

DEELONDERZOEK 5.1  
VAN HET ONDERZOEKSPROGRAMMA  
KENNISLEEMTES  
STEENBEKLEDINGEN

**KAPSTOK  
PROBABILISME**

**(stap 2: doorontwikkeling)**

Opdrachtnummer: 1204-0021-000

Opdrachtgever : Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044  
2600 GA Delft

Projectleider : ir. M.T. van der Meer  
Hoofd Adviesafdeling Waterbouw

Rapport opgesteld door : ir. J.D. Stoop  
Adviseur Waterbouw  
ir. H.S.O. Kapinga  
Adviseur Waterbouw

VERSIE	DATUM	OMSCHRIJVING WIJZIGING	PARAAF PROJECTLEIDER
1	16 oktober 2004	1e versie	
2	12 november 2004	eindconcept	
3	8 februari 2004	t.b.v. 2e overleg toplaagdeskundigen	
4		verbeterd eindconcept	

doc.: 1204-0021-000.r04 zonder locatie

## INHOUDSOPGAVE

Blz.

1.	INLEIDING .....	1
2.	BESCHRIJVING VAN HET ONDERZOEK .....	2
	2.1 Definitie .....	2
	2.2 Doel .....	3
	2.3 Probleemanalyse .....	3
	2.4 Aanpak .....	4
3.	ONDERZOEKSRESULTATEN .....	6
	3.1 Basisgegevens uit te werken case .....	6
	3.1.1 Samenstelling van de lijst met representatieve profielen .....	6
	3.1.2 Selectie en beschrijving profiel eerste case .....	6
	3.1.3 Hydraulische randvoorwaarden eerste case .....	8
	3.2 Uitwerking case volgens deterministische aanpak .....	8
	3.2.1 Inleiding .....	8
	3.2.2 Toplaaginstabiliteit onder golfaanval (ZTG) .....	9
	3.2.3 Afschuiving (ZAF) .....	10
	3.2.4 Materiaaltransport vanuit de ondergrond (ZMO) .....	10
	3.2.5 Materiaaltransport vanuit granulaire laag (ZMG) .....	10
	3.3 Inventarisatie beschikbare probabilistische formuleringen .....	10
	3.3.1 Stabiliteit van de top laag .....	11
	3.3.2 Reststerkte steenzetting op granular filter en kleilaag .....	11
	3.3.3 Overig .....	12
	3.4 Consultatie van deskundigen bekledingen .....	12
	3.4.1 Inleiding .....	12
	3.4.2 Bevindingen aangaande opzet en structuur van de gebeurtenissenboom .....	13
	3.4.3 Bevindingen aangaande onderliggende rekenmodellen .....	13
	3.4.4 Koppeling cases aan deelonderzoeken .....	13
	3.5 Aanpassing van de case .....	13
	3.5.1 Numerieke aanpassingen .....	13
	3.5.2 Aangepaste deterministische beoordeling top laaginstabiliteit (ZTG) .....	14
	3.5.3 Aangepaste deterministische beoordeling afschuiving (ZAF) .....	15
	3.5.4 Aangepaste deterministische beoordeling materiaaltransport (ZMO en ZMG) .....	15
	3.6 Toepassing probabilistische aanpak op de case .....	16
	3.6.1 Aangepaste gebeurtenissenboom .....	16
	3.6.2 Rekenaanpak .....	17
	3.6.3 Rekenresultaten .....	18
	3.6.4 Gevoeligheidsanalyse .....	19
	3.6.5 Interpretatie kansberekeningen .....	21
4.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....	23
	4.1 Conclusies .....	23
	4.2 Aanbevelingen .....	24
	LITERATUUR .....	25

## BIJLAGEN

- BIJLAGE 1: ONDERZOEKSPROGRAMMA KENNISLEEMTEN STEENBEKLEDINGEN
- BIJLAGE 2: GESELECTEERDE CASES
- BIJLAGE 3: STEENTOETSBEoordELING VAN DE UIT TE WERKEN CASE
- BIJLAGE 4: BESPREEKVERSLAGEN VAN DE DESKUNDIGENBESPREKINGEN
- BIJLAGE 5: GEBEURTENISSENBOOM
- BIJLAGE 6: OVERZICHT PROBABILISTISCHE BEREKENING
- BIJLAGE 7: NOTITIE FACTOREN FAALMECHANISMEN TOPLAAG
- BIJLAGE 8: AANVULLENDE BEREKENINGEN GEVOELIGHEIDSANALYSE

## 1. INLEIDING

Op 14 juni 2004 ontving Fugro Ingenieursbureau B.V. te Nieuwegein van Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde te Delft de opdracht<sup>1</sup> voor het verder uitwerken van de 'Kapstok probabilisme'.

Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenbekledingen, als onderdeel van de waterkering, vijfjaarlijks getoetst te worden conform de Leidraad Toetsen op Veiligheid. In de praktijk is gebleken dat op basis van de huidige wetenschappelijke kennis aan veel steenbekledingen geen definitief toetsoordeel toegekend kan worden. In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouw van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart. Het doel van dit programma is het reduceren van kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten.

Binnen dit onderzoeksprogramma heeft voorliggend rapport betrekking op de verdere uitwerking van onderdeel 5.1: 'Algemeen Onderzoek; Toepassing probabilistische rekenmethoden; Kapstok probabilisme'. Een eerste opzet van dit onderdeel is reeds eerder gerapporteerd [Fugro 2004]. Het totale onderzoeksprogramma is nader beschreven in [Fugro 2003].

Dit rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt het onderzoek gedefinieerd en afgebakend, en worden de probleem- en doelstelling beschreven. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de toegeleverde lijst met geselecteerde cases, aan de hand waarvan de verdere inhoudelijke uitwerking van de probabilistische kapstok gestalte zou moeten krijgen. Uit deze lijst is vervolgens één case geselecteerd die in het kader van dit deelonderzoek daadwerkelijk concreet wordt uitgewerkt. Na een eerste deterministische beoordeling van deze case en een schets van de beschikbare mogelijkheden voor probabilistische beoordeling zijn een tweetal besprekingen gehouden met diverse deskundigen op het gebied van bekledingen. Naast een overzicht van de belangrijkste bevindingen uit deze besprekingen zijn tenslotte ook de resultaten van de verdere behandeling van de geselecteerde case beschreven. In hoofdstuk 4 worden interpretatie, conclusies en consequenties van de bevindingen uit de case beschouwd. Tenslotte wordt in hoofdstuk 5 nog eens expliciet teruggekoppeld naar het in het tweede hoofdstuk geformuleerde onderzoeksdoel.

Een overzicht van het totale onderzoeksprogramma is gegeven in bijlage 1. De belangrijkste gegevens van de in het kader van deze studie geselecteerde eerste vier cases zijn verzameld in bijlage 2. De deterministische toets van de hieruit geselecteerde eerste daadwerkelijk uit te werken case met behulp van het excel-programma 'Steentoets' is weergegeven in bijlage 3. De verslagen van de genoemde besprekingen met de bekledingdeskundigen zijn opgenomen in bijlage 4. De mede naar aanleiding van die besprekingen verder uitgewerkte gebeurtenissenboom, die basis zou moeten vormen van de probabilistische uitwerking van de gekozen case, is gegeven in bijlage 5.

---

<sup>1</sup> De werkzaamheden zijn uitgevoerd onder de vigerende algemene voorwaarden van Fugro Ingenieursbureau B.V die een aansprakelijkheidsbeperking bevatten.

In geval opdrachtgever de onderzoeksresultaten in dit rapport aan derden ter beschikking stelt, worden deze geacht daarmee de werking van de toepasselijke algemene voorwaarden te aanvaarden.

## 2. BESCHRIJVING VAN HET ONDERZOEK

### 2.1 Definitie

Met de 'Probabilistische kapstok' wordt bedoeld een basisstructuur, in de vorm van een gebeurtenissenboom, voor probabilistische beoordeling van de stabiliteit van steenbekledingen. In de gebeurtenissenboom zijn de verschillende achtereenvolgende gebeurtenissen, die kunnen optreden wanneer een steenbekleding aan hydraulische belastingen onderhevig is, op een gestructureerde wijze in beeld te brengen. Deze gebeurtenissenboom kan vervolgens worden opgetuigd met een probabilistische rekenaanpak voor de inschatting van de kans op de ongewenste topgebeurtenis 'falen van de bekleding'.

