een rol gespeeld kunnen hebben. Bij de proeven in België en bij Poortvliet, Tholen, ontbrak een goede (op het oog gesloten) grasbekleding. Vroeg bezwijken was het gevolg.

Bijlage B geeft in de samenvattende tabel een overzicht van gras- en kleibeoordeling bij de verschillende uitgevoerde onderzoeken. De doorworteling en bedekking bij Delfzijl was volgens de vigerende leidraden slecht. Die bij de Boonweg goed. Bij Delfzijl was erosiebestendige klei met een laag zandgehalte aanwezig, bij de Boonweg juist een erosiegevoelige klei met veel zand. Kattendijke kwam vrijwel met de Boonweg overeen, met iets minder zand in de klei. Geen van allen gaven schade. Het is niet voor de hand liggend wat de doorslag geeft.

Bij St Philipsland kwamen doorworteling en kleikwaliteit overeen met Kattendijke en vrijwel met de Boonweg. Alleen was de bedekking bij St Philipsland erg laag (het laagste van alle proeven tot en met 2010). Dit talud bezweek bij een cumulatieve belasting van $5400 \text{ m}^2/\text{s}^2$ als een overslaand kritische snelheid van 5 m/s wordt aangehouden. Wat betreft bezwijken was

St Philipsland, de Vechtdijk niet meegerekend, toen de zwakste dijk. De meest in het oog springende afwijkende eigenschap van het talud was de grasbedekking, waarmee de grasbedekking wel eens een rol zou kunnen hebben in het bepalen van een kritische snelheid.

E Kwaliteit graszode voor erosiemodel in golfoploopzone [23]

Er zijn drie methodes voor de bepaling van de zodenkwaliteit: op basis van het beheertype, de vegetatiesamenstelling of de doorworteling. Deze drie methodes worden achtereenvolgens besproken.

B1.1 Bepaling zodenkwaliteit op basis van beheertype

De sterkte wordt bepaald door de kwaliteit van de zode en de erosiebestendigheid van de klei. De zodendichtheid en de worteldichtheid worden direct beïnvloed door het graslandbeheer. Het beheer is gericht op een in waterstaatkundig opzicht voldoende gesloten en doorwortelde grasmat. Op basis van een vegetatieonderzoek is een onderverdeling gemaakt in beheervormen. Deze zijn met hun hoofdkenmerken gespecificeerd in Tabel 8 - B1.1. Hierbij zijn de hoogte van de mestgift en de mate van onderhoud (maai- en afvoerregiem) cruciaal. De tabel geeft samenvattende informatie met betrekking tot de kwaliteit van de grasmat als functie van de beheervorm, zodendichtheid en worteldichtheid.

De praktijk wijst uit dat met name dijkhellingen op het noorden vatbaar zijn voor mosgroei, waardoor de werkelijke zodenkwaliteit aanmerkelijk ongunstiger kan zijn dan uit het beheertype zou volgen. Voor dergelijke taluds wordt aanbevolen om de zodenkwaliteit te bepalen op basis van de doorworteling (zie § B1.3).

Ter nadere toelichting op Tabel 8 - B1.1 geldt het volgende:

Categorie A

Kenmerkend voor categorie A is dat bemesting en gebruik van herbiciden achterwege blijven. Dit beheer leidt tot goed erosiebestendige grasbekledingen.

Hooien

Dit houdt in principe in dat twee keer per jaar wordt gemaaid. In voedselarme situaties kan worden volstaan met jaarlijks éénmaal maaien; deze situatie kan ontstaan als gevolg van jarenlang consequent hooibeheer. In voedselrijke situaties (bijvoorbeeld door jarenlang intensief agrarisch beheer) of enkele jaren na aanleg kan driemaal per jaar maaien nodig zijn. Kenmerkend voor hooien is dat na iedere keer maaien het maaisel steeds wordt afgevoerd.

Beweiden

Dit houdt in dat periodiek of continu wordt beweid met schapen. De hoeveelheid schapen is steeds afgestemd op de productie van het gras. Bij continu beweiden wordt het gehele groeiseizoen (van half april tot half oktober) beweid met een lage veedichtheid. Daarnaast moet worden gemaaid op plaatsen waar de vegetatie niet is afgegraasd. Bij periodiek beweiden wordt in het voorjaar gehooid en in het najaar beweid. Een andere manier is twee tot vier maal per jaar periodiek en intensief te beweiden. Eventueel onbegraasde delen moeten worden gemaaid. Bijvoeren heeft vergelijkbare effecten als bemesten en wordt daarom achterwege gelaten.

