

Erosie van grasbekleding in golfoploopzone

**Basis for safety assessment method of WTI2017
Product 5.4R**



Erosie van grasbekleding in golfoploopzone

Basis for safety assessment method of WT12017 Product 5.4R

Andre van Hoven

1209437-000

Titel
Erosie van grasbekleding in golfoploopzone



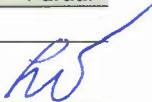
Opdrachtgever	Project	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1209437-000	21

Trefwoorden
golfoploop, erosie, gras, grasbekleding, erosiemodel, graserosie, cumulatieve overbelasting, ringtoets, kritische stroomsnelheid gras, wettelijk toetsinstrument, WTI2017

Samenvatting
Voor erosie van gras in de golfoploopzone wordt voorgesteld om over te stappen van het model op basis van CIRIA krommes (VTV2006) naar het cumulatieve overbelastingmodel (RWS 2012), dat wordt gebruikt voor erosie van gras in de golfoverslagzone. Hierdoor worden een aantal bezwaren die voortvloeien uit verschillende grondslagen van de modellen voor in principe hetzelfde erosiemechanisme (erosie van gras door stroming) ondervangen. De rapportage bevat de beschrijving van het mechanisme, de formules waarmee het model geschikt wordt gemaakt voor golfoploop en de vorm waarin deze formules in software kan worden gezet voor implementatie in Ringtoets (eind mei 2015). Voordat het zover is worden nog een aantal uit te voeren stappen beschreven.

Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	okt. 2014	Andre van Hoven		Mark Klein Breteler		Leo Voogt	
2	feb 2015	Andre van Hoven		Mark Klein Breteler		Leo Voogt	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Mechanismebeschrijving erosie van gras op het buitentalud	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Mechanismebeschrijving erosie grasbekleding buitentalud	4
2.2.1 Erosie door golfklappen	4
2.2.2 Erosie door golfoploop	6
2.3 Beoordeling van erosie grasbekleding op buitentalud in de klapzone	8
2.4 Beoordeling van erosie grasbekleding op buitentalud in oploopzone	8
3 Validatie	13
3.1 Validatie cumulatieve overbelastingmethode voor golfoverslag	13
3.2 Validatie cumulatieve overbelastingmethode voor golfoploop	13
4 Verdere stappen tot WTI2017	17
5 Samenvatting	19

1 Inleiding

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van WTI 2017 "Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium". Cluster 5 van dit programma richt zich op bekledingen en reststerkte. Dit rapport is product 5.4R.

In RWS 2012 wordt een erosiemodel voor grasbekledingen bij golfoverslag aangeboden. Dit cumulatieve overbelastingmodel is gebaseerd op 6 jaar onderzoek naar erosiegedrag van grasbekledingen bij overslag, met de golfoverslagsimulator. Echter voor erosie van de grasbekleding in de oploopzone wordt teruggegrepen op het model gebaseerd op het CIRIA onderzoek, zoals ook staat in het VTV2006.

Dit is om een aantal redenen onwenselijk:

- Kwaliteit grasbekleding wordt met andere parameters beschreven (verschil binnentalud en klapzone met de tussenliggende oploopzone)
- kwaliteit grond in de zode wordt met andere parameters beschreven (verschil binnentalud en klapzone met de tussenliggende oploopzone)
- CIRIA onderzoek is gebaseerd op overloopprouwen (geen oploop/ overslag)
- CIRIA onderzoek is uitgevoerd op zeer jong gras
- Door CIRIA onderzochte graskwaliteit heeft geen directe relatie met de kwaliteitsklassen die later in het VTV zijn gekomen.
- De eis ten aanzien van het zandgehalte (toepassingseis) is relatief streng, terwijl voor een overslagbelasting het zandgehalte van ondergeschikt belang is gebleken.

Daarom is besloten om voor de oploopzone te kijken of de cumulatieve overbelastingmethode ook toepasbaar is en in welke vorm dat zou moeten zijn.

Dit rapport beschrijft het mechanisme van erosie van gras in de oploopzone en het voorgestelde cumulatieve overbelastingmodel, toegespitst op oploop (H2). In dit hoofdstuk wordt ook aandacht besteed aan de mechanismebesrijving in de golfklapzone. De validatie van het cumulatieve overbelastingmodel voor golfoploop wordt beschreven in H3 en verdere stappen voor WTI2017 in H4. De bevindingen zijn samengevat in H5.

2 Mechanismebescrijving erosie van gras op het buitentalud

2.1 Inleiding

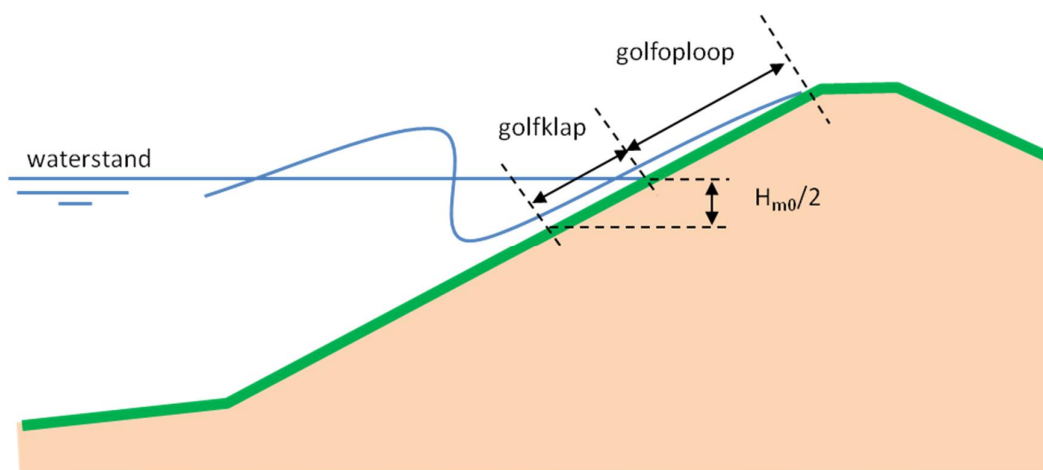
Erosie van de grasbekleding op het buitentalud leidt tot een gat in de grasbekleding waarna het onderliggende dijklichaam bloot komt te liggen. Verdere erosie van het dijklichaam als gevolg van golfwerking kan daarna leiden tot kruindaling, bresvorming en overstroming van het achterland.

