

**WTI 2017 Onderzoek en
ontwikkeling landelijk
toetsinstrumentarium**

Product 5.8 Validatie erosiebestendigheid



**WTI 2017 Onderzoek en
ontwikkeling landelijk
toetsinstrumentarium**

Product 5.8 Validatie erosiebestendigheid overgangen

Gijs Hoffmans

1209437-003

Titel

WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat WVL

Project

1209437-003

Kenmerk

1209437-003-HYE-0001-

Pagina's

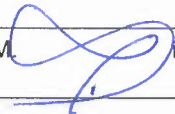


36

Trefwoorden

belastingfactor, cumulatieve overbelastingsmethode, dijken, erosiebestendigheid, golfoploop, golfoverslag, grasbekleding, overgangen.

Samenvatting

Deze rapportage geeft een validatie van belastingfactoren voor geometrische overgangen, overgangen tussen bekledingen, trappen en overig dijkmeubilair. De validatie is gebaseerd op verschillende praktijkproeven uitgevoerd in Nederland en België, waar de cumulatieve overbelastingsmethode in relatie tot de definities van het schadegetal is toegepast. De engineering tools voor de belastingfactoren zijn deels gebaseerd op theoretische achtergronden en deels op expert judgement. In de validatie is onderscheid gemaakt tussen de top-laagsterkte (talud gerelateerd) en de bezwijksterkte (sterkte van afschuiven). Bovendien is in de bureauanalyse rekening gehouden met omgevingsfactoren zoals stenen die voor aanvang van de beproeving onzichtbaar onder het maaiveld lagen ofwel onderhoudswegen/ kruinwegen, die de sterkte van grasbekledingen mogelijkwerwijs beïnvloeden. Niet alleen klinkers op parkeerplaatsen en doorgroei stenen, maar ook wandeffecten zijn beoordeeld. De studie toont aan dat eerste stappen zijn gezet in het modelleren van de erosiebestendigheid van overgangen.

| Versie | Datum | Auteur | Paraaf | Review | Paraaf | Goedkeuring | Paraaf |
|--------|-----------|--------------------------|---|----------------------|---|--------------|---|
| | nov. 2014 | dr.ir. G.J.C.M. Hoffmans | | ir. T.P.Stoutjesdijk | | ir. L. Voogt | |
| | jan. 2015 | dr.ir. G.J.C.M. Hoffmans |  | ir. T.P.Stoutjesdijk |  | ir. L. Voogt |  |

Status

definitief

Inhoud

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 2 | Cumulatieve overbelastingsmethode | 3 |
| 3 | Geometrische overgangen | 5 |
| 3.1 | Inleiding | 5 |
| 3.2 | Boonweg | 5 |
| 3.3 | St. Philipsland | 7 |
| 3.4 | Kattendijke | 7 |
| 3.5 | Afsluitdijk | 9 |
| 3.6 | België | 11 |
| 3.7 | Tholen | 11 |
| 3.8 | Nijmegen | 12 |
| 3.9 | Millingen | 12 |
| 3.10 | Synthese | 13 |
| 4 | Overgangen en overig dijkmeubilair | 15 |
| 4.1 | Inleiding | 15 |
| 4.2 | Delfzijl | 15 |
| 4.3 | Kattendijke | 15 |
| 4.4 | Afsluitdijk | 16 |
| 4.4.1 | Parkeerplaats | 16 |
| 4.4.2 | Trap | 17 |
| 4.5 | Vechtdijk | 18 |
| 4.5.1 | Doorgroeistenen | 18 |
| 4.5.2 | Boom | 18 |
| 4.6 | België | 20 |
| 4.6.1 | Overgang tussen bekledingen | 20 |
| 4.7 | Tholen | 22 |
| 4.7.1 | Asfaltberm | 22 |
| 4.7.2 | Trap | 22 |
| 4.7.3 | Afrastering en paal | 23 |
| 4.8 | Nijmegen | 24 |
| 4.8.1 | Sterktefactor | 24 |
| 4.9 | Millingen aan de Rijn | 28 |
| 4.9.1 | Overgang tussen bekledingen | 28 |
| 4.10 | Noord Beveland | 29 |
| 4.10.1 | Overgang tussen bekledingen | 29 |
| 4.11 | Synthese | 30 |
| 5 | Conclusies en aanbevelingen | 31 |
| 5.1 | Geometrische overgangen | 31 |
| 5.2 | Overgangen tussen bekledingen | 31 |
| 5.3 | Bomen en obstakels | 31 |
| 5.4 | Wanden en trappen | 32 |
| 5.5 | Samenvattende conclusies | 32 |
| 5.6 | Samenvattende aanbevelingen | 32 |

6 Referenties

35

Bijlage(n)

A Cumulative Overload method

A-1

A.1 Introduction

A-1

A.2 Cumulative overload method

A-1

A.3 Revetment transitions

A-1

A.4 Geometrical transitions

A-2

A.5 Flow blocking objects

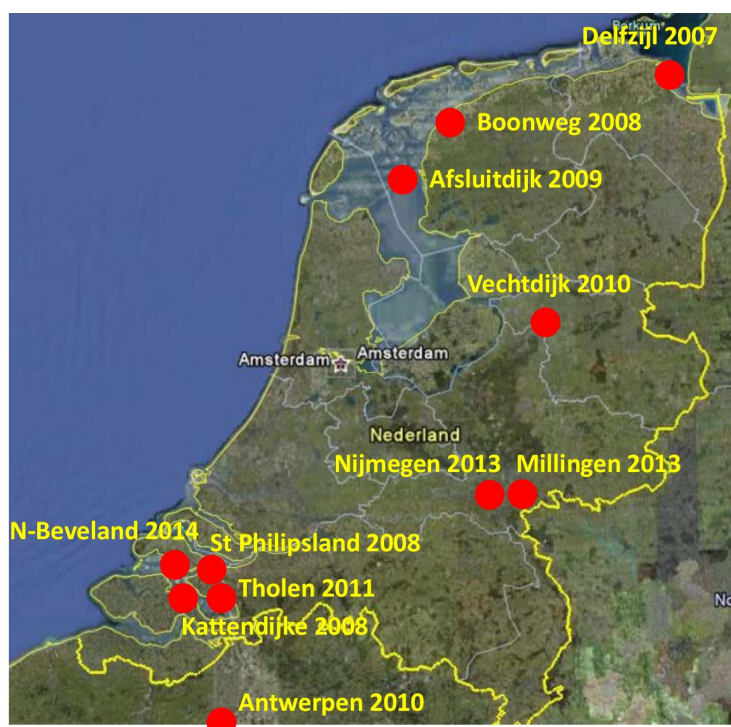
A-3

A.6 References

A-3

1 Inleiding

Vanaf 2007 tot april 2014 zijn diverse praktijkproeven in Nederland en België op grasbekledingen uitgevoerd. Met een golfoverslagsimulator, een golfklapgenerator en een golfoploosimulator is de erosiebestendigheid van grasbekledingen op dijken onderzocht (zie Fig. 1). Vaak zijn meerdere secties op dezelfde locatie onderzocht. Van elk onderzoek is een factual report beschikbaar en vanuit SBW- (= Sterkte en Belasting Waterkeringen) of WTI-2017-kader (= Wettelijk Toetsinstrumentarium) ook vaak predictie-, evaluatie- en modelontwikkelingsrapporten, zie ook Van der Meer (2014) waar aanvullende informatie over kengetallen en resultaten van de proeven wordt gegeven.



Figuur 1. Overzicht van locaties waar proeven zijn uitgevoerd met de golfoverslag- en golfoploosimulator tot en met 2014 (Van der Meer 2014). Bezochte locaties met golfklapgenerator zijn Oosterbierum, Harculo, Olst en Berkum.

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. Bij de laatste overslagproeven (2013-Nijmegen en Millingen) werd een kleine golfhoogte gesimuleerd, met veel kleine overslaande golven. Het grootste overslagdebiet was hier 200 l/s per m. Bij de golfoploosproeven in 2012 (pilot proef Tholen) en in 2014, werd uitgegaan van een golfhoogte van 2 m en een talud van 1V:4H. De proeven werden uitgevoerd met een “toenemende waterstand”, waarbij de 2%-golfoploop steeds hoger op de dijk kwam te liggen en soms virtueel ver daarboven, wat bij de proeven tot golfoverslag leidde.

De ervaring met de proeven leerde, dat het meestal niet een ononderbroken grastalud is wat de (eerste) schade liet zien, maar iets anders, zoals de teen van de dijk, een taludovergang, een boom, een parkeerplaats van klinkers aan de teen of een trap op het binnentalud. Deze rapportage geeft een validatie van de beschikbare engineering tools voor geometrische overgangen (van talud naar teen), obstakels (b.v. bomen) en overgangen van wegen naar grasbekledingen. Ook wordt de sterkte van gras langs wanden gevalideerd, dus in de stromingsrichting.

Hoofdstuk 2 beschrijft de cumulatieve overbelastingsmethode inclusief de uitbreidingen voor het voorspellen van de erosiebestendigheid bij overgangen; dus de extra belasting (belastingfactor) en de sterktevermindering (sterktefactor), zie ook Bijlage A waar de engineering tools voor het voorspellen van de belastingfactor worden gegeven. Hoofdstuk 3 behandelt de geometrische overgangen. Hoofdstuk 4 gaat in op de overgangen in bekledingen en de invloed van obstakels als bomen en overig dijkmeubilair. Hoofdstuk 5 geeft conclusies en aanbevelingen.

2 Cumulatieve overbelastingmethode

Voor het bepalen van de erosiebestendigheid van gras is de krachtenbalans toegepast (kracht is evenredig met U^2 waarin U de stroomsnelheid is). Deze vergelijking is bekend als zijnde de cumulatieve overbelastingmethode:

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

waarin:

| | |
|-------|---|
| D | schadegetal (m^2/s^2) |
| U_i | stroomsnelheid van overslaande golf (m/s) |
| U_c | kritieke stroomsnelheid (m/s) |
| N | aantal golven waarin $U_i > U_c$. |

Elke golf geeft een bijdrage aan schade/erosie mits de stroomsnelheid van de overslaande golf groter is dan de kritieke stroomsnelheid. Het schadegetal bepaalt de mate van schade op het talud en varieert van 'geen/begin schade' tot 'falen van de dijk' en wordt bepaald na N golven.

Indien de kritieke stroomsnelheid voor een goede grasbekleding groter is dan 3,5 m/s dragen de grootste golven meer bij aan de erosie dan de kleinere. Om de effecten van overgangen en obstakels te verdisconteren is vgl. 1 aangepast als volgt:

$$\sum_{i=1}^N (\alpha_M U_{i,crest}^2 - \alpha_s U_c^2) = D \quad \text{for } \sqrt{\alpha_M} U_{i,crest} > \sqrt{\alpha_s} U_c \quad (2)$$

waarin:

| | |
|------------|---------------------|
| α_M | belastingfactor (-) |
| α_s | sterktefactor (-) |

De eerste term aan de linkerkant van vgl. 2 is een maat voor de belasting. De tweede term is een maat voor de sterkte. Vergelijking 2 vertegenwoordigt een hypothese, die in deze studie met prototype experimenten wordt gevalideerd. Voor overslaande golven wordt de stroomsnelheid ($U_{i,crest}$) op de kruin van de dijk benaderd door (WTI-2013):

$$U_{i,crest} = 4.5V_i^{0.3} \quad (3)$$

waarin V het golfvolume is (uitgedrukt in m^3) en de coëfficiënten 4,5 en 0,3 hebben een dimensie. De stroming op het binnentalud versnelt en is afhankelijk van de oorspronkelijke stroomsnelheid, de hellingshoek en de ruwheid. Een eerste schatting kan worden gegeven met α_a als een versnellingsfactor (zie ook de WTI-2014 voor meer details):

$$U_{i,slope} = \alpha_a U_{i,crest} \quad (4)$$

Zeer recent zijn de volgende definities voor het schadegetal afgeleid (WTI-2014, Fig. 2.1):

| | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 'geen schade' | $0 < D < 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ |
| 'begin schade' | $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$, |
| 'schade op meerdere kale plekken' | $D = 4000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ |
| 'falen van de grasbekleding' | $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ |



Begin schade



Schade op meerdere plekken



Falen van de dijk (zandkern is zichtbaar)



Geen falen

Figuur 2.1 Verschillende definities van schade

3 Geometrische overgangen

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de validatie van de belastingfactor voor geometrische overgangen ofwel voor overgangen van het talud naar de teen van de dijk (Fig. 3.1). Hiervoor zijn achtereenvolgens de volgende proeven toegepast: Boonweg, St. Philipsland, Kattendijke, Afsluitdijk, Tholen en Nijmegen (Paragrafen 3.2 t/m 3.9). De sterktes (of de kritieke stroomsnelheden uitgedrukt in U_c) van het talud en de teen zijn met de cumulatieve overbelastingmethode en de definities voor het schadegetal bepaald (zie ook Hoofdstuk 2 en Bijlage A). De opgelegde belasting komt hier overeen met de golven, die tijdens de experimenten met de golfoverslagsimulator zijn gesimuleerd. De hieruit verkregen belastingfactor (of 'gemeten' belastingfactor) is met de berekende belastingfactor vergeleken (zie ook Bijlage A waar de engineering tools zijn beschreven). Bij de bepaling van de belastingfactoren is in eerste instantie aangenomen dat de sterkte van het talud en de teen hetzelfde zijn. Echter, als gevolg van heterogeniteit (sterktevariatie van gras) en door bijvoorbeeld stenen die net onder het maaiveld (onzichtbaar) liggen is deze aanname incorrect. Indien er sterkteverschillen zijn tussen talud en teen, dan zal dit worden opgemerkt/besproken. Paragraaf 3.10 geeft een kwalitatieve analyse.