Tabel 8 - B1.1
Kenmerken beheertypes grasland

Toegepast type graslandbeheer	Enkele kenmerken van de zodendichtheid		Resulterende kwaliteit van de zode
	Bedekking	Doorworteling	
Hooien zonder bemesting (A)	> 70%	veel dikke en dunne wortels in laag 0 - 0,15 m	Goed
Beweiding (B) Bemesting max. 70 kg N/ha of 7 - 8 x maaien zonder bemesting (gazonbeheer)	> 85%	veel dunne wortels in laag 0 - 0,08 m	Matig
Beweiding (C) Bemesting > 70 kg N/ha; herbiciden	>85%	weinig dunne wortels in laag 0 - 0,05 m	Slecht
Hooien (D) Met bemesting; of maaien zonder afvoer	< 60%	enkele dikke wortels in laag 0 - 0,15 m	Slecht

kg N = massa nitraat

A, B, C en D zijn beheersclassificaties voor de kwaliteit van de grasmatt:

- (A) hoort bij waterstaatkundig of natuurtechnisch beheer.
- (B) hoort bij aangepast (extensief) agrarisch beheer.
- (C) hoort bij intensief agrarisch beheer of bij regelmatig en intensief belopen.
- (D) hoort bij maaien zonder afvoer of slecht onderhoud.

Categorie B

Tot categorie B behoort aangepast agrarisch beheer. Dit leidt tot matig erosiebestendige grasbekledingen. Het beheer bestaat uit beweiding met schapen, continu of periodiek. Er wordt lichte bemesting (tot 70 kg N per jaar) toegepast. Het verschil met beheercategorie A is deze bemesting en de daarmee samenhangende grotere veedichtheden. In deze categorie hoort ook gazonbeheer thuis. Dat is een beheer dat bestaat uit jaarlijks 7 tot 12 keer maaien, waarbij het maaisel niet wordt afgevoerd. Hier blijft bemesting achterwege. Gazonbeheer leidt tot soortenarme beemdgras-raaigrasweide.

Categorie C

Beheercategorie C leidt tot grasmattkwaliteit slecht. Hieronder vallen intensieve agrarische beheervormen (beweiding), gekenmerkt door vrij zware bemesting. Het resultaat is een slecht tot matig erosiebestendige grasbekleding. Dat betekent dat de erosiebestendigheid (deels) moet worden ontleend aan de grond in en onder de zode.

Categorie D

Zeer slecht erosiebestendige bekledingen ontstaan bij het achterwege blijven van jaarlijks beheer, bij jaarlijks één- tot viermaal (klepel)maaien zonder afvoer van het maaisel, bij beweiding met runderen en paarden en bij zeer zware bemesting en overbeweiding. Deze vormen van beheer zijn niet geschikt voor

waterkerende dijken.

B1.2 Bepaling zodenkwaliteit op basis van vegetatiesamenstelling

Als het beheertype niet duidelijk is of als de beheerder een afwijkende kwaliteit van de grasbekleding verwacht, dan moet de kwaliteit van de graszode worden vastgesteld aan de hand van de vegetatiesamenstelling.

Ook hier wordt opgemerkt dat met name dijkellingen op het noorden vatbaar zijn voor mosgroei, en dat voor dergelijke taluds wordt aanbevolen om de zodenkwaliteit te bepalen op basis van de doorworteling (zie § B1.3).

Eerst wordt via de soortensamenstelling van de grasmat het vegetatietype bepaald. Gezien de sterke koppeling tussen vegetatie en beheer kan aan de hand van de soortensamenstelling het gevoerde type beheer worden bepaald, en zoals besproken in § B1.1 van deze Bijlage volgt daaruit een eerste schatting van de zodenkwaliteit.

De eerste schatting van de zodenkwaliteit wordt vervolgens nog gecheckt aan de actuele bedekkinggraad en, indien gewenst voor opwaardering van de toetsscore, de aanwezige worteldichtheid (zie § B1.3).

Het bepalen van de effecten van de wijze van beheren van een grasmat is eigenlijk een continu volproces. Voor een correcte vergelijking van resultaten is echter de keuze van het tijdstip van de monitoring belangrijk, omdat de sterkte van de grasmat varieert door het jaar heen. De meest geschikte periode voor vegetatieopname is mei/juni vanwege de herkenbaarheid van de vegetatie.