Bij de toetsing van de grasbekleding worden twee belastingtypes beschouwd, de golfklapbelasting en de golfoploop belasting. Aan stroming langs de dijk wordt in dit rapport geen aandacht besteed.

De grasbekleding op het buitentalud wordt getoetst op golfklappen indien deze ligt beneden het toetspeil behorend bij de norm overstromingsfrequentie van het beschouwde dijktraject. Indien er zowel boven dit peil als onder dit peil een grasbekleding aanwezig is, dan wordt er alleen op golfklappen getoetst, omdat golfklappen altijd maatgevend zijn boven golfoploop. Er wordt op golfoploop getoetst indien er tot minimaal het toetspeil een harde bekleding aanwezig is met daarboven een grasbekleding.

Golfklappen zijn kortdurende hoge waterdrukken op het talud als gevolg van een tegen het talud brekende golf. Na breking van de golf schiet een golftong het talud op, waarna deze stil valt en weer terugloopt. Dit is golfoploop en neerloop. Als het oplooppniveau van de golftong hoger is dan de kruin, dan zal een deel van het water over de dijk lopen. Dat is golfoverslag.

Golfklappen treden op in de zone tussen de stil waterlijn en een (verticale) halve $H_{m0}/2$ onder deze lijn. Boven de stil waterlijn is de golfoploopzone (Figuur 2.1). Omdat de waterstand verloopt in tijd, zal de zone op het talud waar de belasting bestaat uit golfklappen of golfoploop telkens veranderen. Een laag gelegen punt op de grasbekleding kan eerst worden aangevallen door golfoploop, dan door golfklappen. Dan komt het zodanig onder water te staan dat het niet wordt aangevallen, maar bij het dalen van de waterstand komt het eerst weer in de golfklapzone en daarna in de golfoploopzone.



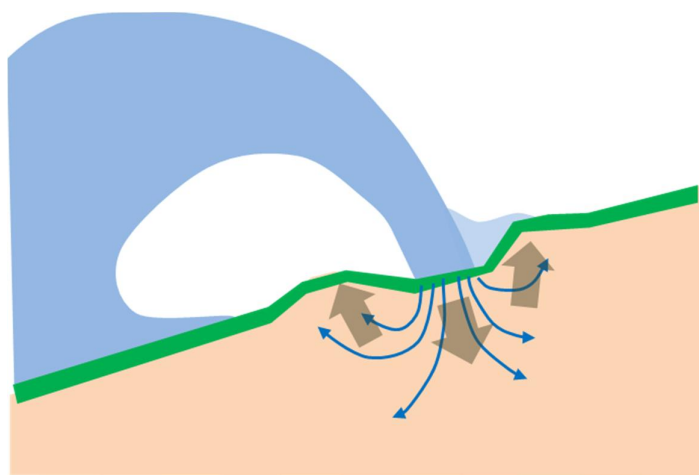
Figuur 2.1 Schematische weergave belastingzone door golfklappen en door golfoploop

In paragraaf 2.2.1 en 2.2.2 zal respectievelijk het mechanisme erosie door golfklappen en erosie door golfoploop worden beschreven. Het deel over golfklappen, maakt eigenlijk geen onderdeel uit van dit rapport, maar is ten overvloede opgenomen en kan later (2015) worden gebruikt als onderdeel van 'mechanismebeschrijving' als bouwsteen van het WTI2017.

2.2 Mechanismebeschrijving erosie grasbekleding buitentalud

2.2.1 Erosie door golfklappen

Een golfklap door een brekende golf op het talud geeft een kortdurende lokale hoge waterdruk op het talud. Deze drukpuls dringt door in de zode en de onderliggende dijk en veroorzaakt hier drukgradiënten, die de zode kunnen beschadigen en delen ervan verwijderen uit de grasbekleding. Tijdens het optreden van de piekdruk wordt de zode naar binnen, zijwaarts en naar buiten gedrukt (Figuur 2.2, overgenomen uit TAW 1998). Net na het wegvallen van de druk door de golfklap, kan er een situatie ontstaan waarbij in en onder de zode nog even een overdruk aanwezig is, waardoor een buitenwaarts gerichte drukgradiënt ontstaat die de zode naar buiten drukt. Bij grote golfklappen wordt grond plastisch en treden irreversibele vervormingen op. Dit alles gebeurt in heel korte tijd, in een fractie van de golfperiode.