In het kader van dit deelonderzoek is een aanzet gegeven voor de nadere uitwerking hiervan voor met name het faalmechanisme 'instabiliteit van de toplaag (door golfbelasting)'. Dit is één van de drie hoofdfaalmechanismen van de bekleding naast 'afschuiving (van de bekleding en/of de ondergrond)' en 'materiaaltransport (vanuit ondergrond en onderlagen)'.

Het uitgevoerde onderzoek in het kader van de ontwikkeling van de probabilistische kapstok maakt deel uit van deelonderzoek 5 'Probabilistische rekenmethoden'. Het heeft verder nauwe relaties met de werkzaamheden die worden uitgevoerd in het kader van deelonderzoek 1 'Herbeschouwing huidige toetscriteria' en deelonderzoek 4 'Onderzoek reststerkte'.

Het onderzoek is als volgt afgebakend:

- Het falen van de steenbekleding is gedefinieerd als het aan de oppervlakte komen te liggen van de kern van de dijk. In geval van een kleidijk is de grens tussen onderlaag en kleikern vaak niet duidelijk aan te geven. Voor die gevallen is reeds eerder in overleg met de opdrachtgever deze grens voorlopig arbitrair vastgesteld op 1,5 meter (dikte onderlaag). Uiteraard kan deze grens worden herzien wanneer nadere inzichten daartoe aanleiding geven.
- Conform [TAW 2003] worden er drie initiële hoofdfaalmechanismen voor steenbekledingen onderscheiden: toplaaginstabiliteit, afschuiving en materiaaltransport.
- Het bezwijken van de steenbekleding door andere oorzaken dan een extreme windgolfbelasting, zoals bijvoorbeeld mechanische slijtage, klimatologische invloeden, holengraverij of onzorgvuldige uitvoering, valt buiten het kader van dit onderzoek.
- Het indirect bezwijken van de steenbekleding door andere faalmechanismen van de dijk, zoals micro-instabiliteit, macro-instabiliteit, piping of overslag valt eveneens buiten het kader van dit onderzoek. Verondersteld wordt dat deze andere faalmechanismen zelf al falen van de dijk inhouden. De bijdragen via het falen van de bekleding zijn daarmee irrelevant.
- Evenmin wordt in het kader van dit onderzoek het ontstaan van deze andere faalmechanismen ten gevolge van het (gedeeltelijk) falen van de steenbekleding beschouwd. Daarmee is de kans op de gebeurtenissenreeks schade aan de bekleding en daardoor geïnitieerd ander faalmechanisme verwaarloosbaar klein verondersteld ten opzichte van de kans op de gebeurtenissenreeks schade aan de bekleding gevolgd en tekort aan reststerkte van de bekleding.
- Overgangsconstructies kunnen op twee manieren een negatief effect hebben op de veiligheid van de dijk: ze kunnen de stabiliteit van de aansluitende bekleding negatief beïnvloeden en ze kunnen zelf falen. Het eerste effect moet in de kapstok kunnen worden meegenomen, het tweede wordt buiten beschouwing gelaten.
- De steenbekledingen worden verondersteld bij aanvang van de (storm)belasting vrij te zijn van schade. Uitgangspunt is daarmee 'goed beheer' en een spoedig herstel van eventueel optredende (storm)schade.

Bij het laatstgenoemde uitgangspunt valt op te merken dat het optreden van schade weliswaar duidt op een lokaal sterktekort, maar dit hoeft niet per definitie onacceptabel zijn. Uit oogpunt van veiligheid kan de faalkans van de bekleding in zijn totaliteit (de reststerkte in aanmerking nemende) immers nog best klein genoeg zijn. Voorwaarde is dan wel dat de schade binnen zeker moment weer hersteld is. Het optreden van meerdere stormbelastingen achter elkaar, welke ieder afzonderlijk op een schadevrije bekleding naar verwachting hoogstens tot schade maar nog niet tot falen van de

bekleding zouden leiden, kunnen namelijk zonder tussentijds herstel wellicht alsnog tot een zodanige accumulatie van schade leiden dat alsnog gesproken moet worden van falen van de bekleding. Vertaling van deze voorwaarde naar een praktisch hanteerbare eis aan de toelaatbare kans op schade aan de bekleding zou nog nader onderzocht moeten worden. Voorlopig zou echter bijvoorbeeld gemakshalve als eis gehanteerd kunnen worden dat de kans op het meer dan één keer optreden van schade binnen een enkel jaar kleiner dient te zijn dan de normfrequentie. Daarmee wordt er impliciet van uitgegaan dat het twee maal binnen een jaar optreden van stormschade aan de bekleding met grote waarschijnlijkheid leidt tot het falen van de bekleding omdat er dan onvoldoende tijd is om de eerste opgetreden schade te herstellen.