De eerste schatting van de kwaliteit van de graszode gebeurt met behulp van Tabel 8 - B1.2. Het vegetatietype staat in de linkerkolom, het bijbehorende beheertype daarnaast en de eerste schatting van de zodenkwaliteit uiterst rechts. De tussenvolgende kolommen 'bedekking' en 'worteldichtheid' zijn informatief.

De bedekkinggraad is nog van invloed op de zodenkwaliteit uit Tabel 8 - B1.2:

- voor W2 en H2 geldt:
 - als de bedekking < 70%, dan is de kwaliteit van de graszode 'matig';
 - als de bedekking > 70%, dan is de kwaliteit van de graszode 'slecht';
- voor W3 en H3 geldt:
 - als de bedekking > 70%, dan is de kwaliteit van de graszode 'goed';
 - als de bedekking < 70%, dan is de kwaliteit van de graszode 'slecht'.

Voor de overige soorten geldt geen aanpassing van de zodenkwaliteit op grond van de bedekkinggraad. Wanneer de nu resulterende zodenkwaliteit 'slecht' of 'matig' is of wanneer de aanwezige vegetatie niet in één van de beschreven categorieën past, kan worden vervolgd met het beoordelen van de doorworteling.

B1.3 Bepaling zodenkwaliteit op basis van doorworteling

De werkelijk aanwezige worteldichtheid kan reden zijn om een zodenkwaliteit 'slecht' of 'matig' op te waarderen. Aangezien de doorworteling gerelateerd is

aan het vegetatietype zal het meten van de doorworteling echter de score zelden verbeteren. Een mogelijke uitzondering hierop is de zode onder bomen, waar de grasmat weliswaar verzwakt kan zijn door beschaduwing maar de worteldichtheid wordt verhoogd door het wortelstelsel van de boom.

Tabel 8 - B1.2

Dijkgraslandtypes in relatie tot het beheer

Vegetatietype	Beheertype	Bedekking	Wortel- dichtheid	Kwaliteit graszode
<p>• P: Pioniervegetatie (< 4 jaar) Soortenarme pioniergemeenschap op pas ingezaaide dijken. <u>Kenmerkende soorten:</u> Kweek, Engels raaigras, Straatgras, Herderstaasje, Akkerdistel, Echte Kamille, Krulzuring, Vogelmuur, Witte klaver, Klein kruiskruid</p>	D	Matig/ slecht	Slecht	Slecht
<p>Weiland</p> <p>• W1: Beemdgras-raaigrasweide Soortenarm productieweiland, bemest en intensief beweid, gebruik van herbiciden <u>Kenmerkende soorten:</u> Engels raaigras, Kroppaar, Kweek, Fioringras, Krulperkje, Rietzwenkgras, Zachte dravik, Paardebloem, Gewone hoornbloem, Vogelmuur, Herderstaasje</p>	D/C	Goed	Slecht	Slecht
<p>• W2: Soortenarme kamgrasweide Relatief soortenarm, onbemest tot licht bemest, periodiek weiden met schapen, incl. bloten. Ook gazonbeheer. <u>Kenmerkende soorten:</u> Engels raaigras, Rood zwenkgras, Fioringras, Kamgras, Zachte dravik, Gewoon dutzenblad, Madeliefje, Zachte ooevaarsbek, Gewone hoornbloem, Klein klaver, Witte klaver</p>	B	Goed	Matig	Matig
<p>• W3: Soortenrijke kamgrasweide Relatief soortenrijk, onbemest, periodiek weiden met schapen, incl. bloten <u>Kenmerkende soorten:</u> Rood zwenkgras, Fioringras, Kamgras, Engels raaigras, Gewoon struifgras, Zachte dravik, Goudhaver, Gewoon dutzenblad, Madeliefje, Klein leeuwewand, Hopklaver, Smalle weegbree, Klein klaver, Witte klaver, Knolboterbloem, en vele andere kruiden</p>	A	Redelijk	Goed	Goed
<p>Hooiland</p> <p>• R: Ruig hooiland Verruigd, soortenarm glanshaver-hooiland, geklepemaaid <u>Kenmerkende soorten:</u> (Groot aandeel ruigtekruiden) Kweek, Kroppaar, Glanshaver, soms Grote Vossestaart, Akkerdistel, Bereklauw, Hondsdraf, Veenwortel, Grote brandnetel</p>	D	Zeer slecht, veel open plekken	Slecht, heterogeen	Slecht
<p>• H1: Soortenarm hooiland Bemest hooiland <u>Kenmerkende soorten:</u> Kweek, Glanshaver, Rietzwenkgras, Kroppaar, Engels raaigras, Ruw beemdgras, Madeliefje, Krupende boterbloem, Paardebloem, Witte klaver</p>	D	Slecht	Slecht	Slecht
<p>• H2: Minder soortenarm hooiland Minder soortenarm, minder ruig, onbemest. Onregelmatig gehooid hooiland, of regelmatig gehooid (herstelbeheer) <u>Kenmerkende soorten:</u> Glanshaver, Kroppaar, Ruw beemdgras, Rietzwenkgras, Kweek, Rood zwenkgras, Gestreepte witbol, Fluitkruid, Akkerdistel, Peen, Gevleete rapsklaver, Smalle wikke, Witte klaver, Scherpe boterbloem, Smalle weegbree, Dutzenblad</p>	B	Matig	Matig	Matig
<p>• H3: Soortenrijk hooiland Langdurig onbemest hooien <u>Kenmerkende soorten:</u> Gevarieerd grassenbestand, veel kruiden: Glanshaver, Rood zwenkgras, Velibeemdgras, Fioringras, Gestreepte witbol, Reukgras, Goudhaver, Kamgras, Veldgerst, Dutzenblad, Peen, Knoopkruid, Echte kruisdistel, Gevleete rapsklaver, Vijfvingerkruid, Knolboterbloem, Viltig kruiskruid, Rode klaver, Smalle wikke, Margriet, Echi walstro (e.a.)</p>	A	Redelijk	Goed	Goed