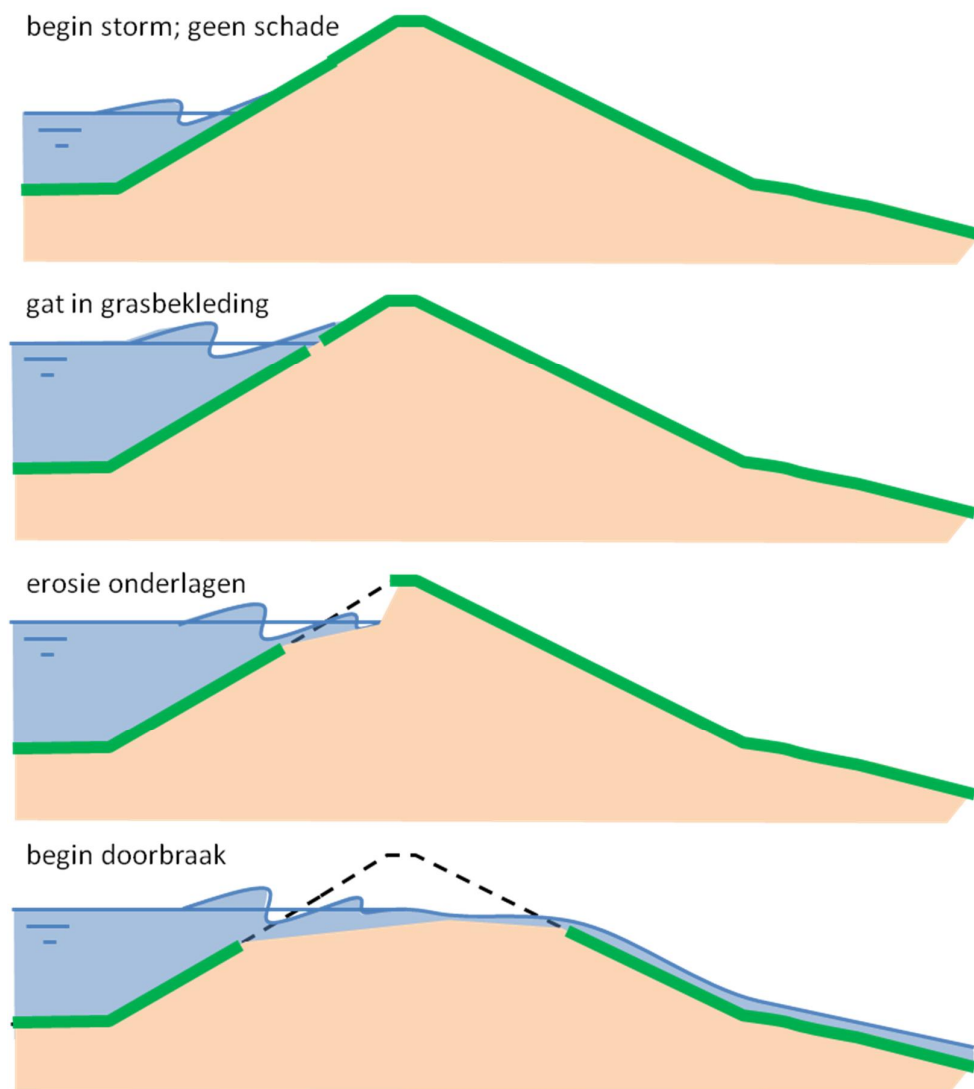


Figuur 2.2 Schematische weergave van een golfklap op het talud, de grondwaterstroming (dunne blauwe peilen) en grondverplaatsing (dikke bruine peilen)

Een dicht gewoven wortelnet van een graszode heeft een grote sterkte en veerkracht. Uit golfgoetproeven en ervaringen tijdens hoogwaters in het verleden is gebleken dat de dichtheid van het wortelnet een veel belangrijker factor is in de erosiebestendigheid van de grasbekleding dan de erosiebestendigheid van van de grond (zie RWS 2012). Een gesloten zode met een gesloten wortelnet op een weinig erosiebestendige schrale grond zal een golfklapbelasting veel langer kunnen weerstaan dan een open zode met een minder dicht wortelnet in combinatie met een erosiebestendige grond. Een dicht wortelnet houdt de grond in de zode op een effectieve manier vast. Echter, onder herhaalde belastingen van golfklappen kan het wortelnet uiteindelijk toch scheuren en eroderen. Zowel de golfhoogte als de tijdsduur van de golfklapbelasting zijn hierbij van belang.

Na het ontstaan van een gat in de graszode wordt de dijk aangesproken op reststerkte. De losse klei vlak onder de zode zal snel eroderen. Het gaat om de laag tot circa 0.3 m diepte die bestaat uit een relatief losse stapeling van aggregaten, waar het wortelnet van de

graszode afwezig is, of in elk geval niet meer zo effectief is als in de bovenste circa 0.2 m. De direct naast het gat gelegen zode wordt ondermijnd, doordat de losse grond van onder de zode kan wegspoelen. De randen van het ontstane gat in de zode kunnen ook aanleiding zijn voor een concentratie van de belasting. Bij verder gaande erosie van de klei onder de graszode ontstaat een flauw talud (terras) net onder de waterlijn en een steile wand bij de insteek van de erosiekuil (Figuur 2.3). Naar dit proces van erosie van de onderlagen, is veel onderzoek gedaan, mede door middel van grote golfgootproeven. In klei zal dit proces uiteraard veel langzamer gaan dan in zand.



Figuur 2.3 Schematische weergave doorbraakproces na falen van de grasbekleding door golfklappen

Als erosie leidt tot een resterend dijprofiel dat lager is dan de waterstand dan overstroomt het achterland en faalt de dijk. Verlaging van het profiel beneden de waterstand kan optreden als gevolg van doorgaande erosie. Het is echter ook mogelijk dat in een eerdere fase van het erosieproces, waarbij nog maar een deel een deel van de dijk is verwijderd door erosie, een ander mechanisme optreedt. Door het steeds smaller wordende profiel kan het binnentalud

van de dijk eerder afschuiven door toenemende waterspanningen in de dijk (micro- of macro-instabiliteit) of door overslaande golven (stabiliteit bekleding bij golfoverslag).

In de toetsing komen zowel het falen van de grasbekleding als erosie van de onderlagen aan bod. De standtijd van de grasbekleding en die van de onderlagen worden bij elkaar opgeteld en vergeleken met de belastingduur.

2.2.2 Erosie door golfoploop

De belasting die erosie van de grasbekleding kan veroorzaken bestaat in geval van de oploophoogte uit stroming door golfoploop en golfneerloop. De voor golfklappen karakteristieke waterdruk-puls blijft bij golfoploop achterwege.

Een met gras bekleed talud dat wordt blootgesteld aan golven zal als eerste falen in de golfklapzone, want de golfklapbelasting is maatgevend boven de golfoploopbelasting. In veel gevallen zal in de zone in het dijkprofiel waar zware golfklappen worden verwacht een harde bekleding liggen en zal alleen het bovenste deel van het talud zijn bekleed met gras. Er zijn veel gevallen waarbij het gras boven de harde bekleding alleen door golfoploop en neerloop wordt belast. Opgemerkt wordt dat in dergelijke gevallen altijd sprake is van een overgang van een harde bekleding naar een grasbekleding. Deze overgang is een zwakke plek, omdat het de sterkte van het gras hier wat lager is en omdat de belasting door oneffenheid op de overgang en/of ruwheidsverschillen, juist wat hoger is.