De onderdelen waaruit steenzettingen zijn opgebouwd kunnen stenen, blokken, zuilen, elementen, enzovoorts zijn. Als in dit rapport over stenen wordt gesproken, worden hiermee impliciet ook alle andere typen onderdelen bedoeld.

## **2.2 Doel**

Het in dit rapport beschreven onderzoek is een vervolg op een reeds eerder gestart onderzoeksspoor. In het kader daarvan is al eerder een eerste opzet van de zogenaamde probabilistische kapstok voor steenbekledingen opgesteld. Deze is beschreven in [Fugro 2004]. Met de probabilistische kapstok is bedoeld een gebeurtenissenboom waarbinnen de opeenvolgende situaties in het faalproces van een steenbekleding zijn weergegeven. Door hier rekenmodellen in te hangen voor de verschillende onderdelen van de onderscheiden faalprocessen kan de combinatie van de achtereenvolgende faalprocessen worden doorgerekend tot een resulterende faalkans van die bekleding (de kans op een gat in de bekleding tot op de kern van de dijk). In eerste instantie is de opgestelde boom al een keer gevuld met diverse zeer rudimentaire en niet geverifieerde rekenmodellen. Aan de berekende numerieke waarden kon derhalve geen betekenis worden toegekend.

Het doel van dit vervolgonderzoek betreft het verifiëren en zonodig verbeteren van de eerder opgezette structuur van de gebeurtenissenboom, het inventariseren van beschikbare en bruikbare bouwstenen voor probabilistische invulling van de boom, en het nader verkennen van de mogelijkheden en beperkingen van het probabilistisch rekenen aan steenbekledingen alsmede de aansluiting daarvan op de deterministische rekenregels.

Het onderliggende primaire doel van dit onderzoeksspoor is om de gevoeligheden voor onzekerheden in de beoordeling van steenbekledingen expliciet in beeld te kunnen brengen, en daarmee ook nut en noodzaak van onderzoek. De gebeurtenissenboom met daarin de probabilistische rekeninstrumenten gebruiken voor een absolute beoordeling van bekledingen in termen van kansen is hooguit op lange termijn een secundair doel.

## **2.3 Probleemanalyse**

De beoordeling van steenbekledingen volgens de huidige toetsregels, zoals beschreven in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [V&W 2004] en het Technisch Rapport Steenzettingen [TAW 2003], blijkt in de praktijk vaak niet tot een voldoende of goed resultaat te leiden. Het gevoel bestaat dat in een deel van die gevallen een belangrijke oorzaak is gelegen in een overmaat aan veiligheid in de huidige toetsregels. Deze overmaat aan veiligheid zal pas werkelijk een overmaat blijken wanneer kan worden aangetoond dat onzekerheden, die met toepassing van de huidige toetsregels worden geacht in voldoende mate te zijn afgedekt, kleiner blijken te zijn.

Om deze reden is het nu lopende onderzoeksprogramma gestart. Logische vragen die daarbij gesteld kunnen worden zijn dan: welke onzekerheden zijn dominant, welke onzekerheden zijn met onderzoek het best te verkleinen, en welke aanscherping van de rekenregels is mogelijk gegeven bepaalde onderzoeksresultaten? Onderzoek naar probabilistische rekenmethoden moet bijdragen aan beantwoording van deze vragen.

## 2.4 Aanpak

Gezien het doel en de complexiteit van de materie is gekozen voor een cyclische aanpak ('groeimodel'), waarbij regelmatig wordt teruggekoppeld en afgestemd met de deskundigen/onderzoekers, en de bruikbaarheid van rekenmethode en onderzoeksresultaten wordt getoetst door deze toe te passen op een set referentiecasses.

Onderscheiden worden derhalve meerdere stappen. In de reeds uitgevoerde eerste stap is, zoals al eerder aangegeven, een eerste opzet van de probabilistische kapstok opgesteld.