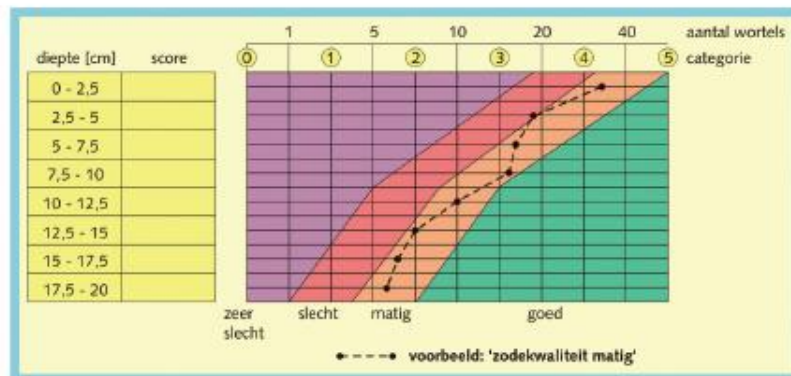
In de tabel wordt de relatie tussen beheer, vegetatietype en sterkteparameters weergegeven. Voor elk vegetatietype worden indicatorsoorten gegeven. de belangrijkste indicatoren zijn vetgedrukt. (Sprangers & Arp [12]).

Het meten van de worteldichtheid gebeurt op de volgende wijze: op vier plaatsen in een proefvak van 5 bij 5 m wordt een wortelmonster gestoken met een grondboor (diameter 3 cm). De bovenste 20 cm van het monster wordt met een mes opgedeeld in partjes van 2,5 cm. Het aantal wortels in elk stukje wordt geteld, waarbij het gaat om duidelijk zichtbare wortels met een lengte van tenminste 1 cm. Het aantal wortels geeft aan in welke categorie de worteldichtheid van het betreffende stukje valt (zie Tabel 8 - B1.3).

Tabel 8 - B1.3
Worteldichtheden

Categorie	Worteldichtheid
0	Geen wortels
1	1 - 5 wortels
2	6 - 10 wortels
3	11 - 20 wortels
4	21 - 40 wortels
5	> 40 wortels

Figuur 8 - B1.1
Zodenkwaliteit als functie van de doorworteling



De categorie is alleen een maat voor de worteldichtheid, en geeft nog geen kwaliteitsoordeel. Dit hangt af van de diepte. Zo betekent categorie 2 op 20 cm diepte redelijk veel wortels, maar voor de bovenste 2,5 cm zijn dit zeer weinig wortels. Figuur 8 - B1.1 wordt gebruikt om de hoeveelheid wortels per laag te vertalen naar een kwaliteitsoordeel. In de figuur wordt per bodemlaag de gemiddelde worteldichtheid voor 3 of 4 steken aangegeven met een punt (zie voorbeeld). De acht punten van de verschillende bodemdieptes vallen nu in vier mogelijke klassen: 'zeer slecht', 'slecht', 'matig' en 'goed'. Hiermee is de worteldichtheid gecorrigeerd voor bodemdiepte.