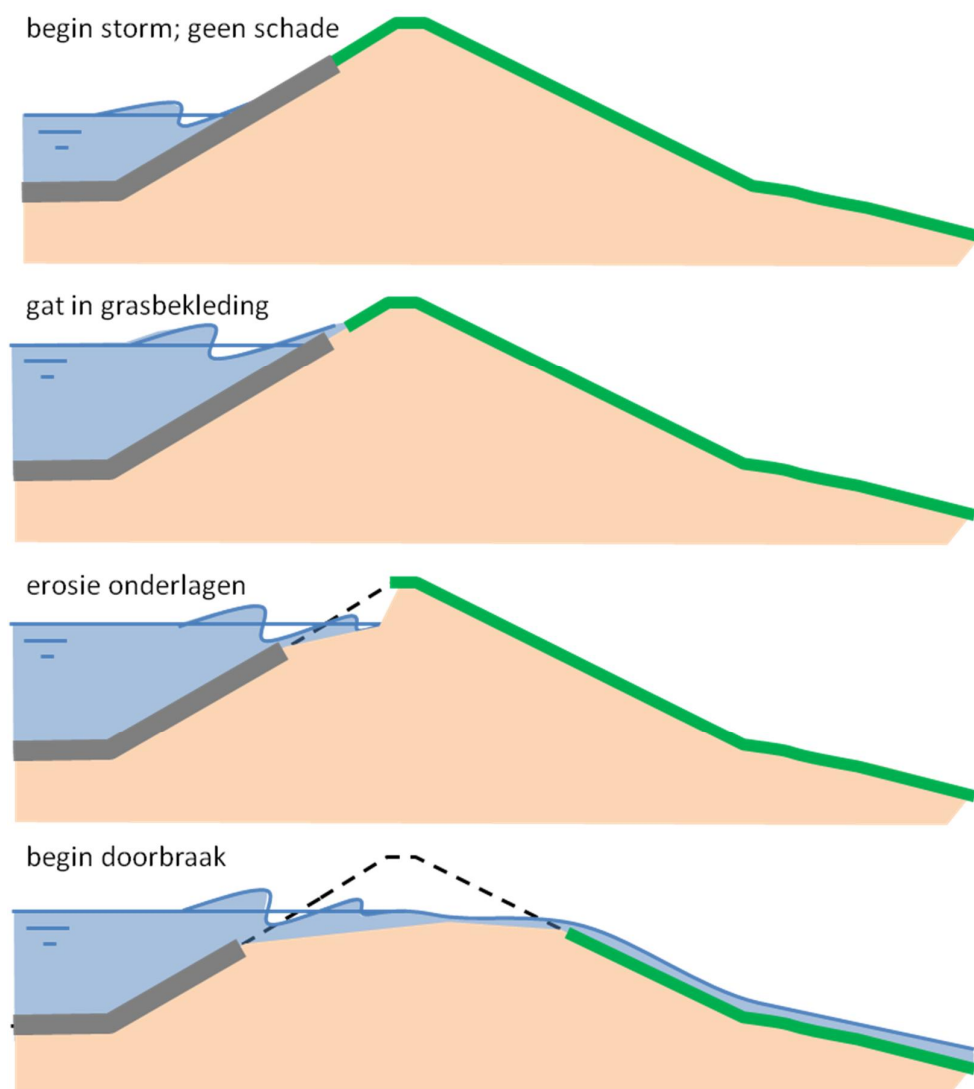
De stroming van de oplopende en neergaande golfhoogte is turbulent, waardoor de graszode wordt onderworpen aan een snel wisselende waterdruk. De drukwisselingen planten zich gedempt en vertraagd door in de zode en de hieronder liggende grondlagen. Hierdoor en door de ruimtelijke variabiliteit van de wisselende druk over het talud, wordt de zode blootgesteld aan binnen- en buitenwaarts gerichte drukgradiënten. De drukgradiënten met een buitenwaartse richtingscomponent kunnen op den duur stukken zode uit de grasbekleding trekken. De grootte van de belasting is afhankelijk van de laagdikte en snelheid van de golfhoogte en van de turbulentie-intensiteit. Deze parameters zijn weer afhankelijk van de golfhoogte en van de hoogte van de te toetsen graszode ten opzichte van de stilwaterlijn. Ook de stormduur, of eigenlijk de tijd dat een te toetsen grasbekleding zich in de golfoploophoogte bevindt, is van belang.

Uit drukmetingen bij golfoploophoogtes nabij Colijnsplaat in Zeeland blijkt dat met name bij golfoploop de graszode wordt belast met een snel wisselende druk. De amplitude van de drukwisselingen bij de neerloop zijn aanzienlijk kleiner. Ook de frontsnelheid van de oplopende golfhoogte is aanzienlijk hoger dan de stroomsnelheid van de golfneerloop. Hieruit is afgeleid dat het vooral de golfoploop is die zorgt voor erosie en in veel mindere mate de golfneerloop. Tevens is geconstateerd dat vanaf de stilwaterlijn de golfhoogte met min of meer constante frontsnelheid het talud op loopt tot circa 75% van de uiteindelijk te bereiken oploophoogte. In de laatste 25% neemt de snelheid af tot stilstand, waarna de stroming langzaam weer versnelt in neerwaartse richting.

Net als bij erosie door golfklappen wordt de weerstand tegen erosie bij golfoploop hoofdzakelijk verzorgd door het wortelnet van de graszode. Hoe dichter dat wortelnet hoe beter de zode bestand is tegen erosie. De erosiebestendigheid van de grond is minder belangrijk. Voor het verkrijgen van een dicht gewoven wortelnet is een goed beheer noodzakelijk. Hierover is in de literatuur veel informatie te vinden (bv TAW 1998, TAW 1999

en RWS 2012), waarbij wordt opgemerkt dat het beheer moet zijn gericht op het verkrijgen van een dicht wortelnet.

Na het falen van de grasbekleding, dat wil zeggen het doorbreken van de sterk doorwortelde toplaag met een dikte van circa 0,2 m kan de erosie van de onderlagen uiteindelijk leiden tot kruindaling en falen van de dijk. Dit is de reststerkte van de dijk na initieel falen van de grasbekleding. Dit proces verloopt vergelijkbaar met dat bij falen van de grasbekleding door golfklappen (paragraaf 2.2), met dien verstande dat falen hoger op het talud zal plaatsvinden, waar het profiel smaller is, maar waar de belasting kleiner is. Er is weinig bekend over de reststerkte na falen van de graszode in de golfoploopzone. Het kan zijn dat een schade die optreedt ter plaatse van de overgang tussen de harde bekleding en de grasbekleding, eerst de harde bekleding zal ondermijnen tot het stil waterniveau, waarna eenzelfde terrasvormige erosiekuil ontstaat als na falen van het gras door golfklappen (Figuur 2.4). Als dit niet gebeurt, dan is het onbekend hoe snel de erosie kan voortschrijden.