Figuur 3.1. Boonweg. Sectie 3. Na de proef, schade aan het talud en aan de teen.

3.2 Boonweg

Voor sectie 1 bedraagt de sterkte van het grastalud $U_c = 10$ m/s. Hiervoor is de basis 'geen schade talud' (Tabel 3.1). Indien de sterktes van het talud en de teen hetzelfde zijn, dan is de belastingfactor relatief groot en bedraagt 1,5. Indien de belastingfactor gelijk is aan 1,16 (conform de theoretische formule), dan is de sterkte van het talud gelijk aan $U_c = 8,5$ m/s; dus 1,5 m/s lager. Dit lijkt aannemelijk, omdat tijdens het experiment stenen zichtbaar werden, die mogelijk de teen verzwakten (Fig. 3.2).

Op basis van het criterium 'geen schade talud' wordt voor sectie 2 wederom een sterkte van $U_c = 10$ m/s gevonden (Tabel 3.1). Aannemende dat de sterktes van het talud en de teen gelijk zijn, dan is de belastingfactor gelijk aan 1,22. Deze waarde komt nagenoeg overeen met de theoretische waarde (1,16) waarvoor geldt $U_c = 9,5$ m/s, dus een iets lagere sterkte dan het talud. Het is niet uit te sluiten, dat de teen zwakker was vanwege stenen, die voor aanvang van de proef niet waarneembaar onder het maaiveld lagen (zie ook Fig. 3.2b).

Voor sectie 3 is de gemiddelde sterkte van het grastalud ongeveer $U_c = 8$ m/s. 'Begin schade talud' geeft 9 m/s en 'vrijwel bezwaken grasbekleding' resulteert in $U_c = 7,5$ m/s (Tabel 3.1). Aannemende dat de sterktes van het talud en de teen vergelijkbaar zijn (dus $U_c = 9,0$ m/s), dan is

de belasting-factor gelijk aan 1,10. Deze waarde is vergelijkbaar met de theoretische waarde (1,16).

Na ongeveer 6 stormen (5.45 uur in de storm met 75 l/s per m) bezweek het talud in sectie 4, terwijl op dat moment de teen van de dijk nog ongeschonden was. Omdat de belasting nabij de teen groter is dan de belasting op het talud als gevolg van een extra kracht (centrifugaal kracht), is U_c nabij de teen groter dan 9 m/s.

| Sectie | Observatie | Talud-helling $\cot \alpha$ | α_B | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------|------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|-------|-------|------|---------------------------|-------------|------|
| | | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 1, talud | Geen schade | 2,9 | 1,46 | 1,00 | | | | | | | | 12550 | 5039 | 1677 | 440 | 0 - 1000 | 10,0 |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,16 | | | | | | | | 5419 | 2113 | 664 | 149 | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,20 | | | | | | | | | 2403 | 787 | 189 | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,25 | | | | | | | | | 2937 | 1023 | 271 | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,30 | | | | | | | | | 3533 | 1300 | 376 | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,40 | | | | | | | | | 4921 | 1986 | 657 | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,50 | | | | | | | | | 6568 | 2857 | 1054 | 1000 | 10,0 |
| Sectie 2, talud | Geen schade | 2,9 | 1,46 | 1,00 | | | | | | | | 12550 | 5039 | 1677 | 440 | 0 - 1000 | 10,0 |
| Sectie 2, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,16 | | | | | | | | 13957 | 6193 | 2341 | 722 | | |
| Sectie 2, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,20 | | | | | | | | | | 2705 | 870 | | |
| Sectie 2, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,22 | | | | | | | | | | 2967 | 979 | 1000 | 10,0 |
| Sectie 2, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,25 | | | | | | | | | | 3388 | 1160 | | |
| Sectie 2, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,30 | | | | | | | | | | 4761 | 1509 | | |
| Sectie 3, talud | Begin van schade (opbolm | 2,9 | 1,46 | 1,00 | | | | | | | | 6403 | 2317 | 659 | | 1000 | 9,0 |
| Sectie 3, talud | Bezweken na opbolmecha | 2,9 | 1,46 | 1,00 | | | | | | | | 12550 | 5039 | 1677 | | 7000 | 7,5 |
| Sectie 3, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,16 | | | | | | | | 9797 | 4070 | 1393 | 358 | 1000 | |
| Sectie 3, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,10 | | | | | | | | | 2985 | 924 | 201 | 1000 | 9,0 |
| Sectie 3, teen | Begin schade | 2,9 | 1,46 | 1,30 | | | | | | | | | | 2611 | 835 | | |
| Sectie 4, talud | Begin van schade (opbolm | 2,9 | 1,42 | 1,00 | | | | | | | | 9046 | 3368 | 1013 | | 1000 | 9,0 |
| Sectie 4, talud | Bezweken na opbolmecha | 2,9 | 1,42 | 1,00 | | | | | | | | 9798 | 3682 | 1123 | | 7000 | 7,5 |
| Sectie 4, teen | Geen schade | 2,9 | 1,46 | 1,16 | | | | | | | | 22227 | 10440 | 4238 | | | |
| Sectie 4, teen | Geen schade | 2,9 | 1,46 | 1,00 | | | | | | | | 12250 | 5039 | 1677 | | 0 - 1000 | >9 |

Tabel 3.1 Belastingfactoren Boonweg (Secties 1 t/m 4)



Figuur 3.2a. Boonweg. Sectie 1. Na de proef, geen schade aan het talud wel aan de teen



Figuur 3.2b. Boonweg. Sectie 2. Na de proef, geen schade aan het talud wel aan de teen.

Voor de criteria 'geen schade talud' en 'begin schade talud' wordt een hogere U_c gevonden dan voor het criterium 'bezwijken talud'. Voor de criteria 'geen schade talud' en 'begin schade talud' varieert U_c van 9 m/s tot 10 m/s. Voor het criterium 'bezwijken talud' geldt $U_c = 7,5$ m/s. Hier wordt in paragraaf 5.6 op teruggekomen. Mogelijkerwijs is de toplaag sterker door een hogere worteldichtheid en een kleiig zandige laag. Op een diepte van 20 cm en meer is de worteldichtheid laag/verwaarloosbaar. Bovendien bestaat de kern van de dijk uit zand. Niettemin is het aanbevelingswaardig om deze trend in relatie tot de ondergrond nader te analyseren en verbanden hiervoor af te leiden.

Het experiment in sectie 4 heeft duidelijk aangetoond, dat de sterkte van het talud niet met de sterkte van de teen overeenkomt. De sterkte nabij de teen bleek hoger. Dit betekent dat het gras niet overal dezelfde sterkte heeft (heterogeniteit).

Indien de teen van de dijk verzwakt is door bijvoorbeeld stenen (niet zichtbaar; overgroeid door gras; in secties 1 en 2) dan blijkt, dat de 'gemeten' belastingfactor hoger is dan de berekende waarde. De proeven, uitgevoerd in secties 3 en 4, hebben laten zien, dat de 'gemeten' belastingfactor kleiner is dan de berekende waarde. Dit betekent dat voor deze overgangen de voorspelling voor de belastingfactor conservatief is/was.

3.3 St. Philipsland

Voor het criterium 'begin schade talud' is de sterkte $U_c = 7,5$ m/s en voor het criterium 'bezwijken talud' wordt afgeleid $U_c = 6,5$ m/s (Tabel 3.2). Hieruit volgt dat voor 'begin schade talud' een hogere U_c wordt gevonden; zie ook paragraaf 3.2. Voor zowel 'begin schade talud' als 'bezwijken talud' wordt een zelfde 'gemeten' belastingfactor gevonden. Deze waarde van 1,15 wijkt nauwelijks af van de berekende belastingfactor (1,19) (Tabel 3.2).

| Sectie | Observatie | Talud-helling cotα | α_a | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|-----------------|--------------|-----------------------|------------|------------|---|---|---|---|---|-------|-------|------|-----|----|------------------------------|----------------|-----|
| | | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 1, talud | Begin schade | 2,4 | 1,45 | 1,00 | | | | | | 9842 | 4343 | 1551 | 420 | | | 1000 | 7,5 |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,4 | 1,48 | 1,19 | | | | | | 10125 | 5150 | 2222 | 795 | | | 1000 | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,4 | 1,48 | 1,15 | | | | | | | | 1917 | 656 | | | 1000 | 7,5 |
| Sectie 1, talud | Bezwijken | 2,4 | 1,45 | 1,00 | | | | | | 23874 | 11768 | 4870 | | | | 7000 | 6,5 |
| Sectie 1, teen | Bezwijken | 2,4 | 1,48 | 1,19 | | | | | | 24338 | 13438 | 6442 | | | | | |
| Sectie 1, teen | Bezwijken | 2,4 | 1,48 | 1,15 | | | | | | 22464 | 10711 | 5638 | | | | 7000 | 6,5 |

Tabel 3.2 Belastingfactoren St. Philipsland (Sectie 1)

3.4 Kattendijke

Voor sectie 1 is de sterkte van de toplaag op het talud $U_c = 9,5$ m/s (basis is 'geen schade talud') (Tabel 3.3). Nabij de teen van de dijk trad na 3 stormen 'begin schade teen' op. Na 6 stormen was er op het talud nog geen schade opgetreden. Wordt het uitgangspunt gehanteerd dat de sterktes van het talud en de teen gelijk zijn, dan is de berekende belastingfactor groter dan de bovengrens (dus > 2) ofwel de sterkte van de teen is aanzienlijk lager. Door een belastingfactor van 1,16 (dus conform de theoretische waarde) aan te nemen volgt, dat de sterkte nabij de teen gelijk is aan $U_c = 6$ m/s. Deze waarde van U_c voor de toplaag is dus beduidend lager dan van het grastalud ($U_c = 9,5$ m/s). Omdat de teen van de dijk grenst aan een onderhoudsweg heeft de ondergrond, bestaande uit zand en puin, zeer waarschijnlijk de sterkte van het gras verzwakt (Fig. 3.3).

De teen nabij de dijk (sectie 1) bezweek in de zesde storm na 3 uur. Op dat moment was het talud nog intact; geen schade. Wordt aangenomen dat de sterkte van de teen gelijk is aan $U_c = 9,5$ m/s, dan wordt een relatief hoge belastingfactor van 1,6 gevonden. Indien de belastingfactor gelijk is aan 1,16 (dus conform de theorie), dan is de sterkte nabij de teen gelijk aan $U_c = 7,5$ m/s; dus 2 m/s lager. Mogelijkerwijs heeft het zand in de nabijheid van de onderhoudsweg een rol

gespeeld (sterktefactor is ongeveer $7,5/9,5 = 0,8$), maar de toplaagsterkte is mogelijk ook groter dan de bezwijksterkte; zie ook paragraaf 3.2.

| Sectie | Observatie | Taludhelling cota | α_a | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|---------------------|-------------------------|----------------------|------------|------------|---|---|---|---|------|-------|-------|-------|------|------|------------------------------|----------------|--|
| | | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 1, talud | Geen schade talud | 3,0 | 1,40 | 1,00 | | | | | | | 8933 | 3252 | 949 | 206 | 0 - 1000 | 9,5 | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 3,0 | 1,40 | 1,16 | | | | | 2458 | 919 | 257 | 48 | 1000 | | | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 3,0 | 1,40 | 2,00 | | | | | | | 3148 | 1426 | 546 | 1000 | | < 9,5 | |
| Sectie 1, teen | Bezwijken | 3,0 | 1,40 | 1,16 | | | | | | | 23747 | 11416 | 4713 | 7000 | | | |
| Sectie 1, teen | Bezwijken | 3,0 | 1,40 | 1,30 | | | | | | | | 7976 | | | | | |
| Sectie 1, teen | Bezwijken | 3,0 | 1,40 | 1,50 | | | | | | | | | 6615 | | | | |
| Sectie 1, teen | Bezwijken | 3,0 | 1,40 | 1,60 | | | | | | | | | 8919 | 3852 | 7000 | 9,5 | |
| Sectie 2, schade in | Begin schade talud | 3,0 | 1,40 | 1,00 | | | | | | 3141 | 1005 | 225 | | 1000 | 7,0 | | |
| Sectie 2, schade in | Vrijwel bezwijken talud | 3,0 | 1,40 | 1,00 | | | | | | 9223 | 3532 | | | 7000 | 6,5 | | |
| Sectie 2, teen | Bezwijken | 3,0 | 1,40 | 1,16 | | | | | | 29027 | 6800 | 2537 | | 7000 | | | |
| Sectie 2, teen | Bezwijken | 3,0 | 1,40 | 1,00 | | | | | | 9223 | 3532 | | | 7000 | 6,5 | | |

Tabel 3.3 Belastingfactoren Kattendijke (Secties 1 en 2)



Figuur 3.3a. 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.

Indien vooraf met een injecteur schade aan de dijk wordt gebracht (sectie 2), dan treedt ten opzichte van sectie 1 eerder schade en bezwijken op. Op basis van 'begin schade talud' en 'vrijwel bezweken talud' wordt een gemiddelde gevonden van $U_c = 7$ m/s (Tabel 3.3). Voor 'begin schade

talud' ($U_c = 7,0$ m/s) wordt t.o.v. 'bezwijken' ($U_c = 6,5$ m/s) wederom een hogere U_c gevonden; zie paragraaf 3.2. Zeer waarschijnlijk is de sterkte van de teen door de onderhoudsweg lager.

Wordt het schadebeeld 'bezwijken' gehanteerd, dus $U_c = 6,5-7,5$ m/s dan is de belastingfactor voor secties 1 en 2 achtereenvolgens 1,16 (conform de theoretische waarde) en 1 (dus een conservatieve voorspelling).