Meestal zullen door deze correctie de meeste punten van het profiel in één gebied vallen, waarmee de worteldichtheidscore voor het hele profiel bekend is. Deze score is dan tevens de zodenkwaliteit. De zodenkwaliteit 'zeer slecht' zal dan in de meeste gevallen duiden op het beheertype D.

Het is mogelijk dat de worteldichtheid in het bodemprofiel niet het verwachte patroon volgt, maar dat de doorworteling vooral is geconcentreerd in de bovenste bodemlaag of juist weinig afneemt met diepte. Bij minimaal twee afwijkende punten geldt de laagste score over de laag van 20 cm.

Het eventuele wortelonderzoek vindt plaats tussen medio december en medio maart. Als dat niets oplevert, kan het beste specialistisch advies worden ingewonnen.

F Erosiebestendigheid klei in de zode voor erosiemodel in golfoploopzone [23]

In lijn met Technisch Rapport Eisen klei voor dijken [10] worden drie categorieën onderscheiden voor de erosiebestendigheid van klei. De categorisering vereist het uitvoeren van classificatieproeven. Hiervoor worden drie moeilijkheidsgraden onderscheiden:

- I. ter plaatse, op de hand en met het oog;
- II. ter plaatse, met eenvoudige hulpmiddelen;
- III. beproeven van grondmonsters in een laboratorium.

Uit de materiaalparameters bepaalt men de erosiebestendigheid van de klei in de zode volgens Tabel 8 - B2.1.

Tabel 8 - B2.1

Categorie-indeling klei in de zode

Categorie	Criteria
c1 Erosiebestendig	<ul style="list-style-type: none"> • $W_l > 45\%$ én • $I_p > 0,73 \cdot (W_l - 20)\%$ én • $Z_k < 40\%$
c2 Matig erosiebestendig	<ul style="list-style-type: none"> • $W_l < 45\%$ én • $I_p > 18\%$ én • $Z_k < 40\%$
c3 Weinig erosiebestendig	<ul style="list-style-type: none"> • $I_p < 0,73 \cdot (W_l - 20)\%$ en/of • $I_p < 18\%$ en/of • $Z_k > 40\%$

waarin:

W_l	=	vloiegrens	[%]
I_p	=	plasticiteitindex	[%]
Z_k	=	zandgehalte = massapercentage korrels met een diameter van 63 μm tot 2 mm	[%]

I Ter plaatse, op de hand en met het oog

Deze categorisering is nogal onnauwkeurig. Daarom wordt uit veiligheidsoverwegingen gesteld, dat bij deze methode slechts de categorieën c2 en c3 mogen worden onderscheiden.

De methode verloopt in een aantal stappen:

1. neem voldoende monsters. Wrijf het materiaal tussen de vingers. Voel en kijk of het uitgesmeerde materiaal ruw, melig of glad is;
2. benoem de grond dan als zand, silt of klei, al of niet met bijmengingen: bijvoorbeeld als sterk zandige, siltige klei. Belangrijk is een schatting van het zandgehalte;

3. categoriseer de grond. Een richtlijn voor de categorisering is het geschatte zandgehalte. Kleilig zand en sterk zandige klei behoren tot categorie c3. Kleien mogen op deze manier niet beter worden beoordeeld dan categorie c2. Voor de kwaliteit geldt dan: matig erosiebestendig. Zeer vette kleien vallen in de zode in categorie c2 (terwijl ze in de klei onder de zode bij twijfel in categorie c3 moeten worden ingedeeld). Motief voor deze indeling is de koppeling van de sterke structurelementen door wortels.

II Ter plaatse, met eenvoudige hulpmiddelen

Deze categorisering is nauwkeuriger dan methode I. Daarom worden hierbij alle drie de categorieën (zie Tabel 8 - B2.1) onderscheiden.

De methode verloopt in twee stappen:

1. neem per hectare te toetsen grasmat minimaal 5 (geroerde) grondmonsters uit de zode; selecteer daarvoor de op het oog zwakke plekken. In het algemeen voldoet een diepte van 2 tot 7 cm;
2. stel per monster de erosiebestendigheidscategorie vast met de hierna genoemde methode.

Het op deze wijze beoordelen van de kwaliteit van de grond, mits voldoende in de praktijk beoefend en bij voortdurende voldoende geïjkt met methode III, kan aan de hand van een aantal karakteristieken per categorie worden uitgevoerd.