Figuur 2.4 Schematische weergave doorbraakproces na falen van de grasbekleding door golfoploop

Bij de toetsing op dit mechanisme wordt zowel rekening gehouden met het falen van de grasbekleding als met erosie van de onderlagen. Voor de modellering van erosie van de onderlagen wordt gebruik gemaakt van het model dat rekening houdt met een golfklapbelasting. Dit is aan de veilige kant, echter er is specifiek voor de oploopzone geen apart model beschikbaar.

2.3 Beoordeling van erosie grasbekleding op buitentalud in de klapzone

De beoordeling van het mechanisme erosie van de grasbekleding op het buitentalud in de golfklapzone valt feitelijk buiten de scope van dit product, dat over de oploopzone gaat. Er wordt echter wel opgemerkt dat de eenvoudige beoordeling (toetslaag 1) gelijk is aan die in de oploopzone (zie paragraaf 2.4). De gedetailleerde beoordeling (toetslaag 2) vindt plaats op basis van de standtijdlijnen gebaseerd op RWS 2012 en Deltares 2010. Nadere uitwerking hiervan in software, koppeling aan ringtoets en beschrijvingen van het mechanisme, schematisering en parameters vindt plaats in 2015.

2.4 Beoordeling van erosie grasbekleding op buitentalud in oploopzone

Deze paragraaf beschrijft welke delen van het proces van schade aan de graszode tot falen van de dijk worden beoordeeld bij de toetsing van het mechanisme "erosie grasbekleding buitentalud".

In toetslaag 1, de eenvoudige toetsing wordt geen onderscheid gemaakt tussen erosie door golfklappen en erosie door golfoploop. Er is geen specifieke eenvoudige toetsing voor erosie door golfoploop, maar er wordt uitgegaan van het principe dat erosie door golfklappen altijd maatgevend is boven erosie door golfoploop. Een grasbekleding die voldoet aan de eenvoudige toets voor golfklappen voldoet daarom automatisch ook als deze niet in de klapzone ligt maar in de oploopzone.

De gedetailleerde toetsing in de golfoploopzone, ofwel toetslaag 2, bestaat uit het toepassen van de cumulatieve overbelastingmethode. Deze methode is ontwikkeld naar aanleiding van waarnemingen bij golfoverslagproeven, welke is beschreven in de RWS 2012. Uitgangspunt bij de toepassing van de methode op het buitentalud is dat het vooral de golfoploop is die zorgt voor erosie, niet zozeer de golfneerloop. De erosieve belasting ten gevolge van golfneerloop wordt in de methode zelfs verwaarloosd ten opzichte van erosieve belasting van golfoploop. Dit wordt bevestigd door metingen van de frontsnelheid en stroomsnelheid van de oplopende golftong en de stroomsnelheid van de neerloop (bij neerloop is geen sprake van een front). Ook de hoogfrequente drukmetingen op het talud laten zien dat de drukwisselingen bij golfoploop veel groter zijn dan bij neerloop. Het heen en weer klappen van de bovengrondse plantdelen in golfoploop en golfneerloop en het daardoor mogelijk makkelijker uitspoelen van gronddeeltjes tussen de planten (zogenaamde slijterosie) wordt eveneens verwaarloosd ten opzichte van erosie door het uitbreken van een stuk zode in één keer en het uitbreiden van deze schade in het vlak en in de diepte. Dit laatste bleek bij golfoverslagproeven altijd maatgevend. Slijterosie trad wel op, echter leidde nooit tot falen van de grasbekleding.

De cumulatieve overbelasting beschouwt per oplopende golf de frontsnelheid van de oplopende golftong in het kwadraat U^2 (m^2/s^2) en een kritische snelheid in het kwadraat U_c^2 (m^2/s^2). Wanneer de frontsnelheid de kritische snelheid overtreft, dan wordt de grasbekleding overbelast. Alle overbelastinggevallen in een storm worden bij elkaar opgeteld. Indien de

overbelasting een kritische waarde overschrijdt dan wordt verondersteld dat de grasbekleding faalt. Het model, zonder partiële veiligheidsfactoren, is als volgt in formulevorm:

$$\sum_{i=1}^N (\alpha_M U_i^2 - \alpha_S U_c^2) = D \quad \text{if} \quad \alpha_M U_i^2 > \alpha_S U_c^2 \quad (2.1)$$

Where:

- N Aantal golffonten dat het te toetsen punt passeert (-)
- U_i Frontsnelheid van de i^{de} golf in de beschouwde tijdspanne op het te toetsen punt (m/s)
- U_c Kritische frontsnelheid (m/s)
- D Cumulatieve overbelasting (m^2/s^2)
- α_M Factor voor verdiscontering van een belastingverhoging door een overgang of object in de grasbekleding (-) (hogere belasting betekent factor groter dan 1)
- α_S Factor voor verdiscontering van de sterkte reductie door een overgang of object in de grasbekleding (-) (lagere sterkte betekent factor lager dan 1)

Negatieve resultaten waar $\alpha_M U^2$ kleiner is dan $\alpha_S U_c^2$ worden niet meegeteld.

Op basis van golfoverslagproeven is bepaald dat bij $D=4000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ een schadebeeld van 'schade op meerdere plekken' hoort en bij $D=7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ falen van de grasbekleding.

Aangenomen wordt dat de golfoploophoogtes R_u (m tov stil waterniveau) van individuele golven gedurende een bepaalde tijdspanne Rayleigh verdeeld zijn. De kans dat een golf een bepaalde oploophoogte overschrijdt wordt gegeven door:

$$P(\underline{R}_u > R_u) = e^{-\frac{\ln(0,02) \frac{R_u^2}{z_{2\%}^2}}{2}} \quad (2.2)$$

Waarin $z_{2\%}$ (m tov stilwaterniveau) de golfoploophoogte is die door 2% van de golven wordt overschreden. Deze formule kan worden omschreven om het oploophoogte (R_u) te berekenen gegeven een bepaalde kans van overschrijden $P(\underline{R}_u > R_u)$.

$$R_u = \left(\frac{\ln(P(\underline{R}_u > R_u))}{\ln(0,02)} \right)^{0.5} z_{2\%} \quad (2.3)$$