Figuur 3.3b. Kattendijke. Sectie 2. Benedentalud met teen, na de proef. De onderhoudsweg was afgedekt en kon niet worden beschadigd.

3.5 Afsluitdijk

De gemiddelde sterkte van het talud voor sectie 1 bedraagt $U_c = 7$ m/s (Tabel 3.4). Dit is gebaseerd op 'begin schade talud' en 'meerdere locaties lokale plekken talud' (Fig. 3.4). 'Begin schade teen' trad eerder op dan 'begin schade talud' wat conform de verwachting is (belastingfactor is per definitie groter dan 1). Indien de sterktes van de teen en het talud hetzelfde zijn ($U_c = 7$ m/s), dan wordt een te hoge belastingfactor (van 2) gevonden. Zeer waarschijnlijk was de toplaag nabij de teen zwakker dan de toplaag op het talud. Indien wordt aangenomen dat de sterktes van talud en teen verschillend waren en indien de belastingfactor gelijk is aan 1,2 (theoretische waarde), dan is de sterkte van de toplaag nabij de teen gelijk aan $U_c = 4,5$ m/s, dus 2,5 m/s lager.



Figuur 3.4. Meerdere kale plekken op talud en gras verdwenen bij teen.

Na het einde van 5 stormen was in sectie 1 een erosiekuil van 30 cm. De teen van de dijk bezweek toen nog niet; dus $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Indien wordt uitgegaan van een belastingfactor variërend van 1,0 tot 1,2 (= theoretische waarde), dan varieert U_c van 7 m/s tot 9 m/s. Dit houdt in dat de sterkte van de toplaag (variërend van 4,5 m/s tot 7 m/s) en de bezwijksterkte ($7 \text{ m/s} < U_c < 9 \text{ m/s}$) niet overeenkomen. Ook zijn er verschillen met wat in Friesland, St. Philipsland en Kattendijke is gevonden. Op deze locaties is de toplaagsterkte groter dan de bezwijksterkte. Waarschijnlijk heeft dit te maken met de verschillende samenstelling/opbouw van de ondergrond. De Afsluitdijk bestaat uit keileem, terwijl in bovengenoemde locaties de dijk kern bestaande uit zand is afgesloten met een kleiig zandhoudende laag, zie ook paragraaf 3.2.

Op basis van 'begin schade talud' en 'meerdere locaties kale plekken talud' wordt voor de toplaag in sectie 2 een U_c gevonden van 4 m/s (Tabel 3.4). Nabij de teen trad later schade op; dus de teen had een sterkere toplaag dan het talud (omdat de belasting nabij de teen groter is). Indien U_c voor de teen gelijk is aan 6,5 m/s, dan is de belastingfactor gelijk aan 1,2 conform de theoretische waarde. Zeer waarschijnlijk varieert de sterkte van de toplaag in sectie 2 van 4 m/s tot 6,5 m/s.

Op basis van 'begin schade' en 'meerdere locaties kale plekken' wordt voor sectie 3 een U_c gevonden van ongeveer 6 m/s. Indien de theoretische waarde voor de belastingfactor gelijk is aan 1,2, dan is de sterkte gelijk aan $U_c = 5,5 \text{ m/s}$. Indien de sterktes van teen en talud hetzelfde zijn, dan is de belastingfactor hoger, te weten 1,4.

De sterkte van het talud varieert van 4 m/s tot 9 m/s niet alleen per sectie maar ook per locatie (teen of talud en toplaag of ondergrond). De gemiddelde U_c is ongeveer 6,5 m/s. Deze spreiding is relatief groot, in ieder geval groter dan voor de Boonweg en in Zeeland. Daarom is de spreiding van de belastingfactoren ook groot; deze varieert van 1 (ondergrens) tot 2 (bovengrens). Het is aanbevelingswaardig om deze grote variatie in belastingfactoren nader te onderzoeken en een eenduidig verband tussen toplaag- en bezwijksterkte af te leiden.

| Sectie | Observatie | Talud-helling cot α | α_a | α_M | berekende $D \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | | |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|------------|------------|--|---|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----|--|----------------|--------|-----|
| | | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | | |
| Sectie 1, talud | Begin schade | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | | 20031 | 10537 | 4629 | 1648 | | | | | 1000 | 7,5 |
| Sectie 1, talud | Meerdere locaties kale plekken | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | 31241 | 17055 | 7969 | 3078 | | | | | | 4000 | 6,5 |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,3 | 1,46 | 1,20 | | | | 1534 | 760 | 302 | 92 | | | | | | 1000 | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,3 | 1,46 | 1,30 | | | | | 961 | 415 | 142 | | | | | | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,3 | 1,46 | 1,50 | | | | | | 696 | 284 | 92 | | | | | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,3 | 1,46 | 1,70 | | | | | | 1042 | 483 | 186 | | | | | | |
| Sectie 1, teen | Begin schade | 2,3 | 1,46 | 2,00 | | | | | | 1661 | 883 | 407 | | | | | 1000 | 7,0 |
| Sectie 1, teen | Erosiekuil 0,30 m diep | 2,3 | 1,46 | 1,20 | | | | 114236 | 75845 | 44785 | 24273 | 11627 | 4852 | | | | < 7000 | > 9 |
| Sectie 1, teen | Erosiekuil 0,30 m diep | 2,3 | 1,46 | 1,20 | | | | 114236 | 75845 | 44785 | 24273 | 11627 | 4852 | | | | < 7000 | > 9 |
| Sectie 1, teen | Erosiekuil 0,30 m diep | 2,3 | 1,46 | 1,10 | | | | | | | 17940 | 7943 | 2999 | | | | | |
| Sectie 1, teen | Erosiekuil 0,30 m diep | 2,3 | 1,46 | 1,40 | | | | | | | 39502 | 21323 | 10312 | | | | | |
| Sectie 1, teen | Erosiekuil 0,30 m diep | 2,3 | 1,46 | 1,50 | | | | | | | 48252 | 27289 | 13963 | | | | | |
| Sectie 2, talud | Begin schade | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | 1020 | 409 | 120 | 25 | | | | | | 1000 | 4,0 |
| Sectie 2, talud | Meerdere locaties kale plekken | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | 3859 | 1642 | 527 | 118 | | | | | | 4000 | 4,0 |
| Sectie 2, teen | Begin schade | 2,3 | 1,46 | 1,20 | | | | 6628 | 3471 | 1485 | 501 | | | | | | 1000 | |
| Sectie 2, teen | Begin schade | 2,3 | 1,46 | 1,00 | | | | 4412 | 1982 | 686 | | | | | | | 1000 | > 4 |
| Sectie 3, talud | Begin schade | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | 8004 | 3883 | 1523 | 469 | | | | | | 1000 | 6,5 |
| Sectie 3, talud | Meerdere locaties kale plekken | 2,3 | 1,46 | 1,00 | | | | 18325 | 9798 | 4350 | 1560 | | | | | | 4000 | 6,0 |
| Sectie 3, teen | Begin schade door trap | 2,3 | 1,46 | 1,20 | | | | 2552 | 1303 | 538 | 174 | | | | | | 1000 | |
| Sectie 3, teen | Begin schade door trap | 2,3 | 1,46 | 1,10 | | | | | 1000 | 374 | | | | | | | | |
| Sectie 3, teen | Begin schade door trap | 2,3 | 1,46 | 1,30 | | | | | 1635 | 733 | | | | | | | | |
| Sectie 3, teen | Begin schade door trap | 2,3 | 1,46 | 1,40 | | | | | | 957 | | | | | | | 1000 | 6,0 |
| Sectie 3, teen | Begin schade door trap | 2,3 | 1,46 | 1,50 | | | | | | | 1208 | 514 | | | | | | |

Tabel 3.4 Belastingfactoren Afsluitdijk (Secties 1 t/m 3)

3.6 België

In België zijn verschillende proeven uitgevoerd ter bepaling van de taludsterkte. Echter geometrische overgangen zijn niet specifiek getoetst/gerapporteerd.

3.7 Tholen

Op basis van 'begin schade talud' en 'meerdere plekken schade talud' is in sectie 4 de gemiddelde U_c van de toplaag gelijk aan 2 m/s (Tabel 3.5). Indien de sterkte van de toplaag nabij de teen ook 2 m/s zou zijn, dan is de belastingfactor te hoog (groter dan 2). Indien de theoretische waarde voor de belastingfactor wordt aangehouden, dan is de sterkte van de toplaag nabij de teen zeer laag; vergelijkbaar met de sterkte van zand. Dit lijkt realistisch, omdat de kwaliteit van de grasbekleding zeer slecht was (fragmentarische graszode).

Op basis van het criterium 'bezwijken talud' is U_c van het talud gelijk aan 4,5 m/s. Indien de bezwijksterkte nabij de teen ook 4,5 m/s bedraagt, dan is de belastingfactor ongeveer 1,3, vergelijkbaar met de theoretische waarde (1,15).

| Sectie | Observatie | Taludhelling $\cot\alpha$ | α_a | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|------------|------------|---|-------|-------|-------|------|---|---|---|---|----|------------------------------|----------------|-----|
| | | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 4, talud | Begin schade talud | 2,4 | 1,45 | 1,00 | | 1096 | 659 | 308 | | | | | | | | 1000 | 2,0 |
| Sectie 4, talud | Meerdere plekken schade | 2,4 | 1,45 | 1,00 | | 4693 | 2998 | 1533 | | | | | | | | 4000 | 2,5 |
| Sectie 4, teen | Meerdere plekken schade | 2,4 | 1,48 | 1,19 | 1856 | 1478 | 975 | 540 | | | | | | | | 4000 | |
| Sectie 4, teen | Meerdere plekken schade | 2,4 | 1,48 | 2,00 | 3205 | 2827 | 2200 | 1572 | | | | | | | | 4000 | <1 |
| Sectie 4, talud | Zakking van het talud door | 2,4 | 1,45 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 4, talud | Bezwaken talud | 2,4 | 1,40 | 1,00 | | 30415 | 21150 | 11968 | 5677 | | | | | | | 7000 | 4,5 |
| Sectie 4, teen | Bezwaken teen | 2,4 | 1,48 | 1,19 | | 17689 | 12659 | 7829 | 4030 | | | | | | | 7000 | |
| Sectie 4, teen | Bezwaken teen | 2,4 | 1,48 | 1,30 | | | | 9411 | 5169 | | | | | | | 7000 | 4,5 |
| Sectie 4, teen | Bezwaken teen | 2,4 | 1,48 | 1,40 | | | | 10902 | 6289 | | | | | | | 7000 | |

Tabel 3.5 Belastingfactoren Tholen (Sectie 4)

Zeer waarschijnlijk was de toplaag nabij de teen lokaal zwakker dan op het talud (Fig. 3.4). De toplaag in Tholen is beduidend zwakker dan de toplaag in Friesland, Kattendijke en St. Philipsland. Dit is verklaarbaar door de slechte graskwaliteit in Tholen, terwijl het gras in Friesland en overige locaties in Zeeland goed was.



Figuur 3.4. Tholen, sectie 4, binnentalud. Bezwaken teen.

3.8 Nijmegen

Op basis van de criteria 'begin schade talud' en 'meerdere plekken schade talud' is de sterkte van de toplaag in sectie 1 gelijk aan $U_c = 4,5$ m/s (Tabel 3.6). 'Begin schade teen' trad later op dan 'begin schade talud'. Omdat de belasting nabij de teen groter is dan op het talud, is U_c nabij de teen groter dan 4,5 m/s (een belastingfactor kleiner dan 1 is niet realistisch). 'Meerdere plekken schade talud' trad tegelijkertijd op met 'begin schade teen'. Dit betekent wederom dat de sterkte nabij de teen groter is, immers door een hogere belasting had meer schade nabij de teen moeten optreden.

| Sectie | Observatie | Talud-helling cot α | α_a | α_M | berekende D (m ² /s ²) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m ² /s ²) | U_c (m/s) | | |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|------------|---|---|---|---|--------|-------|-------|------|------|----|--|----------------|------|-------|
| | | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | | |
| Sectie 1, talud | Begin schade talud | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | | 1487 | 187 | | | | | | | 1000 | 4,5 |
| Sectie 1, talud | Meerdere plekken schade | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | | 4177 | 1003 | | | | | | | 4000 | 4,5 |
| Sectie 1, talud | Bezweken talud bij zijwanden | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | | 8212 | 2226 | | | | | | | | |
| Sectie 1, talud | Bezweken talud | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | | 17627 | 5080 | | | | | | | 7000 | 4,5 |
| Sectie 1 | Begin schade teen | 5,5/1,9 | 1,50 | 1,23 | | | | | 11395 | 4100 | 1116 | | | | | | 1000 | |
| Sectie 1 | Begin schade teen | 5,5/1,9 | 1,50 | 1,00 | | | | | 6387 | 1737 | | | | | | | 1000 | > 4,5 |
| Sectie 1 | Begin schade teen | 5,5/1,9 | 1,50 | 1,15 | | | | | 9890 | 3205 | | | | | | | 1000 | |
| Sectie 2, talud | Begin schade talud | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | | | 6867 | 1818 | 264 | 13 | | | | | 1000 | 5,5 |
| Sectie 2, teen | Begin schade teen | 2,7 | 1,42 | 1,17 | | | | | 11646 | 3713 | 811 | 93 | | | | | 1000 | |
| Sectie 2, teen | Begin schade teen | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | | | 6867 | 1818 | 264 | 13 | | | | | 1000 | > 5,5 |
| Sectie 2, talud | Meerdere plekken schade | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | | | 100449 | 44499 | 13632 | 2885 | | | | | 4000 | 6,5 |
| Sectie 2, teen | Grote schade teen (0,3 m d) | 2,7 | 1,42 | 1,17 | | | | | 73480 | 32523 | 9681 | 1915 | | | | | 4000 | 6,5 |
| Sectie 2, teen | Grote schade teen (0,3 m d) | 2,7 | 1,42 | 1,17 | | | | | 73480 | 32523 | 9681 | 1915 | | | | | 4000 | 6,5 |
| Sectie 3, talud Uc | Begin schade talud | 3,0 | 1,37 | 1,00 | | | | | 12017 | 8717 | 4844 | 1733 | 316 | | | | 1000 | 8,5 |
| Sectie 3, talud Uc | Meerdere open plekken talud | 3,0 | 1,37 | 1,00 | | | | | 22910 | 17960 | 12136 | 6775 | 2808 | | | | 4000 | 8,5 |
| Sectie 3, Uc-proef | Begin schade teen | 3,0 | 1,37 | 1,16 | | | | | 15140 | 11840 | 7940 | 3828 | 1226 | | | | 1000 | |
| Sectie 3, Uc-proef | Begin schade teen | 3,0 | 1,37 | 1,00 | | | | | 12017 | 8717 | 4844 | 1733 | 316 | | | | 1000 | > 8,5 |

Tabel 3.6 Belastingfactoren Nijmegen (Secties 1 t/m 3)

Op basis van 'begin schade talud' en 'meerdere plekken schade talud' is voor sectie 2 de sterkte van de toplaag gemiddeld $U_c = 6$ m/s $(5,5 + 6,5)/2 = 6$ m/s (Tabel 3.6). 'Begin schade teen' en 'begin schade talud' traden tegelijkertijd op. Dit geeft wederom een belastingfactor van 1; de teen is sterker dan talud; zie ook opmerking bij sectie 1.