De grond behoort tot de categorie c1 (erosiebestendig) als respectievelijk:

- de grond in geroerde vochtige toestand (maar niet nat) erg kleverig is, dat wil zeggen aan de vingers blijft kleven en meer of minder aan elkaar blijft zitten als de vingers voorzichtig vaneen getrokken worden;
- cirkels gemaakt kunnen worden van ongeveer 40 mm lange rolletjes met een diameter van ongeveer 4 mm zonder dat de rolletjes gemakkelijk breken, als het vochtgehalte niet te laag dan wel te hoog is (hiervoor is enig experimenteren met vochtgehalte van de grond nodig);

De grond behoort tot de categorie c3 (weinig erosiebestendig) als respectievelijk:

- de grond op het oog voornamelijk uit zandkorrels bestaat;
- de grond weinig kleverig is (er blijft weinig of geen grond aan de vingers hangen na knijpen in de grond);
- de grond niet goed tot een balletje of draadje te kneden is (met uitzondering van harde droge grond);
- de grond relatief snel (binnen enige minuten) opdroogt als het op de handpalm wordt heen en weer gewreven en gekneed, waarbij de grond vaak in poeder of in korreltjes uiteen valt.

De grond behoort tot de categorie c2 (matig erosiebestendig) als hij niet duidelijk in c1 of c3 valt.

Het zandgehalte van de kleigrond kan met een eenvoudige in het terrein uitvoerbare test op ongeveer 5% nauwkeurig worden geschat. De procedure daarbij is als volgt:

- steek een volume van 10 cc grond; let erop dat er geen grote poriën in de grond zitten;
- verkruimel de grond in een 50 cc maatliter;
- voeg 40 cc water met enige druppels niet schuimend vaatwasmiddel toe en schud de cilinder tot alle grond is gedispergeerd (controle achteraf door na te gaan of er geen kleibrokjes zijn achtergebleven);
- zet de cilinder op een rustige plek en laat een tiental minuten bezinken;
- bepaal het aantal cm^3 zand in de cilinder door de ligging van het grensvlak tussen grovere en fijne deeltjes;
- de afgelezen hoeveelheid zand is ongeveer gelijk aan de gewichtsfractie zand in het monster.

III Beproeven van grondmonsters in een laboratorium

Deze categorisering is de nauwkeurigste van de drie en verloopt als volgt:

1. Neem per hectare te toetsen grasmat minimaal vijf (geroerde) grondmonsters van tenminste 1 kg uit de zode; selecteer daarvoor de op het oog zwakke plekken. In het algemeen voldoet een diepte van 2 tot 7 cm.
2. Beproof de monsters afzonderlijk volgens de in [10] genoemde procedure.
3. Uit de materiaalparameters bepaalt men de erosiebestendigheidscategorie van de klei in de zode volgens Tabel 8 - B2.1.

G Samenvatting benodigde parameters

G.1 Inleiding

Indien voor de verlengde derde toetsronde gebruik wordt gemaakt van deze handreiking, dan zijn hier andere parameters voor nodig dan volgens de toetsing van de grasbekleding volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV2006). In deze bijlage worden de benodigde parameters voor de toetsing gegeven voor de verschillende aan grasbekledingen gerelateerde mechanismen:

- Erosie grasbekleding buitentalud door golfklappen.
- Erosie grasbekleding buitentalud door golfoploop.
- Afschuiven bekleding buitentalud.
- Erosie grasbekleding kruin en binnentalud bij golfoverslag.
- Afschuiven grasbekleding binnentalud bij golfoverslag.

Er wordt onderscheid gemaakt naar de eenvoudige toetsregels en de gedetailleerde toetsregels. Bij elke volgende stap in de toetsing worden alleen aanvullende benodigde parameters gegeven, ten opzichte van eerdere stappen.

Het is vaak niet nodig om alle gegevens te verzamelen. Vaak kan namelijk op basis van veilige aannames al het oordeel 'voldoet' worden gegeven. Alleen als dat met veilige aannames niet lukt zullen aanvullende gegevens moeten worden verzameld. Zelfs binnen een gedetailleerde toetsstap kan dit het geval zijn.