Met deze formule kan een benadering worden gegeven van alle oploophoogtes $R_{u,i..N}$ in een bepaalde tijdspanne, waarin waterstand en golfcondities constant zijn. Als alle oploophoogtes $R_{u,i..N}$ in oplopende hoogte worden gerangschikt, dan is een schatting van de kans op overschrijding van de i^{de} van N golven:

$$P(\underline{R}_u > R_{u_i}) = 1 - \frac{i}{N+1} \quad (2.4)$$

Met deze formules kan binnen een bepaalde tijdspanne een benadering worden gegeven van alle golfoploophoogtes. De maximale frontsnelheid van de oplopende golf u_{max} (m/s) met een oploophoogte R_u kan worden geschat met de formule:

$$u_{\text{max}} = c_u (g R_{u_x})^{0.5} \quad \text{waarin} \quad c_u = 1.0 \quad \text{en} \quad \sigma(c_u) = 0.25 \quad (2.5)$$

De formule geeft het gemiddelde van u_{max} bij $c_u=1$ en de spreiding hier omheen. Er kan bij toepassing van de cumulatieve overbelasting gebruik worden gemaakt van het gemiddelde, echter door de aard van het erosiemodel (waarbij de snelheid in het kwadraat staat en er een kritische snelheid, gekwadrateerd, wordt afgetrokken) leidt dit tot een onveilige schatting van de overbelasting. De waarden van u_{max} boven het gemiddelde tellen namelijk bovenmatig mee aan het resultaat van de cumulatieve overbelasting.

Het effect van de spreiding moet modelmatig worden ondervangen. Dit kan enerzijds door het kunstmatig trekken van een random getal in software en anderzijds door het wiskundig uitwerken van het effect. De eerste optie is robuust. Deze kan altijd worden toegepast en zal betrouwbare en reproduceerbare resultaten leveren als het aantal oplopende golven dat een te toetsen punt passeert relatief groot is. Als dit niet het geval is, dan is het resultaat minder goed reproduceerbaar. De tweede optie verdient de voorkeur, echter het is nog niet bekend of wiskundige uitwerking kan leiden tot een resultaat. Dat zal in het kader van het maken van een functioneel ontwerp (product 5.13) verder worden uitgewerkt.

De frontsnelheid van de oplopende golfong is ongeveer gelijk aan de maximale snelheid u_{max} in de zone tussen 15% en 75% van de oploophoogte. In de zone tussen de stilwaterlijn en 15% van de oploophoogte kan de snelheid zowel lager als iets hoger zijn (waarmee u_{max} eigenlijk niet echt de maximale frontsnelheid is). Er wordt vanuit gegaan dat de snelheid hier gelijk is aan u_{max} . Tussen 75% en 100% van de oploophoogte neemt de snelheid lineair af tot 0 (Figuur 2.6).

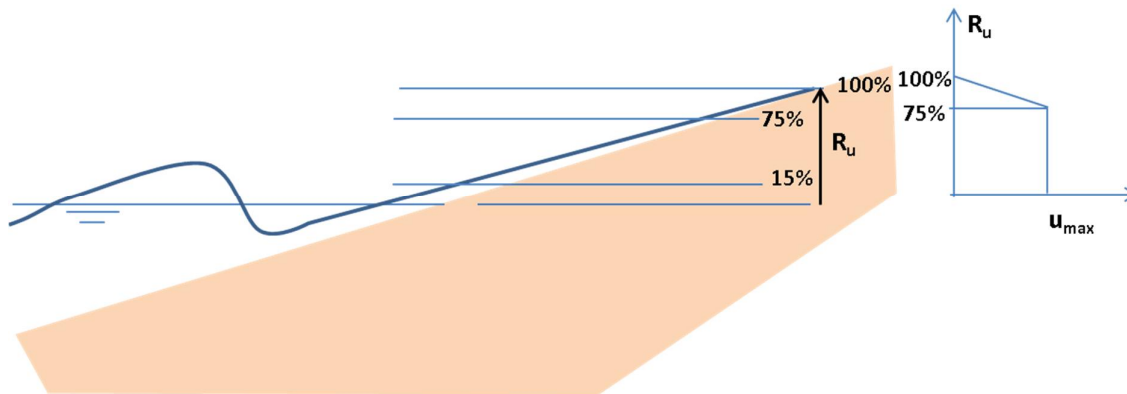


Figure 2.5 Frontsnelheid van oplopende golfong gerelateerd aan U_{max} (m/s) als functie van het oploophoogte $R_{u,i}$ voor de i^{de} oploophoogte.

In formulevorm betekent dit (voor $z \geq 0$; met z afstand tussen beschouwde punt en stil water niveau, positief vertikaal omhoog):

$$U_{i,z} = U_{i,max} \cdot \max \left(0; \min \left(1; \frac{R_{u,i} - z}{0.25 \cdot R_{u,i}} \right) \right) \tag{2.6}$$

Gegeven deze formules kan voor een bepaalde tijdspanne waarin de waterstand en golfcondities gelijk zijn de cumulatieve overbelasting worden berekend. Voor de cumulatieve overbelasting gedurende een storm, moet de storm in stukjes worden opgeknipt, waarin gedurende een bepaalde tijd de condities stationair zijn. Alle stukjes cumulatieve overbelasting bij elkaar opgeteld leveren de cumulatieve overbelasting tijdens een storm.