Een erosiekuil van 30 cm is nog geen falen dus D varieert van 4000 m²/s² tot 7000 m²/s². 'Meerdere plekken schade talud' trad later op dan 'grote schade teen'. Dit is te verwachten mits de sterkte van teen gelijk/groter is dan de sterkte van het talud. Indien wordt aangenomen dat $D < 7000$ m²/s² voor 'grote schade teen' dan geeft een belastingfactor van 1,17 een U_c die voor de teen groter is dan 6 m/s. Dit lijkt realistisch.

Op basis van 'begin schade talud' en 'meerdere open plekken' is de sterkte voor sectie 3 gelijk aan $U_c = 8,5$ m/s. 'Begin schade talud' en 'begin schade teen' traden tegelijkertijd op. Omdat de belasting nabij de teen groter is, is de sterkte nabij de teen groter, zie ook opmerkingen bij secties 1 en 2.

Indien de sterktes van talud en teen hetzelfde zijn, dan wordt een belastingfactor van 1 gevonden. Hieruit blijkt dat de voorspeller voor de belastingfactor conservatief is.

3.9 Millingen

In Millingen aan de Rijn werd niet het binnentalud van de dijk maar het buitentalud beproefd. Omdat nabij de teen geen grasbekleding aanwezig is/was, is er geen validatie van de belastingfactor.

3.10 Synthese

De analyse in dit hoofdstuk toont aan dat de toplaagsterkte (sterkte van het gras tijdens 'begin schade' en 'meerdere kale plekken') en bezwijksterkte (sterkte tijdens falen) verschillend kan zijn. Indien de 'gemeten' belastingfactor groter is dan de theoretische waarde, dan is zeer waarschijnlijk het gras nabij de teen zwakker dan het gras op het talud. Indien deze factor kleiner is dan de theoretische waarde, dan is het gras nabij de teen vermoedelijk sterker. Omdat de sterktes niet altijd gebaseerd zijn op de drie schadecriteria (bezwijken werd niet altijd waargenomen), kunnen de 'gemeten' en 'berekende' belastingfactoren verschillend zijn. Voorbeeld: soms zijn de sterktes van 'begin schade talud' en 'bezwijken teen' gebruikt voor het bepalen van de experimenteel gevonden belastingfactor. Dit leverde niet altijd een eenduidige validatie.

Ook heeft de heterogeniteit van gras mogelijk een rol gespeeld op de grootte van de 'gemeten' belastingfactor; de sterkte van de zwakste locatie op het talud hoeft niet overeen te komen met de sterkte van de zwakste locatie nabij de teen. Recente grastrekproeven hebben aangetoond, dat per sectie de variatiecoëfficiënt van de sterkte 0,6 kan bedragen. Deze waarde wijkt af van het gemiddelde (gemiddelde variatiecoëfficiënt is 0,2), zie ook WTI-2014.

In de analyse is rekening gehouden met omgevingsfactoren, zoals stenen die niet zichtbaar onder het maaiveld lagen en een onderhoudsweg op zand, die de sterkte van het gras aan de teen van de dijk mogelijk anders beïnvloedt.

De proeven op de dijken in Friesland, St. Philipsland en Kattendijke tonen aan, dat de toplaagsterkte op deze locaties groter is dan de bezwijksterkte. Zeer waarschijnlijk is de toplaag van de grasbekleding op deze locaties sterker vanwege een goede graskwaliteit dus door een combinatie van een hoge wortelintensiteit en een kleihoudende zandlaag. Indien voor zowel het talud als de teen of de toplaagsterkte of de bezwijksterkte worden gebruikt en indien met bovengenoemde omgevingsfactoren rekening wordt gehouden, dan varieert de belastingfactor van 1,0 tot ongeveer de theoretische waarde van 1,2.

In Tholen was de graskwaliteit zeer slecht (fragmentarische graszode). Proefondervindelijk is aangetoond dat de toplaagsterkte hier vergelijkbaar is met de sterkte van zand, dus verwaarloosbaar. Op basis van de bezwijksterkte is voor één experiment de validatie uitgevoerd. De berekende waarde is 1,2 en de 'gemeten' waarde is 1,3.

De deklaag op de Afsluitdijk bestaat uit keileem met daarop ca. 0,5 m klei. Er is geen teelaarde aangebracht. Omdat de sterkte een grote spreiding heeft, het varieert van 4 m/s tot ruim 8 m/s, heeft de belastingfactor evenzo een grote variatie; de minimale en maximale waarden bedragen respectievelijk 1 en 2. Daarom is het zinvol om de belastingfactor in relatie tot de toplaagsterkte en de bezwijksterkte nader te analyseren.

Voor Nijmegen is de grootte van de belastingfactor voor de drie beproefde secties kleiner dan de theoretische waarde. In alle gevallen was de teen van de dijk sterker dan het talud.

Dit hoofdstuk bespreekt de belastingfactor voor geometrische overgangen, waarbij de volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

- 1) Toepassing van de overbelastingmethode;
- 2) Sterktes van het talud en de teen van de dijk zijn gelijk.

De sterkte van grasbekledingen varieert als gevolg van de heterogeniteit van grond (structuurvorming) en wortelintensiteit. De mechanismen 'begin schade' en 'schade op meerdere plekken' treden random op en zijn vooraf niet te voorspellen. Met zekerheid kan worden geconcludeerd, dat deze locaties een sterkte vertegenwoordigen, die lager is dan de gemiddelde sterkte. Indien

het talud en/of de teen lokaal bezwijkt (grasbekleding is weg of zandkern ligt bloot) dan is op die plaats de sterkte minimaal.

Omdat tijdens de praktijkproeven 'bezwijken' niet altijd heeft opgetreden, strekt het tot de aanbeveling om de sterktevariatie beter te onderzoeken met grastrek- en wortelproeven (bureaustudies van Alterra die nog in conceptvorm zijn). Bovendien zou het afstudeerverslag van Roel Bijlaard (student bij Infram) inzicht verschaffen in een verbetering van de huidige sterktemodellering. Thans is de sterktemodellering is zeer eenvoudig. Fragmentarische graszode kent geen sterkte en een open/gesloten graszode heeft een minimale sterkte van $U_c = 4$ m/s.

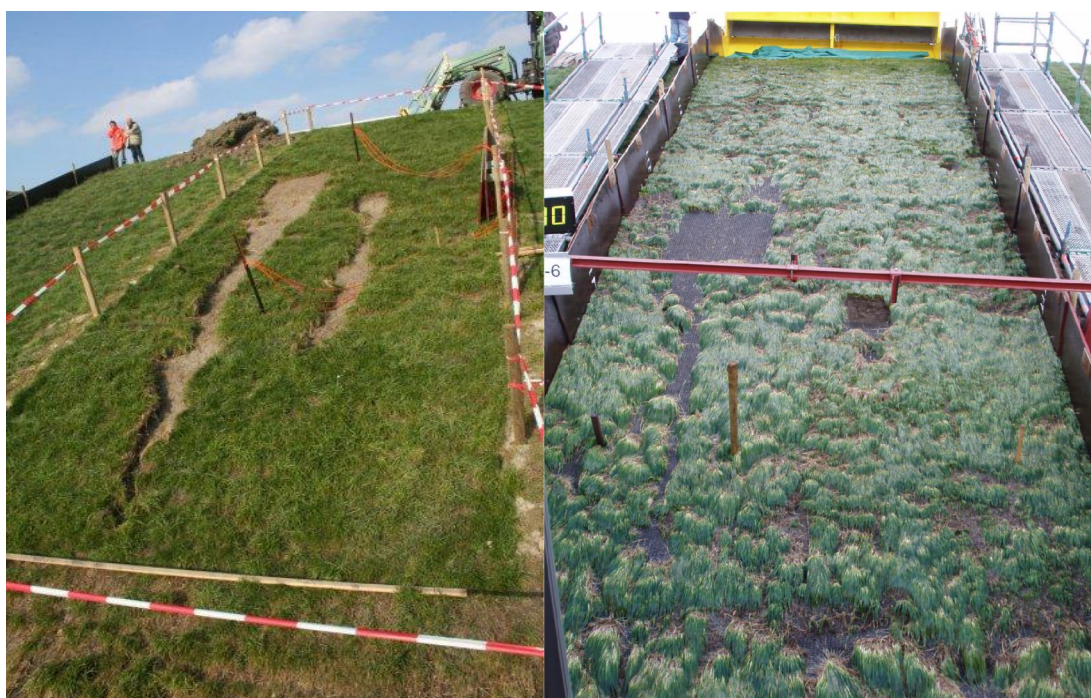
4 Overgangen en overig dijkmeubilair

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft per testlocatie de validatie van overgangen en overig dijkmeubilair zoals trappen, bomen, klinkers op parkeerplaatsen, wegen van doorgroeistenen. Hiervoor wordt de cumulatieve overbelastingsmethode toegepast en de bijbehorende definities voor het schadegetal (zie ook Hoofdstuk 2 en Bijlage A).

4.2 Delfzijl

In Delfzijl zijn geen overgangen getest, wel versterkt gras (met geotextielen). Figuur 4.1 toont de verschillen tussen gras en versterkt gras, nadat in beide secties op het talud initiële schade was aangebracht. Ook met het geotextiel versterkte gras werd het afstropen van gras waargenomen, echter de erosie was daar minder.



Figuur 4.1. Delfzijl. Grastalud. Afstropen van het gras beneden de initiële schade. Links grastalud, rechts met geotextiel versterkt.

4.3 Kattendijke

Door de grond te injecteren met mest (injecteur) neemt de sterkte van het gras (sectie 2) zeer waarschijnlijk af, maar niet noemenswaardig, U_c reduceert van 9,5 m/s (sectie 1) naar 7 m/s (sectie 2) (Tabel 4.1). Open steenasfalt en elastocoast zijn sterk genoeg.

| Sectie | Taludhelling cotα | α_a | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|----------------------------|----------------------|------------|------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------------------------------|----------------|-----|
| | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | | |
| Sectie 1, talud | 3,0 | 1,40 | 1,00 | | | | | | | | 8933 | 3252 | 949 | 206 | 0 - 1000 | 9,5 |
| Sectie 2, schade injecteur | 3,0 | 1,40 | 1,00 | | | | | | | 3141 | 1005 | 225 | | 1000 | 7,0 | |
| Sectie 2, schade injecteur | 3,0 | 1,40 | 1,00 | | | | | | | 9223 | 3532 | | | 7000 | 6,5 | |
| Open steenasfalt | 3,0 | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | | |
| Elastocoast | 3,0 | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | nvt | | |

Tabel 4.1 Belastingfactoren Kattendijke (secties 1 en 2)

4.4 Afsluitdijk

4.4.1 Parkeerplaats

Tijdens de beproeving in sectie 2 trad 'begin schade talud' eerder op (na 1.15 uur in storm 10 l/s per m) dan 'begin schade bestrating' (na 3 uur in 30 l/s per m). Uiteindelijk bezweek de bestrating in het vierde uur van de storm met 30 l/s per m. Op dat moment was de toplaag van het talud nog niet bezweken (Fig. 4.2). Omdat tijdens de proef het talud niet bezweek, is de bestrating ten opzichte van het gras minder sterk. Aanbevolen wordt om de sterkte van klinkers met verschillende stabiliteitsvoorspellers te bepalen en te vergelijken met de sterkte van gras (zie ook paragraaf 3.2 waar stenen de teen van de dijk verzwakten).