G.2 Erosie buitentalud

Eenvoudige toetsregels

Stap 1	Parameters	Bepaling
1.a	Belastinggeschiedenis in verhouding tot toetsomstandigheden; Gedrag ten tijde van eerdere belastingen;	<ul style="list-style-type: none">– Archief– Hydra's
1.b.1	<i>Gemiddeld overslagdebiet</i> (kleiner of groter dan 0,1 l/s per m) achterliggend is de maatgevende combinatie van: <ul style="list-style-type: none">– waterstand– significante golfhoogte (m)– piekperiode of spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ (s)– geometrie buitentalud tot aan de buitenkruinlijn– ruwheid taludoppervlak	<ul style="list-style-type: none">– Dwarsprofielen– Hydra's
1.b.4	<i>Zodekwaliteit 'fragmentarisch', 'open' of 'gesloten'</i>	<ul style="list-style-type: none">– In het veld, visueel en bij twijfel met spade steekproef
1.b.5 en 1.b.6	<ul style="list-style-type: none">– Significante golfhoogte	<ul style="list-style-type: none">– Hydra's
1.b.6	Belastingduur (kleiner of groter dan 20 uur) Achterliggende parameters: <ul style="list-style-type: none">– waterstandverloop– verloop golfhoogte in tijd	<ul style="list-style-type: none">– Vigerende leidraden, technische rapporten, hydraulische randvoorwaarden

Gedetailleerde toetsing

Stap 2	Parameters	Bepaling
<i>Erosie buitentalud door golfklap</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Taludhelling <i>Kleikwaliteit³</i>, achterliggende parameters: <ul style="list-style-type: none"> - plasticiteitsindex - vloeigrens - zandgehalte - organisch materiaal gehalte - kalkgehalte 	<ul style="list-style-type: none"> - Dwarsprofielen - Veldonderzoek (handboringen) en laboratorium-onderzoek (Atterbergse grenzen, zand-gehaltebepaling, HCl proef, peroxide proef)
<i>Erosie buitentalud door golfoploop</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Zandgehalte van substraat <i>Zodekwaliteit*</i> (goed, matig slecht) Achterliggende gegevens: <ul style="list-style-type: none"> - beheertype - vegetatiesamenstelling en bedekking - doorworteling 	<ul style="list-style-type: none"> - Veldonderzoek (handboringen) aangevuld met laboratoriumonderzoek
	<ul style="list-style-type: none"> - Waterstandverloop - Significante golfhoogte - Piekperiode - Geometrie buitentalud 	<ul style="list-style-type: none"> - Vigerende leidraden, technische rapporten, hydraulische randvoorwaarden - Hydra's - Dwarsprofielen

G.3 Afschuiven bekleding buitentalud

Eenvoudige toetsing

De benodigde gegevens zijn ongewijzigd ten opzichte van de derde toetsronde.

Stap 1	Parameters	Bepaling
1.1	<i>Kleibekleding op kleidijk</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bestaande (archief) kennis over de dijk (kleidijk/ zanddijk met kleibekleding) eventueel aangevuld met veldonderzoek (handboringen)
1.2	<i>Zandscheg onder bekleding</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bestaande (archief) kennis over de dijk eventueel aangevuld met veldonderzoek (handboringen)
1.3	<ul style="list-style-type: none"> - Significante golfhoogte - Dikte kleibekleding 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydra's - Bestaande (archief) kennis over de dijk eventueel aangevuld met veldonderzoek (handboringen)
1.4	<ul style="list-style-type: none"> - Taludhelling 	<ul style="list-style-type: none"> - Dwarsprofielen

³ let op de definitie van de zodekwaliteit voor de oploopzone wijkt af van die voor de golfklapzone en die voor golfoverslag op de kruin en op het binnentalud!

Gedetailleerde toetsing

De benodigde gegevens zijn ongewijzigd ten opzichte van de derde toetsronde.

Stap 2	Parameters (aanvullend op eenvoudige toetsing)	Bepaling
	<ul style="list-style-type: none">- Piekperiode- D_{15} zand onder bekledingslaag (korrel diameter die door 15% (massa) van het materiaal wordt onderschreden)	<ul style="list-style-type: none">- Hydra's- Boringen (handboringen) en laboratoriumonderzoek.

G.4 Erosie kruin en binnentalud door golfoverslag

Eenvoudige toetsing

De eenvoudige toetsing is opgebouwd uit 4 deelstappen, waarbij bij elke volgende deelstep nieuwe gegevens nodig zijn. Het is dus mogelijk dat alleen de parameter uit deelstep 1 nodig is, maar ook dat alle vier de deelstappen moeten worden doorlopen waardoor alle parameters nodig zijn.