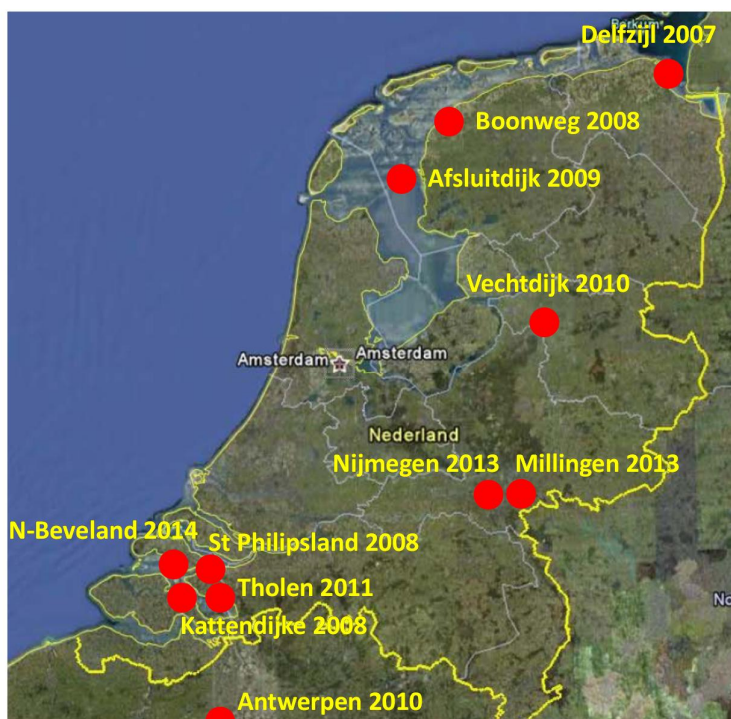
De mogelijkheid dat er meerdere stormen in een stormseizoen zijn die bijdragen aan de cumulatieve overbelasting, zonder dat het gras de gelegenheid heeft gekregen om zich te herstellen wordt bij de toetsing buiten beschouwing gelaten. De kans op twee bijna maatgevende stormen vlak na elkaar is klein. Bovendien zal ernstige, zichtbare, schade zo spoedig mogelijk worden hersteld met behulp van noodmaatregelen. Gedurende een zomerseizoen kan het gras zich weer herstellen van de geleden schade.

Het model zal in 2015 in een software worden gezet. Deze rekenkern zal in Ringtoets worden aangeroepen als de gedetailleerde toets op golfoploop wordt uitgevoerd. De uitwerking van het model vindt plaats in het functioneel ontwerp dat in februari 2015 zal worden opgeleverd aan het cluster software. Het koppelen van de rekenkern aan Ringtoets vindt plaats in de sprintsessie beginnend op 27 april 2015.

3 Validatie

3.1 Validatie cumulatieve overbelastingmethode voor golfoverslag

De cumulatieve overbelastingmethode voor de modellering van erosie van grasbekledingen is ontwikkeld voor de golfoverslagzone. In de afgelopen 7 jaar zijn er 32 vier meter brede grasstroken beproefd met de golfoverslagsimulator op 11 locaties in Nederland en België (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Onderzoek locaties golfoverslag en oploop (N-Beveland 2014)

Met de resultaten van deze proeven is het model voor golfoverslag gevalideerd. Het voorspellen van het eroderen van een eerste plukje gras blijkt nauwelijks mogelijk. Het model presteert beter als het gaat om een schadebeeld met 'meerdere kale plekken'. Het model presteert het beste als het gaat om het voorspellen van het falen van de grasbekleding. Op dat moment wordt de toplaag, bestaande uit de zode plus de goed doorwortelde laag hieronder tot circa 0.2 m diepte, doorbroken en komt de onderliggende grond bloot te liggen.

3.2 Validatie cumulatieve overbelastingmethode voor golfoploop

In 2011 / 2012 is besloten om binnen WTI2017 te onderzoeken of het model zich ook leent voor het modelleren van erosie van gras in de golfoploopzone. In beide gevallen, oploop en overslag, wordt de belasting gevormd door een turbulente stroming langs het taludoppervlak, die sterk wisselende drukgradiënten veroorzaakt over de zode. De sterkte bestaat voor beide zones, oploop en overslag, uit de weerstand die het wortelnetwerk biedt tegen de drukgradiënten die stukjes zode uit de bekleding proberen te trekken. Er zijn echter ook verschillen:

- 1 Elke golfploopgebeurtenis geeft ook een neerloop. De oloop gaat gepaard met een golffront dat met hoge snelheid tegen het talud oploopt, tot aan de maximale oploophoogte en dan tot stilstand komt. Vanaf dat moment versnelt de watermassa onder invloed van zwaartekracht weer naar beneden. Bij neerloop is geen sprake van een golffront, maar van een versnellende stroming. Tijdens de golfoverslagproeven is waargenomen dat schade ontstond door het golffront dat voorbij trok, niet door de daarop volgende staart van het overslaande volume. De hypothese is dan ook dat het voorbij trekken van het golffront bij oloop de grootste erosieve werking heeft en dat de hierop volgende neerloop tenopzichte hiervan kan worden verwaarloosd.
- 2 Door de verandering van de stroomrichting laat de bovengrondse plantdelen omklappen. Hierdoor kunnen deze makkelijker afslijten en is het, daarop volgend, ook mogelijk dat er makkelijker grond tussen de wortels vandaan spoelt. Bij golfoverslag is waargenomen dat deze zogenaamde slijterosie wel optreedt, maar nooit maatgevend was bij het falen van de grasbekleding. Falen ging altijd vooraf door het ineens uit de bekleding trekken van een stuk zode. In de golfploopzone is slijterosie mogelijk een wat dominantere mechanisme, vooral bij grasbekledingen met een hoog zandgehalte.

Naast eerder genoemde golfoverslagproeven, zijn op twee locaties golfoploopproeven uitgevoerd (Figuur 3.2). Ten eerste op **Tholen** op een buitentalud met de golfoverslagsimulator gepositioneerd, zodanig dat oloop werd gegenereerd en ten tweede vier stroken met de oploopsimulator op het buitentalud van de dijk bij de **Zeelandbrug nabij Colijnsplaat**.



Figuur 3.2 Golfoverslagsimulator (links) en golfoploopsimulator (rechts)

Op **Tholen** is eerst een overslagproef uitgevoerd op het buitentalud, waarbij de proef werd gestopt vanwege het optillen van de asfaltlaag op de berm. Er is geen bezwijken van de grasbekleding opgetreden. Op basis van het schadebeeld 'meerdere kale plekken' kan echter worden teruggerekend dat de kritische snelheid van het gras circa 5,5-6 m/s is geweest. Daarna is de overslagsimulator een halve slag gedraaid en op de berm gezet, om zo een

oploopproof uit te voeren. Uitgaande van hetzelfde erosiemodel als voor overslag, waarbij alleen het oplopende golffront werd meegenomen aan de belastingkant volgde eenzelfde kritische snelheid van 5,5 – 6 m/s. De toepassing van het model voor zowel overslag als oploop werd hierdoor onderschreven. Helaas is geen falen van de bekleding opgetreden, de conclusie volgde uit het schadebeeld 'meerder kale plekken'. Bij beide proeven, oploop en overslag, is slijterosie niet maatgevend geweest voor het ontstaan van 'meerdere kale plekken'.