Figuur 4.2. Afsluitdijk. Sectie 2. Bezwijken van de klinkerbestrating op zand.

| Sectie | Talud-helling cot α | α_a | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|----------------------|-------------------------------|------------|------------|---|---|---|-------|------|-------|------|---|---|----|------------------------------|----------------|-----|
| | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 2, talud | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | 1020 | 409 | 120 | 25 | | | | | 1000 | 4,0 |
| Sectie 2, talud | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | 3859 | 1642 | 527 | 118 | | | | | 4000 | 4,0 |
| Sectie 2, bestrating | 2,3 | 1,46 | 1,00 | | | | 11369 | 5890 | 2518 | 867 | | | | | 1000 | ? |
| Sectie 2, bestrating | 2,3 | 1,46 | 1,00 | | | | 13687 | 7193 | 3129 | 1098 | | | | | 7000 | 5,0 |
| Sectie 2, bestrating | 2,3 | 1,46 | 1,00 | | | | | | | | | | | 7000 | | |
| Sectie 3, talud | 2,3 | 1,42 | 1,00 | | | | 8004 | 3883 | 1523 | 469 | | | | | 1000 | 6,5 |
| Sectie 3, talud | 2,3 | 1,46 | 1,00 | | | | 18325 | 9798 | 4350 | 1560 | | | | | 4000 | 6,0 |
| Sectie 3, trap | 2,3 | 1,46 | 1,00 | | | | | | 16506 | 7325 | | | | | 7000 | 7,0 |

Tabel 4.2 Belastingfactoren Afsluitdijk (secties 1 en 2)

4.4.2 Trap

Op basis van de criteria 'begin schade talud' en 'meerdere locaties kale plekken talud' is de gemiddelde sterkte in sectie 3 bij benadering gelijk aan $U_c = 6,3$ m/s (Tabel 4.2). Langs de trap trad geen extra belasting op, immers in de stromingsrichting waren geen overgangen (Fig. 4.3). Daarom is de belastingfactor gelijk aan 1. Het gras langs de trap bezwijkt, indien $D = 7000$ m^2/s^2 . Op basis van waarnemingen wordt met een belastingfactor 1 en een sterktefactor van 1 een U_c van 7 m/s gevonden, zie Tabel 4.2. Gezien de grote spreiding in zowel de sterkte als belastingfactoren voor geometrische overgangen (zie paragraaf 3.5) is de orde grootte van zowel de belastingfactor als de sterktefactor in overeenstemming met theoretische achtergronden. Verder wordt opgemerkt dat bij scheve golfval een grotere belastingfactor in rekening moet worden gebracht. Nader onderzoek hiernaar is gewenst.



Figuur 4.3. Afsluitdijk. Sectie 3. Meerdere/grotere kale plekken op het talud.

4.5 Vechtdijk

4.5.1 Doorgroeistenen

Na 23 min. in de zesde storm (50 l/s per m) is in sectie 1 de proef gestopt. Op dat moment lagen overal doorgroeistenen op het talud, terwijl het grastalud nog niet bezweken was (Fig. 4.4). Zeer waarschijnlijk is de belasting op de doorgroeistenen hoger geweest vanwege een overgang/afstap van ongeveer 10 cm. Ten tijde van de proef is het gras in en onder de doorgroeistenen onvoldoende in kaart gebracht. Daarom is er twijfel aangaande het toepassen van de overbelastingmethode voor dit type stenen.

In het ontwerp worden doorgroeistenen op deze manier niet meer toegepast, omdat er nauwelijks sterkte aan ontleend kan worden, alhoewel de meningen hierover verdeeld zijn. Aangezien doorgroeistenen op dijken aanwezig zijn moet de toetsing er iets mee doen. Een mogelijkheid is om ze te vervangen door een overgang waarvan de sterkte is aangetoond. Meer experimenteel onderzoek naar de stabiliteit van deze versterkingen/innovaties is wenselijk (onderzoek is gepland in periode 2015-2017: contactpersoon: Paul van Steeg).

4.5.2 Boom

Na 4 uur in de vierde storm (10 l/s per m) ontstond in sectie 2 de 'eerste schade' op het talud. Op dat moment erodeerde de eerste wortel rondom de boom. Op basis van de criteria 'eerste schade' en 'meerdere locaties kale plekken' varieert de sterkte van het talud van $3,5 \text{ m/s} < U_c < 4,0 \text{ m/s}$ (Tabel 4.3). De proef is na 1 uur in de storm met 50 l/s per m definitief gestopt, omdat headcut erosie nabij de boom optrad (Fig. 4.5). De ontgrondingskuil breidde zich naar boven toe uit. Daarom kan voor het talud op basis van bezwijken geen sterkte worden bepaald. Na 2 uren in de storm met 30 l/s per m waren 'meerdere locaties kale plekken' op het talud waargenomen. Tegelijkertijd was er ook grote erosie rondom de boom waargenomen; het zand van de ondergrond was zichtbaar.

Vanaf dat moment erodeerde zand rondom de boom. Na ruim 5 uur in deze storm (30 l/s per m) werd de bodem rondom de boom bedekt vanwege een oncontroleerbaar mechanisme. Omdat na 2 uur in de storm met 30 l/s per m al zand uitspoelde wordt hier aangenomen, dat dan de boom faalt/zou falen. De berekende belastingfactor voor obstakels is ongeveer 1,4 (zie Bijlage A). Toepassing hiervan met een sterktefactor van 1 geeft $U_c = 4,5 \text{ m/s}$, zie Tabel 4.3. Indien een sterktefactor van 0,9 wordt verrekend, dan is de sterkte ongeveer 4 m/s ($0,9 \times 4,5 \text{ m/s} = 4,0 \text{ m/s}$). Deze waarde komt overeen met de sterkte van het talud, dus de experimenteel gevonden waarde voor de belastingfactor komt overeen met de theorie.



Figuur 4.4. Vechtdijk. Zeeregime met dijkovergang, proef 1; Talud na de proef niet bezweken.



Figuur 4.5. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Gestopt, headcut erosie bovenstrooms van boom

| Sectie | Talud-helling cotα | α_B | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|---------------------------------|-----------------------|------------|------------|---|------|-------|------|------|---|---|---|---|----|------------------------------|----------------|-----|
| | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 1, dijkovergang (gras) | 2.75/7.5/3.8 | 1,36 | 1,00 | | 1029 | 595 | 253 | | | | | | | | 1000 | 2,0 |
| Sectie 1, dijkovergang (gras) | 2.75/7.5/3.8 | 1,36 | 1,00 | | | 6183 | 3024 | | | | | | | | 4000 | 3,5 |
| Sectie 1, dijkovergang (gras) | 2.75/7.5/3.8 | 1,36 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 1, dijkovergang (stenen) | 2.75/7.5/3.8 | 1,30 | | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 1, dijkovergang (stenen) | 2.75/7.5/3.8 | 1,30 | | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 2, boom (gras) | 4,9 | 1,15 | 1,00 | | | 3572 | 1254 | 278 | | | | | | | 1000 | 4,0 |
| Sectie 2, boom (gras) | 4,9 | 1,15 | 1,00 | | | 7722 | 3181 | | | | | | | | 4000 | 3,5 |
| Sectie 2, boom (gras) | 4,9 | 1,15 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 2, boom | 4,9 | 1,20 | 1,00 | | | 9223 | 4105 | | | | | | | | 7000 | |
| Sectie 2, boom, falen | 4,9 | 1,20 | 1,40 | | | 13304 | 9792 | 4600 | | | | | | | 7000 | 4,5 |

Tabel 4.3 Belastingfactoren Vechtdijk (secties 1 en 2)

4.6 België

4.6.1 Overgang tussen bekledingen

In België is op de Durmedijk een overgangsconstructie beproefd, een overgang van een asfaltweg naar gras (Fig. 4.6). Na 4 stormen van elk 2 uren was er geen schade op het talud. Op basis van 'geen schade talud' is de sterkte van de grasbekleding ongeveer gelijk aan $U_c = 6$ m/s (Tabel 4.4). Aansluitend is de proef herhaald. Ook na afloop hiervan werd geen schade op het talud waargenomen. Daarom is uiteindelijk de sterkte van de toplaag iets hoger, namelijk $U_c = 6,5$ m/s.

Nabij de overgang ontstond 'begin van schade', dus de belastingfactor is groter dan 1. Wordt aangenomen dat de belastingfactor gelijk is aan de theoretische waarde (dus 1,7; zie Bijlage A) en wordt geen sterktevermindering in rekening gebracht, dan is de sterkte bij de overgang ongeveer $U_c = 5,5$ m/s, dus lager dan de taludsterkte. De sterktefactor is dan bij benadering $5,5/6,5 = 0,85$. Voor een belastingfactor van 2 geldt $U_c = 6,5$ m/s. In dat geval is de sterktefactor 1.

Indien op de overgang van asfalt naar gras een stap of verhoging aanwezig is, bijvoorbeeld omdat het gras over de asfaltweg heen groeit, dan zal dit leiden tot een grotere belastingfactor. Dit zit nog niet in de huidige modellering, hierop wordt kort teruggekomen in de synthese (paragraaf 4.11).



Figuur 4.6a. Tielrode, België. Durmedijk. Na eerste serie. Begin schade overgang asfaltkruin naar gras. Geen schade aan talud of boom.



Figuur 4.6b. Tielrode, België. Durmedijk. Na alle series. Geringe uitbreiding schade overgang asfaltkruin naar gras. Geen schade aan talud of boom.

| Sectie | Talud- helling $\cot\alpha$ | α_a | α_M | berekende D (m^2/s^3) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^3) | U_c (m/s) |
|----------------------|-----------------------------------|------------|------------|---|---|---|---|------|------|-----|---|---|----|------------------------------|----------------|
| | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| Talud | 3,5 | 1,35 | 1,00 | | | | | 1939 | 421 | | | | | 0 - 1000 | 6,0 |
| Talud | 3,5 | 1,35 | 1,00 | | | | | 3878 | 842 | | | | | 0 - 1000 | 6,5 |
| | | | | sterktefactor = 1 | | | | | | | | | | | |
| Overgang kruin-talud | 3,5 | 1,00 | 1,70 | | | | | 1421 | 268 | | | | | 1000 | 5,5 |
| Overgang kruin-talud | 3,5 | 1,00 | 1,70 | | | | | 2842 | 536 | | | | | 1000 | 5,5 |
| | | | | sterktefactor = 1 | | | | | | | | | | | |
| Overgang kruin-talud | 3,5 | 1,00 | 2,00 | | | | | 2853 | 731 | 122 | | | | 1000 | 6,0 |
| Overgang kruin-talud | 3,5 | 1,00 | 2,00 | | | | | 5706 | 1462 | 244 | | | | 1000 | 6,5 |

Tabel 4.4 Belastingfactoren België (Durmedijk)

4.7 Tholen

4.7.1 Asfaltberm

'Ondermijnen en opdrukken van asfaltberm' treedt in sectie 1 tegelijkertijd op met 'meerdere plekken schade talud' (Fig. 4.7). Omdat het water bij de overgang van ruw (gras) naar glad (asfalt) stroomde, is de belasting op het asfalt lager (althans dit volgt uit de theorie). Figuur 4.7 laat zien, dat nabij de teen meer schade optrad dan op het talud. Dit is verklaarbaar vanwege een hogere belasting (extra centrifugaalkracht) nabij de teen, dus de grotere schade nabij de teen wordt niet door de asfaltberm maar door de geometrische overgang veroorzaakt.

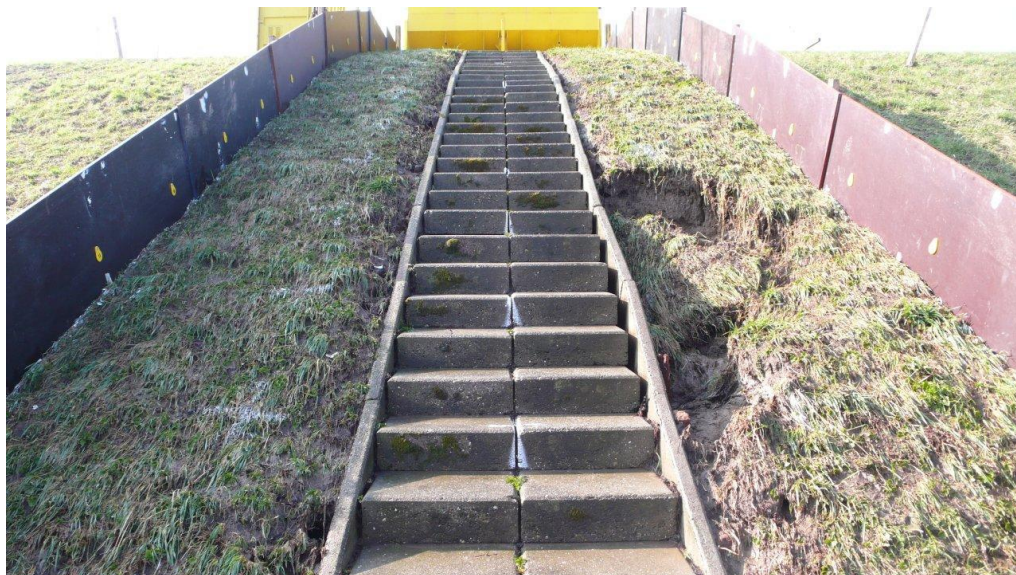
Ook hier geldt dat indien op de overgang van asfalt naar gras een stap of verhoging aanwezig is, bijvoorbeeld omdat het asfalt duidelijk hoger of lager ligt dan het gras, dit zal leiden tot kleinere respectievelijk een grotere belastingfactor. Dit zit nog niet in de huidige modellering, hierop wordt kort teruggekomen in de synthese (paragraaf 4.11).

4.7.2 Trap

In sectie 2 trad 'bezwijken van talud' eerder op (na 2 uur 5 l/s per m) dan 'bezwijken trap' (na 4 uur 5 l/s per m). Dit zou betekenen, dat de toplaag op het talud zwakker is dan de grond naast de trap. Figuur 4.8 toont aan, dat het glijvlak zich uitstrekt tot aan de trap; dus het glijvlak heeft niet alleen betrekking op het talud, maar ook op de traprand. Op basis van de cumulatieve overbelastingsmethode is de sterkte van het talud gelijk aan de kritieke stroomsnelheid van zand; dus verwaarloosbaar (Tabel 4.5). Daarom zou het talud ook eerder (dan de trap) kunnen bezwijken. Op basis van de zeer lage U_c heeft het bepalen van de sterktefactor geen zin, immers er zou dan een schijnnaauwkeurigheid worden nagestreefd.