Stap 1	Parameters	Bepaling
1.1	<i>Gemiddeld overslagdebiet</i> (kleiner of groter dan 0,1 l/s per m) achterliggend is de maatgevende combinatie van: <ul style="list-style-type: none">- waterstand- significante golfhoogte (m)- piekperiode of spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ (s)- geometrie buitentalud tot aan de buitenkruinlijn- ruwheid taludoppervlak	<ul style="list-style-type: none">- Dwarsprofielen- Hydra's
1.2	<i>Zodekwaliteit</i> 'fragmentarisch', 'open' of 'gesloten'	<ul style="list-style-type: none">- In het veld, visueel en bij twijfel met spade steekproef
1.3	<i>Grondsoort substraat</i> 'klei' en <i>laagdikte</i> >0,4 m	<ul style="list-style-type: none">- Bestaande kennis over de dijk (kleidijk/ zanddijk/ zanddijk met kleibekleding)- In het veld (is de vochtige grond plastisch, dan klei), steekproefsgewijs (guts)boring
1.4	<ul style="list-style-type: none">- Significante golfhoogte ($H_s < 3$ m)- Taludhelling (steiler/ flauwer dan 1:4)- Objecten/ beschadigingen <0,15 m	<ul style="list-style-type: none">- Hydra's- Dwarsprofielen- Visueel in het veld

Gedetailleerde toetsing

Aanvullend op de parameters uit de eenvoudige toetsing zijn nodig:

Stap 2	Parameters	Bepaling
	<ul style="list-style-type: none">- Waterstandverloop- Verloop significante golfhoogte in tijd- Verloop gemiddeld overslagdebiet in tijd	<ul style="list-style-type: none">- Vigerende Leidraden, technische rapporten en hydraulische randvoorwaarden

G.5 Afschuiven bekleding binnentalud door golfoverslag

Eenvoudige toetsing

Stap 1	Parameters	Bepaling
	<p><i>Gemiddeld overslagdebiet</i> (kleiner of groter dan 0,1 l/s per m) achterliggend is de maatgevende combinatie van:</p> <ul style="list-style-type: none">- waterstand- significante golfhoogte (m)- piekperiode of spectrale golfperiode $T_m - 1,0$ (s)- geometrie buitentalud tot aan de buitenkruinlijn- ruwheid taludoppervlak <p>- Taludhelling</p> <p><i>Type dijk</i> (kleidijk, zanddijk, zanddijk met kleibekleding) <i>Indien kleidijk – kleikwaliteit</i> Achterliggende parameters:</p> <ul style="list-style-type: none">- plasticiteitsindex- vloeigrens- zandgehalte- organisch materiaal gehalte- kalkgehalte	<ul style="list-style-type: none">- Dwarsprofielen- Hydra's <ul style="list-style-type: none">- Dwarsprofielen <ul style="list-style-type: none">- Bestaande (archief) kennis over de dijk (kleidijk/ zanddijk/ zanddijk met kleibekleding)- Veldonderzoek (handboringen) en laboratoriumonderzoek (Atterbergse grenzen, zandgehaltebepaling, HCl proef, peroxide proef)

Gedetailleerde toetsing

Voor de volledigheid worden alle parameters genoemd die van belang kunnen zijn. Vaak volstaan echter veel minder parameters om tot een oordeel te komen.

Stap 3	Parameters (aanvullend op eenvoudige toetsing)	Bepaling
3	<i>Dijk geometrie</i> <i>Type dijk (klei/ zand/ kleibekleding op zandkern)</i> <ul style="list-style-type: none">- Dikte bekledingslaag- Dijkopbouw- Gewicht bekledingslaag- Wrijvingseigenschappen bekledingslaag- Gewicht kernmateriaal- Wrijvingseigenschappen kernmateriaal- Waterstandsverloop- Verloop overslagdebiet in tijd- Verloop golfhoogte in tijd- Infiltratiecapaciteit bekledingslaag- Doorlatendheid bekledingslaag- Porositeit bekledingslaag- Doorlatendheid kernmateriaal- Porositeitkernmateriaal	<ul style="list-style-type: none">- Dwarsprofielen- Archiefgegevens- Grondonderzoek (boringen aangevuld met sonderingen)- Laboratoriumonderzoek op ongeroerde monsters (gewicht, porositeit triaxiaalproeven, doorlatendheidsproeven)- Veld infiltratieproeven- Hydra's- Vigerende leidraden en technische rapporten

COLOFON

Opdrachtgever Informatie	Rijkswaterstaat WVL en Projectbureau Zeeweringen Helpdesk Water T 0800-NLWATER (0800-6592837) contact@helpdeskwater.nl www.helpdeskwater.nl
Datum	Januari 2015