De klei bij Tholen was een 'schrone klei' conform RWS 2012 en valt in erosie categorie 3 volgens het Technisch Rapport Klei voor Dijken. Het zandgehalte was relatief laag met 44-48% (massa fractie 63 μm en groter ten opzichte van totale massa).

Op Noord Beveland bij de **Zeelandbrug** zijn begin 2014 specifiek proeven uitgevoerd naar het erosie bij golfoploop, met de golfoploop simulator. Aan de hand van de ervaringen met de golfoverslagsimulator op Tholen, die daar is ingezet als oploopsimulator, is een ontwerp van de oploopsimulator gemaakt, getest en aangepast. De simulator is vooral hoger geworden om meer (oploop)snelheid te kunnen genereren. Er zijn vier twee meter brede stroken beproefd, waarbij enkele variaties in overgangen aanwezig waren van de harde bekleding naar de grasbekleding. Eén strook bevatte een taludtrap (in opdracht van projectbureau zeekeringen). Bij een enkele strook is ook overslag toegelaten.

De gesimuleerde condities waren een golfhoogte H_s van 2 m en een (fictieve) waterstand die steeds hoger werd, van 4 m onder bermniveau tot aan bermniveau. De condities werden 6 uur lang gesimuleerd. Dit betekende overigens dat in verband met de vul- en leegtijd van de simulator de proef met de waterstand op bermniveau ongeveer 18 uur duurde. In tegenstelling tot bij golfoverslag geeft ook elke golf in het golfveld op dat moment oploop, terwijl bij overslag een veel beperkter aantal golven in een golfveld ook echt leidt tot overslag, ook al is de gesimuleerde overslag in de orde van 50-75 l/s/m bij $H_s=2$ m. De oploopprouven leidden veelvuldig tot oplooppniveaus hoger dan het kruinniveau. Bij één strook is overslag toegelaten, bij de andere stroken is de 'overslag' via een omleiding teruggeleid naar de Oosterscheld.

Helaas hebben de oploopprouven, met uitzondering van de taludtrap, niet geleid tot falen van de grasbekleding. De mogelijkheid voor validatie is daardoor beperkt. De dijk heeft een dichte zode en een zandgehalte van 50-52% (schrone klei conform RWS 2012 en erosiebestendigheidscategorie 3 conform het Technisch Rapport Klei voor Dijken). Uit de op één traject toegelaten overslag kan worden geconcludeerd dat de kritische snelheid van de zode meer is dan 7 m/s. Uit de oploopprouven blijkt dat de kritische snelheid meer is geweest dan 8 m/s wat elkaar in elk geval niet tegensprekt. Deze waarden voor de kritische snelheid zijn ook op andere locaties met een dichte zode gevonden bij golfoverslagproeven. Er is wel sprake geweest van slijterosie, maar zeker geen falen van de grasbekleding en zelfs 'begin van schade' volgens de definitie in RWS 2012. Hoewel de proef achteraf gezien niet heeft geleid tot de gewenste validatie, toont de proef wel aan dat oploop niet tot onverwacht snel falen van de grasbekleding leidt, ten opzichte van wat we in de afgelopen jaren hebben gezien bij golfoverslag.

Gezien het bovenstaande bestaat er nog steeds een behoefte om het model verder te valideren, met name gericht op een grasbekleding in de oplooppzone met een hoog zandgehalte en waarbij de zode tot falen wordt belast.

4 Verdere stappen tot WTI2017

Beoogd wordt de cumulatieve overbelasting als een software module aan Ringtoets te hangen voor gebruik in toetslaag 2 (semi probabilistische gedetailleerde toetsing). Tussen het theoretische model zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 2 en een geïmplementeerde module zitten nog de volgende stappen die in de periode tot eind april 2015 moeten worden doorlopen:

- Verschilanalyse (hoe verhouden de uitkomsten van het model zich met het CIRIA model), dit valt deels onder product 5.13, waarbij met prototype software vergelijkende berekeningen worden gemaakt
- vervaardigen van een functioneel ontwerp en programmeren (product 5.13)
- kalibratieslag door WTI cluster onzekerheden om geschikte partiële veiligheidsfactoren af te leiden (voor de sprintsessie van 27 april)
- implementatie in Ringtoets (27 april 2015)
- mogelijk een proeftoetsing, in overleg met cluster A raamwerk.

In de schematiseringshandleiding (gepland voor 2015) zal worden beschreven hoe in het veld parameters kunnen worden bepaald en verwerkt tot invoerparameters en hoe de grasbekleding moet worden geschematiseerd.

5 Samenvatting

In de inleiding worden een aantal bezwaren genoemd voor het handhaven van het erosiemodel op basis van het CIRIA onderzoek, zoals dat momenteel in het VTV2006 en RWS 2012 staat. Deze bezwaren worden opgeheven door over te stappen op de cumulatieve overbelasting zoals gepresenteerd in hoofdstuk 2. De bouwstenen zijn aanwezig om dit erosiemodel als een softwaremodule in Ringtoets te hangen, echter hiervoor zijn nog een aantal stappen nodig zoals aangeven in Hoofdstuk 4.

Er zijn twee grootschalige proeven uitgevoerd die kunnen worden gebruikt voor de validatie van het model (Hoofdstuk 3). De validatieproeven onderschrijven de geldigheid van het cumulatieve overbelastingmodel voor toepassing op het buitentalud. De validatie is echter niet optimaal geweest, omdat de proeven niet hebben geleid tot falen van de grasbekleding. Alleen het minder nauwkeurige schadebeeld 'meerdere kale plekken' en zelfs geen schade zijn gehaald. Daarom bestaat de behoefte om later nog verder te gaan met de validatie van het model en daarmee nog bestaande onzekerheden weg te nemen.

Desondanks wordt geconstateerd dat het voorgestelde cumulatieve overbelastingmodel beter is onderbouwd, ook vanuit de fysische processen die spelen bij erosie van de graszode, en dat de validatie van het model beter is dan de validatie van het oploopmodel zoals momenteel in gebruik (VTV2006 / WTI2011).

Referenties

- VTV2006 Voorschrift toetsen op veiligheid, Rijkswaterstaat 2007
- RWS 2012 Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, Rijkswaterstaat 2012
- Deltares 2010 Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied, Deltares kenmerk 1202512-000-GEO-0002, drs. G.A.M. Kruse