Figuur 4.7. Tholen. Sectie, buitentalud. Ondermijning en opdrukken asfaltberm. Einde proef. Eveneens meerdere plekken schade aan open talud.



Figuur 4.8. Tholen. Sectie 2, trap. Bezweken talud.

4.7.3 Afrastering en paal

In sectie 3 vond 'bezwijken van het talud' eerder plaats (na ruim 3 uur in 5 l/s per m) dan 'geen schade' nabij de afrastering (na ongeveer 1 uur in 50 l/s per m). Dit is verklaarbaar, omdat het talud nabij de afrastering relatief hoger lag (Fig. 4.9), dus de afrastering kreeg ten opzichte van het talud relatief minder water ofwel een lagere belasting. Ofschoon een belastingfactor kleiner dan 1 te verklaren is, heeft de erosieproef rondom de afrastering onder deze condities geen praktische waarde.

| Sectie | Talud- helling $\cot\alpha$ | α_a | α_M | berekende D (m^2/s^2) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m^2/s^2) | U_c (m/s) | |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|------------|---|------|------|------|------|-----|---|---|---|----|------------------------------|----------------|-----|
| | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 1, buitenttalud | 3,0 | 1,37 | 1,00 | | | | 2221 | 867 | 246 | | | | | | 1000 | 5,0 |
| Sectie 1, buitenttalud | 3,0 | 1,37 | 1,00 | | | | 5004 | 2185 | | | | | | | 4000 | 4,5 |
| Sectie 1, buitenttalud-berm | 3,0 | 1,37 | | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 2, trap | 2,4 | 1,46 | 1,00 | 1495 | 1118 | | | | | | | | | | 4000 | 0,0 |
| Sectie 2, trap | 2,4 | 1,46 | 1,00 | 3772 | 2949 | | | | | | | | | | 7000 | 0,0 |
| Sectie 2, trap | 2,4 | 1,46 | | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 2, trap | 2,4 | 1,46 | | | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 3, afrastering, talud | 2,4 | 1,51 | 1,00 | | 3231 | 2117 | 1132 | | | | | | | | 1000 | 4,0 |
| Sectie 3, afrastering, talud | 2,4 | 1,40 | 1,00 | 3706 | 2829 | 1731 | | | | | | | | | 4000 | 0,5 |
| Sectie 3, afrastering, talud | 2,4 | 1,40 | 1,00 | 4747 | 3647 | 2246 | | | | | | | | | 7000 | 0,0 |

Tabel 4.5 Belastingfactoren Tholen (secties 1 en 2)



Figuur 4.9. Tholen. Sectie 3, afrastering. Bezweken talud.

Op basis van 'eerste schade talud' is de sterkte van het talud in sectie 3 gelijk aan $U_c = 4$ m/s (Tabel 4.5). De sterkte voor 'meerdere plekken schade talud' en 'bezwijken talud' is $U_c < 0,5$ m/s, dus vergelijkbaar met de sterkte van zand/puin. 'Bezwijken van talud' startte eerder (na ruim 3 uur in 5 l/s per m) dan 'bezwijken paal' (na bijna 1 uur in 50 l/s per m). Dit lijkt niet realistisch, omdat onder normale omstandigheden de paal meer wordt belast. Ook de paal lag relatief hoger dan het talud en heeft daarom net als de afrastering een lagere belasting gekregen, dus ook de erosieproef rondom de paal heeft geen praktische waarde, zie ook de hierboven gemaakte opmerking.

4.8 Nijmegen

4.8.1 Sterktefactor

Op basis van drie verschillende schadecriteria is de gemiddelde sterkte van het talud in sectie 1 gelijk aan $U_c = 4,5$ m/s (Tabel 4.6). Op basis van 'bezwijken talud' is U_c gelijk aan $U_c = 4,8$ m/s. Het talud langs de zijwand (Fig. 4.10) faalde eerder (na 2,5 uur in 50 l/s per m) dan het talud (na afloop van 50 l/s per m) ofwel de sterkte langs de zijwand was minder groot dan de sterkte van het talud. Het effect van de zijwand wordt theoretisch in de sterktefactor meegenomen. Voor bezwijken geldt: $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Toepassing geeft voor 'bezweken talud bij zijwand' een experimentele sterkte van $U_c = 4,2$ m/s, dus de sterktefactor is ongeveer gelijk is aan 0,88 ($U_c = 0,88 \times 4,8 = 4,2$) en valt binnen de theoretische range (0,8 – 1,0).



Figuur 4.10. Nijmegen, sectie 1. Bezwijken grastalud langs en onder de geleiding.

Na afloop van de storm met 50 l/s per m werd 'begin schade langs betonnen wand' waargenomen (Fig. 4.11). Toepassing van een sterktefactor van 1 geeft voor $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ een $U_c = 4,5 \text{ m/s}$. Hoewel deze waarde van de sterkte hoger is dan de toplaagsterkte ($U_c = 4,0 \text{ m/s}$) van het talud, zijn de verschillen marginaal.

Op basis van de criteria 'begin schade talud' en 'meerdere plekken schade' is in sectie 2 de gemiddelde sterkte van het talud gelijk aan $U_c = 6 \text{ m/s}$ ($(5,5 + 6,5)/2 = 6 \text{ m/s}$; Tabel 4.6). 'Begin schade naast wand' (na afloop van 10 l/s per m) trad ten opzichte van 'begin schade talud' (na 2 uur in storm 50 l/s per m) eerder op, dus de belasting naast de wand was groter, zie ook Fig. 4.12. Voor een rechthoekig schot bedraagt de belastingfactor 1,7 (zie Bijlage A). Toepassing hiervan in combinatie met een sterktefactor van 0,9 geeft een gemiddelde sterkte van $U_c = 6 \text{ m/s}$. Voor 'begin schade' wordt afgeleid $U_c = 6,5 \text{ m/s}$ en voor bezwijken $U_c = 5,5 \text{ m/s}$. Dit betekent dat de 'gemeten' belasting factor overeenkomt met de berekende belastingfactor.



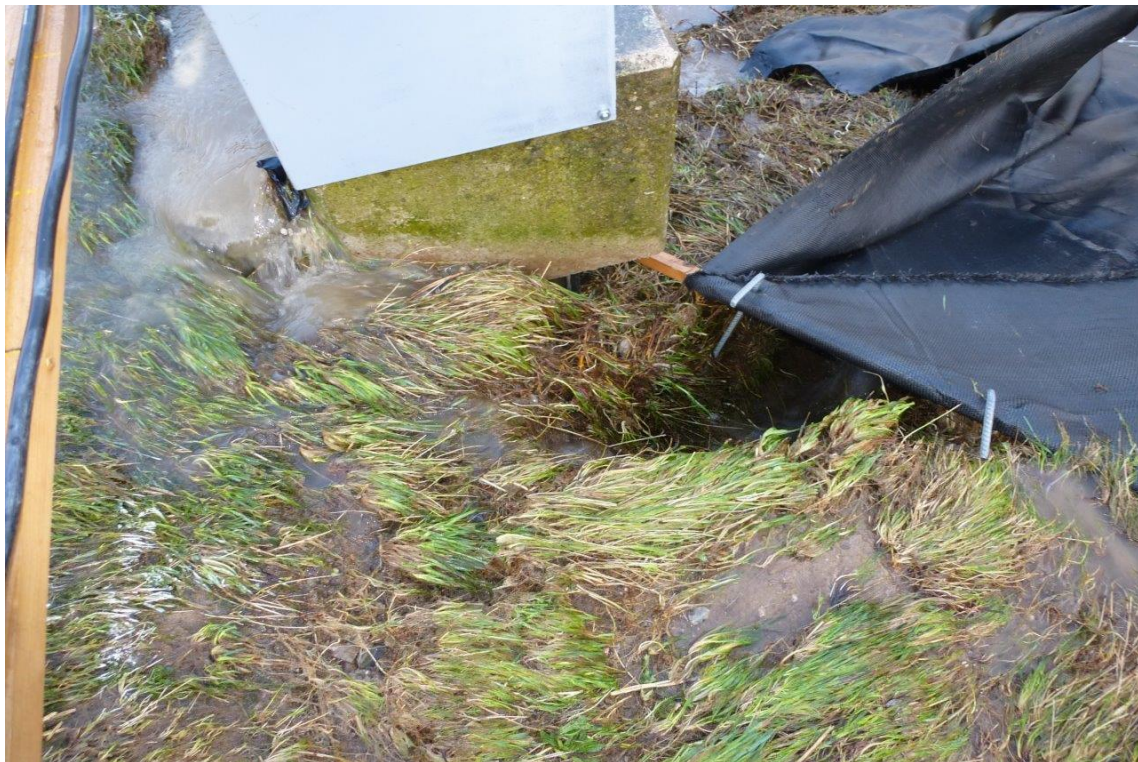
Figuur 4.11. Nijmegen, sectie 1. Begin schade langs betonnen rand.

| Sectie | Talud-helling cotα | α _a | α _M | berekende D (m ² /s ²) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m ² /s ²) | U _c (m/s) | |
|-----------------------------|-----------------------|----------------|----------------|---|---|--------|--------|-------|-------|------|---|---|----|--|-------------------------|-----|
| | | | | Kritieke snelheid U _c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 1, talud | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | 1487 | 187 | | | | | | | 1000 | 4,0 |
| Sectie 1, talud | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | 4177 | 1003 | | | | | | | 4000 | 4,0 |
| Sectie 1, talud | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | 17627 | 5080 | | | | | | | 7000 | 4,8 |
| Sectie 1, talud bij zijwand | 5,5/1,9 | 1,42 | 1,00 | | | | 8212 | 2226 | | | | | | | 7000 | 4,2 |
| Sectie 1, betonnen rand | 5,5/1,9 | 1,10 | 1,00 | | | | 2360 | 151 | | | | | | | 1000 | 4,5 |
| Sectie 2, talud | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | | 6988 | 1823 | 264 | 13 | | | | | 1000 | 5,5 |
| Sectie 2, talud | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | | 100570 | 44804 | 13632 | 2885 | | | | | 4000 | 6,5 |
| | | | | sterktefactor = 1 | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | 6337 | 1608 | 192 | | | | | | | 1000 | 4,5 |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | 12516 | 4298 | | | | | | | | 7000 | 3,5 |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,00 | | | 161566 | 100570 | | | | | | | | | |
| | | | | sterktefactor = 1 | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,70 | | | 20484 | 9997 | 3581 | 855 | | | | | | 1000 | 6,0 |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,70 | | | | | 9133 | 3233 | | | | | | 7000 | 5,5 |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,70 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | sterktefactor = 0,9 | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,70 | | | | | 4822 | 1400 | 252 | | | | | 1000 | 6,5 |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,70 | | | | | 11650 | 4545 | | | | | | 7000 | 5,5 |
| Sectie 2, betonnen wand | 2,7 | 1,42 | 1,70 | | | | | | | | | | | | | |

Tabel 4.6 Belastingfactoren Nijmegen (secties 1 en 2)



Figuur 4.12a. Nijmegen, sectie 2. Begin schade naast wand.



Figuur 4.12b. Nijmegen, sectie 2. Bezweken talud naast wand.

4.9 Millingen aan de Rijn

4.9.1 Overgang tussen bekledingen

Op basis van 'begin schade talud' is de sterkte van het talud in sectie 1 gelijk aan $U_c = 6,5$ m/s (Tabel 4.7). Helaas werd 'schade meerdere kale plekken' en 'falen grasbekleding' niet bereikt.

In het algemeen wordt de cumulatieve overbelasting D bij 'falen grasbekleding' gezien als de meest betrouwbare schatter. In de criteria voor 'begin schade' en 'schade op meerdere plekken' blijkt in de waarnemingen veel meer spreiding te zitten. In het geval van Millingen is de afwijking vrij extreem, daarom wordt in dit geval uitgegaan van een gemiddelde.

Bij de waarneming 'begin schade' (theoretisch $D=1000$ m²/s²), hoort een kritische snelheid van 2 m/s (eerste regel tabel 4.7, sectie 1). Bij de waarneming 'schade op meerdere plekken' (theoretisch $D=4000$ m²/s²), hoort een kritische snelheid van 3 m/s (2^{de} regel tabel 4.7, sectie 1). Bij de waarneming 'falen grasbekleding' (theoretisch $D=7000$ m²/s²), hoort een kritische snelheid van 4,5 m/s (3^{de} regel tabel 4.7, sectie 1). Hieruit volgt gemiddeld een sterkte van $(2 + 3 + 4,5)/3 = 3,2$ m/s. Een en ander er vanuit gaande dat de belastingfactor voor de overgang (Fig. 4.13) gelijk is aan de theoretische waarde (dus 1,7).

Wordt aangenomen dat de belastingfactor maximaal is; dus belastingfactor is gelijk aan 2, dan is de gemiddelde sterkte van het gras naast de asfaltweg ongeveer 4 m/s $(3 + 3,5 + 5,5)/3 = 4,0$ m/s. Hier wordt dus de (gemiddelde) sterkte van de drie verschillende schadecriteria beschouwd.

| Sectie | Talud-helling cotα | α_a | α_M | berekende D (m ² /s ²) (cumulatieve overbelasting) | | | | | | | | | | gemeten D (m ² /s ²) | U_c (m/s) | |
|----------------------------|-----------------------|------------|------------|---|---|------|-------|-------|------|---|---|---|----|--|----------------|-----|
| | | | | Kritieke snelheid U_c (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| Sectie 1, talud | 3,0 | 1,40 | 1,00 | sterktefactor = 1 | | | | | | | | | | 1000 | 6,5 | |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 1,70 | | | 615 | 63 | 0 | | | | | | | 1000 | 2,0 |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 1,70 | | | 3924 | 707 | 42 | | | | | | | 4000 | 3,0 |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 1,70 | | | | 19338 | 4681 | | | | | | | 7000 | 4,5 |
| | | | | sterktefactor = 0,8 | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 1,70 | | | 1024 | 192 | 11 | 0 | | | | | | 1000 | 3,0 |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 1,70 | | | 5803 | 1610 | 226 | 7 | | | | | | 4000 | 3,5 |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 1,70 | | | | 29460 | 10228 | 2448 | | | | | | 7000 | 5,5 |
| | | | | sterktefactor = 1 | | | | | | | | | | | | |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 2,00 | | | 1062 | 174 | 6 | 0 | | | | | | 1000 | |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 2,00 | | | 6202 | 1552 | 180 | 10 | | | | | | 4000 | |
| Sectie 1, asfaltverharding | 3,0 | 1,00 | 2,00 | | | | | 9907 | 2082 | | | | | | 7000 | 5,5 |

Tabel 4.7 Belastingfactoren Millingen (sectie 1)



Figuur 4.13 Millingen, sectie 1. Asphaltverharding ondermijnd. Bezweken situatie.

Indien de belastingfactor 1,7 is en indien een sterktefactor van 0,8 wordt toegepast, dan is op basis van alleen 'bezijken' de sterkte van gras nabij de overgang ongeveer $U_c = 5,5$ m/s. Deze waarde is hoger en nadert de sterkte van het talud ($U_c = 6,5$ m/s). Indien de belastingfactor gelijk is aan 2 en wordt geen sterktevermindering in rekening gebracht dan wordt ook een $U_c = 5,5$ m/s afgeleid. Voor de overgangsconstructie in Millingen varieert de belastingfactor van 1,7 tot 2,0. De bijbehorende sterktefactor ligt in de range van 0,8 tot 1,0.

4.10 Noord Beveland

4.10.1 Overgang tussen bekledingen

In de winterperiode van 2014 is in Colijnsplaat een overgangsconstructie getoetst, een overgang van bekleding naar gras, dus gelijksoortig als in België en Millingen. Echter deze overgang werd niet door golfoverslag, maar door golfoploop belast. Het toepassen van de cumulatieve overbelastingsmethode geeft voor 'begin schade talud' een sterkte van minstens 8 m/s (dus $U_c > 8$ m/s). Aannemende dat $U_c = 8$ m/s en wordt rekening gehouden met een sterktefactor van 1, dan resulteert dit in: belastingfactor = 1,05 en $D = 869$ m²/s² (Tabel 4.8). Omdat de sterkte niet precies bepaald kan worden, kan de belastingfactor in relatie tot de sterktefactor ook niet exact worden vastgesteld.

Indien wordt aangenomen dat $U_c = 9$ m/s en sterktefactor = 1, dan is de belastingfactor ongeveer 1,35. Is U_c groter dan 9 m/s, dit is niet uitgesloten omdat de toplaagsterkte in Kattendijke ook een sterkte had van $U_c = 9,5$ m/s (zie paragraaf 3.4), dan is de belastingfactor groter dan 1,35. De theoretische waarde varieert van 1,7 tot 2,0; zie ook paragrafen 4.6 en 4.9. Omdat de 'gemeten' waarde van de belastingfactor niet bepaald kan worden, heeft geen validatie plaats kunnen vinden. Nader onderzoek hiernaar is wenselijk.

| | | $U_c=7$ m/s | $U_c=8$ m/s | $U_c=9$ m/s |
|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| α_M | α_S | | | |
| 1.00 | 1.00 | 6773 | 0 | 0 |
| 1.05 | 1.00 | 9440 | 869 | 0 |
| 1.10 | 1.00 | 12710 | 2034 | 0 |
| 1.15 | 1.00 | 16641 | 3228 | 0 |
| 1.20 | 1.00 | 21285 | 4658 | 0 |
| 1.30 | 1.00 | 32895 | 8558 | 428 |
| 1.40 | 1.00 | 47842 | 14097 | 2756 |
| 1.50 | 1.00 | 66014 | 21561 | 5317 |
| 1.60 | 1.00 | 85969 | 31203 | 8844 |

Tabel 4.8 Berekeningsresultaten van belastingfactoren en schadegetallen (zie derde en vijfde kolom) (WTI-2014)

4.11 Synthese

Ook voor het beoordelen van de erosiebestendigheid van overgangen in bekledingen en overig dijkmeubilair is niet altijd uitgegaan van gelijke sterktes. Ook hier heeft de analyse aangetoond dat de toplaagsterkte (sterkte van het gras tijdens 'begin schade' en 'meerdere kale plekken') en bezwijksterkte (sterkte tijdens falen) verschillend kunnen zijn. Mogelijkerwijs heeft de graskwaliteit, de samenstelling van de ondergrond en heterogeniteit van gras een rol gespeeld (zie ook paragraaf 3.10 en Hoofdstuk 5 waar algemene conclusies en aanbevelingen worden gegeven).

Op basis van enkele praktijkproeven is inzicht verkregen in de belastingfactoren voor overgangen en obstakels op dijken. Omdat dit een fractie is van wat werkelijk op dijken wordt aangetroffen wordt aanbevolen om de nuanceverschillen in overgangen/obstakels nader te duiden en of dit leidt tot een hogere of lagere waarde van de standaardwaarde voor de belastingfactor, zie ook bijlage A waar meer informatie over de standaardwaarden wordt gegeven.

Verder strekt het tot de aanbeveling om toetschema's op te stellen voor doorgroeistenen en klinkers.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Geometrische overgangen

De validatie met betrekking tot de belastingfactor voor geometrische overgangen varieert van 1,0 tot 1,2 (is ongeveer de theoretische waarde) en is dus conservatief en dus voldoende, behoudens voor de Afsluitdijk waar meer gedetailleerd onderzoek vereist is (zie ook paragrafen 3.5 en 3.10). Verder wordt opgemerkt dat voor overgangen met een afgeronde/geleidelijke vorm de belastingfactor zeer waarschijnlijk gelijk is aan 1. Echter deze hypothese dient nog wel met experimenten te worden gevalideerd.

5.2 Overgangen tussen bekledingen

In België en in Millingen aan de Rijn zijn overgangen op golfoverslag getoetst. Het water stroomde van de kruinweg (asfalt; glad) naar het gras (ruw). In België is de belastingfactor bepaald op basis van 'begin schade overgang' en in Millingen op basis van 'bezwijken overgang'. Deze validatie heeft aangetoond dat de 'gemeten' belastingfactor voor beide proeven varieert van 1,7 tot 2,0; dus conform theorie.

Kruin- en onderhoudswegen op en langs dijken zijn vaak gefundeerd op zand en puin. Het invloedsgedebiet van de fundering beperkt zich niet alleen tot de weg, maar ook tot de wegberm. Omdat de grasbekleding langs de wegranden zandiger is dan op de dijk zelf, is de sterkte daar minder groot. Deze studie heeft aangetoond dat de sterktefactor voor dit type weg in de range ligt van 0,8 tot 1,0.

In Noord-Beveland zijn ook overgangen beproefd; van asfalt naar gras en van steenzettingen naar gras. Zij werden niet door golfoverslag maar door golfoploop belast. Omdat de sterkte van de grasbekleding niet precies te bepalen is, er kan alleen een indicatie worden gegeven groter dan 8 m/s, heeft geen validatie van de belasting- en sterktefactoren plaats kunnen vinden. Nader onderzoek hiernaar is wenselijk.

Verschillende proeven hebben aangetoond dat klinkers en stenen de grasbekleding lokaal verzwakken (b.v. nabij de teen van de Boonweg). Op de Afsluitdijk is een parkeerplaats beproefd, waarbij het water van het gras (ruw) naar stenen (glad) stroomde. Hoewel dit een belastingreductie op de klinkers geeft, bezweken de stenen eerder dan het gras op het talud. Aanbevolen wordt om de stabiliteit van klinkers nader te analyseren.

Op dit moment is er twijfel over het bepalen van de sterkte van doorgroeistenen met de cumulatieve overbelastingmethode. Op de Vechtdijk is niet aangetoond of wortels door de openingen van de doorgroeistenen groeiden en zich in de ondergrond verankerden. Nader onderzoek hiernaar wordt aanbevolen.

5.3 Bomen en obstakels

De afrastering en de paal in Tholen (sectie 2) hebben geen doelmatige validatie opgeleverd, omdat deze obstakels ten opzichte van het talud een lagere belasting kregen. De 'gemeten' en de berekende belastingfactoren komen overeen met de waarden voor de boom op de Vechtdijk (belastingfactor voor een boom (= rond obstakel) is 1,4). Het schot in Nijmegen geeft een belastingfactor van 1,7 conform de theorie. Voor zowel de boom als het schot is rekening gehouden met een sterktereductie. Ofschoon twee experimenten een goede validatie hebben opgeleverd, is de basis ervan smal. Daarom wordt aanbevolen om meerdere proeven uit te voeren ter verkrijging van een gedragen validatie.

5.4 Wanden en trappen

Proeven in Nijmegen hebben aangetoond dat wandeffecten, bijvoorbeeld langs een betonnen wand, met een sterktefactor variërend van 0,8 – 1,0 gemodelleerd kunnen worden.

Tijdens de beproevingen van 2007 tot 2014 is de sterkte van gras langs twee trappen voor golf-overslag getoetst, te weten op de Afsluitdijk en in Tholen. De belastingfactor langs de trap is gelijk aan 1, omdat de stromingsrichting evenwijdig aan de trap was. Indien er scheve golfaanval is, dan dient wel met een grotere belastingfactor dan 1 te worden gerekend. Omdat het gras naast de trap in Tholen nagenoeg geen sterkte had, heeft geen goede validatie plaats kunnen vinden.

In deze analyse zijn trappen niet gevalideerd, immers er was geen voorschrift voor het beoordelen hiervan. Daarom wordt aanbevolen om een belastingfactor van 1 en de bijbehorende sterktefactor (langs trapwanden) voor meerdere trappen te valideren. Evenzo zou de invloed van scheve golfaanval nader geanalyseerd moeten worden.

5.5 Samenvattende conclusies

Op basis van een krachtenbalans is de cumulatieve overbelastingsmethode afgeleid en gevalideerd voor verschillende experimenten (zie ook WTI-2014), waardoor het inzicht in de erosiebestendigheid van gras sterk is toegenomen. De validatie met betrekking tot de belastingfactor voor geometrische overgangen is conservatief (dus voldoende), behoudens voor de Afsluitdijk. Omdat de 'gemeten' sterktefactor in de range van 0,8 tot 1,0 ligt, dus binnen de theoretische onder- en bovengrenzen is de validatie van de sterktefactor voldoende.

Voor overgangen en overig dijkmeubilair is de validatie onvoldoende. Omdat nabij overgangen de belasting met een factor twee kan toenemen en omdat ook rekening gehouden moet worden met een sterktevermindering zijn dit zwakke schakels in en op dijken. Het implementeren van de beschikbare engineering tools (zie Bijlage A) in het WTI wordt aanbevolen mits hiervoor een bovengrens wordt gehanteerd. Voor het verkrijgen van een beter inzicht in de veiligheid van het achterland zijn nader experimenteel onderzoek en aanvullende validatiestudies vereist. Verder wordt ook aanbevolen om aandacht te besteden aan het versterken van overgangen (zie projectplan van Paul van Steeg)

5.6 Samenvattende aanbevelingen

Deze rapportage bespreekt de belastingfactoren voor geometrische overgangen, overgangen tussen bekledingen en bomen en obstakels. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- 1) Toepassing van de overbelastingsmethode;
- 2) Sterktes van het talud en de teen van de dijk zijn gelijk.

De sterkte van grasbekledingen varieert als gevolg van de heterogeniteit van grond (structuurvorming) en wortelintensiteit. De mechanismen 'begin schade' en 'schade op meerdere plekken' treden random op en zijn vooraf niet te voorspellen. Met zekerheid kan worden geconcludeerd, dat deze locaties een sterkte vertegenwoordigen, die lager is dan de gemiddelde sterkte. Indien het talud en/of de teen lokaal bezwijkt (grasbekleding is weg of zandkern ligt bloot) dan is op die locatie de sterkte minimaal.

Omdat tijdens de praktijkproeven 'bezwijken' niet altijd heeft opgetreden, strekt het tot de aanbeveling om de sterktevariatie beter te onderzoeken met grastrek- en wortelproeven (bureaustudies van Alterra die nog in conceptvorm zijn). Bovendien zou het afstudeerverslag van Roel Bijlaard (student bij Infram) inzicht verschaffen in een verbetering van de huidige sterktemodellering.

Thans is de sterktemodellering is zeer eenvoudig. Fragmentarische graszode kent geen sterkte en een open/gesloten graszode heeft een minimale sterkte van $U_c = 4$ m/s.

Op basis van enkele praktijkproeven is inzicht verkregen in de belastingfactoren voor overgangen en obstakels op dijken. Omdat dit een fractie is van wat werkelijk op dijken wordt aangetroffen wordt aanbevolen om de nuanceverschillen in overgangen/obstakels nader te duiden en of dit leidt tot een hogere of lagere waarde van de standaardwaarde voor de belastingfactor, zie ook bijlage A waar meer informatie over de standaardwaarden wordt gegeven.

6 Referenties

- Van der Meer, J.W., 2014. Samenvatting kengetallen en resultaten golfoverslag- en golfoploopproeven. (Conceptvorm).
- WTI-2014. Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium, Product 5.12 Analyse graserosie in olopzone en golfoverslagzone, Auteurs: Jentsje van der Meer, Gijs Hoffmans, Andre van Hoven, project: 1209437-005, Deltares, Delft.

Geraadpleegde Literatuur

- Deltares, 2008. Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 2B Predictie Boonweg, Projectnummer CO-423891/57, Auteurs: ir. A. van Hoven, ir. H. Verheij.
- Deltares, 2008. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 2C Proefuitvoering Boonweg – afschuifproef, Projectnummer 423893 (zie ook Infram 2008, Factual Report Afschuifproef Friese-Waddenzeedijk nabij de Boonweg, 08i037, versie 2.0, 01-12-2008).
- Deltares, 2008. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 5D Evaluatie Zeeland, Projectnummer 423893. Auteur: A. van Hoven.
- Deltares, 2009. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 2A Modelontwikkeling Boonweg, Projectnummer 1001187-000-GEO-0001, Auteurs: ir. A. van Hoven, ir. H. Verheij, dr. ir. J.W. van der Meer.
- Deltares, 2009. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 2D Evaluatie Boonweg, Projectnummer 1001189-014. Auteurs: Andre van Hoven, Henk Verheij, Jentsje van der Meer, Gosse Jan Steendam.
- Deltares, 2009. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 3A Modelaanpassing Afsluitdijk, Projectnummer: 1001189-015, Auteurs: Henk Verheij, Andre van Hoven, Jentsje van der Meer, Gosse Jan Steendam.
- Deltares, 2009. SBW-Golfoverslagproeven, Factual report grondonderzoek Afsluitdijk, Projectnummer 1001189-010, auteur: Ronald van Etten.
- Deltares, 2009. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 3B Predictie Afsluitdijk, Projectnummer 1001189, Auteurs: Andre van Hoven, Henk Verheij, Jentsje van der Meer.
- Deltares, 2010. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 3D Evaluatie Afsluitdijk, Projectnummer 1200259-010, Auteurs: Henk Verheij, Gijs Hoffmans, Gosse Jan Steendam, Jentsje van der Meer, Andre van Hoven.
- Deltares, 2010. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 4A Modelontwikkeling Vechtdijk, Projectnummer 1201541-000, Auteurs: Andre van Hoven, Gijs Hoffmans, Henk Verheij, Gert Jan Akkerman, Jentsje van der Meer.
- Deltares, 2010. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 4B Predictie Vechtdijk, Projectnummer 1201541-000, Auteurs: Andre van Hoven, Gijs Hoffmans, Henk Verheij, Gert Jan Akkerman, Jentsje van der Meer.
- Deltares, 2010. SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 4D Evaluatie Vechtdijk, Projectnummer 1201541-000, Auteurs: Jentsje van der Meer, Henk Verheij, Andre van Hoven.
- Deltares, 2013. Evaluation and Model Development Grass Erosion Test at the Rhine dike, Projectnummer 1207811-002, Auteurs: Andre van Hoven, Henk Verheij, Gijs Hoffmans, Jentsje van der Meer.
- Deltares, 2013. SBW Wave overtopping and grass cover strength, Predictions of Prototype Tests Nijmegen Millingen aan de Rijn, Projectnummer 1206016-007, Auteurs: Gijs Hoffmans (Deltares), Jentsje van der Meer (Van der Meer Consulting), Joep Frissel (Alterra), Maurice Paulissen (Alterra), Henk Verheij (Deltares), Gosse Jan Steendam (Infram).
- GeoDelft, 2007. Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 1D Evaluatie Delfzijl, Projectnummer CO-423891.0035, Auteurs: dr. ir. J.W. van der Meer, ir. G.J. Akkerman, ir.

- H.J. Ver-heij, ing. J.Y. Frissel, ir. G.J. Steendam.
- Infram, 2008. Factual Report Golfverslagproeven Zeeuwse zeedijken, Projectnummer 08i011, auteurs: ing. J.J. Bakker, ir. R.J.C. Mom, ir. G.J. Steendam.
- Infram, 2009. Factual Report Overslagproeven en afschuifproef Afsluitdijk, Projectnummer 09i002, Auteurs: ing. J.J. Bakker, ir. R.J.C. Mom, ir. G.J. Steendam.
- Infram, 2010. Factual Report Overslagproef Vechtdijk, Projectnummer 09i068, Auteurs: ing. J.J. Bakker, ir. A.A. Galema, ir. R.J.C. Mom, ir. G.J. Steendam.
- Infram, 2011. Factual Report, Overslagproeven en oplooppoef Tholen. Projectnummer 10i092. Auteurs: ing. J.J. Bakker, ir. R.J.C. Mom, ir. G.J. Steendam, dr. ir. J.W. van der Meer.
- Infram, 2011. Verslag Golfverslagproeven Tielrode. Projectnummer 08i082. Auteur: ir. G.J. Steendam.
- Infram, 2013. Factual Report: Overslagproeven Rivierenland, Projectnummer: 12i071, Auteurs: ing. J. Bakker, ing. R. Melis, ir. R. Mom.
- Peeters, P.; De Vos, L.; Vandevoorde, B.; Mostaert, F. (2012). Stabiliteit van de grasmat bij golfverslag: Golfverslagproeven Tielrodebroek. Versie 1_3'. WL Rapporten, 713_15b. Waterbouwkundig Laboratorium, INBO en afdeling Geotechniek: Antwerpen, België.

A Cumulative Overload method

A.1 Introduction

This appendix describes the cumulative overload method and the extensions to represent a load increase (or load decrease), for example, due to transitions and a strength reduction, for instance, at edges of objects (see also Hoffmans et al. 2014).

A.2 Cumulative overload method

The force balance (force is proportional to U^2 where U is the flow velocity) is used which can be written as (also known as the cumulative overload method:)

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

where no damage is defined as $0 < D < 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$, initial damage as $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$, damage at various locations as $D = 4000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ and dike failure as $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$. In Eq. 1 D is the damage number, U_i is the representative flow velocity of the overtopping wave, U_c is the critical (depth-averaged) flow velocity, N is the number of the waves in which $U_i > U_c$. The damage number is determined by considering the number of waves and the flow velocities of the largest wave volumes as well as from observations after the hydraulic measurements. As the critical flow velocity for a good grass revetment is higher than 3.5 m/s the largest waves contribute more to the erosion than the smaller ones. To include the effects of transitions and obstacles on dikes Eq. 1 is modified

$$\sum_{i=1}^{N_1} (\alpha_M U_{i,crest}^2 - \alpha_s U_c^2) = D \quad \text{for } \sqrt{\alpha_M} U_{i,crest} > \sqrt{\alpha_s} U_c \quad (2)$$

where N_1 represents the number of waves where $(\alpha_M)^{0.5} U_{i,crest} > (\alpha_s)^{0.5} U_c$, α_M is the load factor and α_s is the strength factor. The first term on the left side is a measure for the load and the second term represents the measure for strength. Equation 2 represents a hypothesis which is evaluated with prototype experiments. For overtopping waves the flow velocity ($U_{i,crest}$) at the transition of the crest of the dike to the landward slope can be approximated by (WTI-2013)

$$U_{i,crest} = 4.5V_i^{0.3} \quad (3)$$

where V is the wave volume (expressed in m^3) and the coefficients 4.5 and 0.3 are dimensional. The flow on the landward slope accelerates depending on the initial flow velocity, the slope angle and the roughness, and can be computed with the model as developed by Schüttrumpf and Oumeraci (2005).

A first estimation can be given with α_a as an acceleration factor by (see also WTI-2014 for more details)

$$U_{i,slope} = \alpha_a U_{i,crest} \quad (4)$$

A.3 Revetment transitions

When the wave flow is directed from a smooth to a rough bed the load increases. In the direction from rough to smooth bed the load decreases. These effects are expressed here by a load factor. The damage at revetment transitions can be predicted by the cumulative overload method in which the load is corrected by the load factor.

As the flow at transitions is complex some assumptions are made. In the analysis the following starting points are used for modelling the load at (dike) transitions between revetments with different roughness, perpendicular to the general flow direction

- Load increase is modelled by a down-flow and is determined from the flow velocities outside the internal boundary layer at a vertical distance $\delta = 0.3h$;
- Effects of eddies and turbulence are neglected;
- Bed shear velocity is computed by using the Shields approach;
- Nikuradse roughness is proportional to the particle diameter;
- Longitudinal flow velocity as a function of the vertical is modelled by a log-function;
- Manning coefficient is used for predicting the roughness of the revetments at the transition, as this coefficient is broadly accepted in hydraulic engineering.

When the flow is directed from a smooth to a rough revetment the load factor (α_M) can be written as (complete derivation is given in WTI-2013)

$$\alpha_M = 2 - \left(\frac{n_{M,s}}{n_{M,r}} \right)^6 \left(\frac{\ln \frac{10h}{(8\sqrt{g}n_{M,s})^6}}{\ln \frac{10h}{(8\sqrt{g}n_{M,r})^6}} \right)^2 \quad (5)$$

where g is the acceleration of gravity, h is the flow depth and n_M is the Manning coefficient (subscripts r and s refer to rough bed and smooth bed).

Hence, the load factor varies from 1 (no transition) to 2 (extreme roughness difference at transition). When the flow is directed from a rough to a smooth bed the load factor can be written as

$$\alpha_{M,r \rightarrow s} = 2 - \alpha_M \quad (6)$$

Although the load decreases owing to an up-flow, it is recommended to evaluate Eq. 6 with experimental results as the effects of turbulence are neglected in the modelling.

A.4 Geometrical transitions

The situation at a transition of a slope to a horizontal berm can be compared with a jet that normally occurs because of flow under, through or over hydraulic structures. In general, a jet lifts soil and transports it downstream of the impacted area. The jet impact area is transformed into an energy dissipater and a scour hole is formed. Note that when a scour hole is formed deeper than 20 cm the grass revetment fails.

The following assumptions are made for estimating the load factor (see also WTI-2013 where more details about the modelling are given)

- Control volume is defined near the transition;
- Scouring is not considered;
- Effects of turbulence are neglected;
- Force balance is applied to deduce the centripetal force at the transition;
- Load increase/decrease is defined as the ratio between the centripetal force and the maximum normal force;
- Maximum normal force is related to the energy grade line.

For geometrical transitions the load factor (α_M) can be written as a function of the revetment steepness (θ)

$$\alpha_M = 1 + \sin \frac{1}{2} \theta \quad (7)$$

The load factor depends on the steepness of the dike. If there is no geometrical transition or if $\theta = 0^\circ$ then $\alpha_M = 1$. If $\theta = 20^\circ$ (steepness is 1V:2.7H) then $\alpha_M = 1.17$.

A.5 Flow blocking objects

The flow pattern around vertical objects can be divided into four characteristic features for sub-critical flow, namely the bow wave (or surface roller) due to the up-flow, the down-flow, the horseshoe vortex and the wake zone with the shed vortices (or vortex street). The flow decelerates as it approaches the object and comes to rest at the face of the object. Near the surface, the deceleration is greatest, and decreases downwards. The down-flow reaches a maximum just below the bed level. The development of the scour hole at vertical objects also gives rise to the horseshoe vortex, which is effective in transporting particles and extends downstream, past the sides of the pier.

Usually the flow separates at the sides of the object leading to the development of shed vortices in the interface between the flow and the wake. However, practical tests have shown that downstream of thick vertical objects there will be no direct mixing of water for super critical flow as present in wave overtopping conditions. Consequently, the load of the water upstream and along the tree is decisive with respect to the load downstream of the tree. The following starting points are made for modelling the erosion process at vertical objects (for example trees)

- Prototype tests at Dutch dikes have shown that the erosion process of grass covers is negligible at slender vertical objects (diameter is less than 15 cm);
- At relative thick vertical objects, whose thickness varies from 0.15 m to 1 m (e.g. tree on the Vechtdijk), erosion was observed after a series of storms, so these situations are further considered;

Based on expert judgment, the load factor (α_M) upstream of the vertical obstacle with C_D as the drag coefficient can be given by

(<http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0231.shtml>)

$$\alpha_M = 1 + \frac{1}{4} C_D \quad (8)$$

Here, two-dimensional objects are considered. The drag coefficient for piles, trees and houses varies from 1.2 to 2.3 depending on the shape. Along the vertical obstacle, that is, in the acceleration zone the load factor is estimated by (basis is also expert judgment)

$$\alpha_M = 1.4 K_s \quad (9)$$

where the shape factor K_s varies from 0.8 to 1.2. For cylinder shaped objects (e.g. trees) the drag coefficient measures $C_D = 1.2$ ($K_s = 1.0$) yielding $\alpha_m = 1.3$ (Eq. 8) and $\alpha_m = 1.4$ (Eq. 9). For rectangular objects, for example for a side wall structure, the drag coefficient is $C_D = 2$ ($K_s = 1.2$) thus $\alpha_m = 1.5$ (Eq. 8) and $\alpha_m = 1.7$ (Eq. 9). Consequently, the load factor for vertical obstacles lies in the range of 1.3 to 1.7.

A.6 References

Hoffmans, G.J.C.M., Van Hoven, A., Harderman, B., Verheij, H.J., 2014. Erosion of grass covers at transitions and objects on dikes, Conference Proceedings ICSE-7, Perth, Australia.
WTI-2013. (December 2013). Evaluation and Model Development, Grass Erosion Test at the Rhine dike, Authors: Gijs Hoffmans, Andre van Hoven, Henk Verheij and Jentsje van der Meer.