Voor verdere uitwerking hiervan in de tweede stap (onderwerp van het in dit rapport beschreven onderzoek) is voorgesteld om een aantal cases te selecteren en er daarvan één uit te werken. Deze case kan dan vervolgens mede dienen als basis voor overleg met inhoudelijk deskundigen op het gebied van bekledingen.

Concreet zijn in het kader van de doorontwikkeling van de kapstok de volgende stappen onderscheiden:

### 1. *Samenstellen lijst van representatieve dijkvakken en selectie eerste case*

Allereerst is een verzameling gemaakt van representatieve dijkvakken waarvan de bekleding in een case onderzocht zou kunnen worden. Uit deze lijst van mogelijke cases is in overleg met de DWW één case gekozen welke als eerste is uitgewerkt.

### 2. *Uitwerken geselecteerde case*

De geselecteerde case is vervolgens aan de hand van de bestaande deterministische beoordelingsregels beoordeeld. Daarnaast is de case aan de hand van de gebeurtenissenboom en daarin opgenomen probabilistische rekenregels doorgerekend. Hiertoe is eerst de kapstok inhoudelijk verder uitgewerkt, zowel voor wat betreft structuur, als voor wat betreft de erin op te nemen reeds beschikbare modellen en formuleringen, zoals bijvoorbeeld aanwezig in PC-ring [TNO 2003-A] of gebruikt in de studie VAST [RWS 2001]. Daarnaast is waarnodig voor de input van numerieke waarden van statistische parameters gebruik gemaakt van hetgeen aanwezig is binnen PC-ring.

### 3. *Onderzoek naar de aansluiting op de deterministische toetsmethodiek*

Om zicht te kunnen krijgen op hoe het resultaat van de probabilistische beoordeling zich verhoudt tot het resultaat van beoordeling volgens de deterministische toetsregels, is het resultaat van de deterministische beoordeling vergeleken met de resultaten van de probabilistische benaderingen. Daarmee wordt een eerste, voorlopig niet meer dan zeer globale, indruk verkregen van de relatie tussen de faalkans en het deterministisch toetscriterium.

### 4. *Consulteren deskundigen*

Aan de hand van de resultaten van de voorgaande stappen zijn in twee afzonderlijke sessies (apart voor de toplaag en de onderlagen) terzake deskundigen geconsulteerd. Bij deze sessies is een contactpersoon van DWW ook aanwezig.

In deze deskundigensessies zijn de volgende onderwerpen aan de orde gekomen:

- de bruikbaarheid van en tekortkomingen in de opzet en structuur van de kapstok;
- de bruikbaarheid van en tekortkomingen in de onderliggende (probabilistische) rekenmodellen;
- de koppeling van de cases aan de deelonderzoeken (ter beantwoording van de vraag welke cases voor welke deelonderzoeken het meest interessant zijn);
- de beoogde winst van de met de deelonderzoeken gegenereerde kennis en de wijze waarop dat in de boom zichtbaar kan worden gemaakt.

Naast het consulteren van de deskundigen die betrokken zijn bij het onderzoek is bij de beheerder nagegaan in hoeverre uitgangspunten die aan de kapstok ten grondslag liggen realistisch en acceptabel zijn.

Ter verificatie en mogelijk verbetering van de gehanteerde probabilistische rekenaanpak is de probabilistische behandeling van de case worden overlegd met ir. E.O.F. Calle, een deskundige op het gebied van probabilistische rekentechnieken.



### 3. ONDERZOEKSRESULTATEN

#### 3.1 Basisgegevens uit te werken case

##### 3.1.1 Samenstelling van de lijst met representatieve profielen

Door de opdrachtgever zijn gegevens toegestuurd van vier profielen binnen het beheersgebied van het Waterschap Zeeuwsche Eilanden. Deze profielen zijn gelegen aan de noordkant van de Westerschelde (Walcheren en Zuid-Beveland). De vier profielen vormen de eersten van de lijst van mogelijke cases. De gegevens zijn verzameld in het excel-spreadsheet 'ExpAlg probKapstoka.xls'. De belangrijkste kenmerken van de profielen zijn samengevat in de onderstaande tabel.

*Tabel 1: Belangrijkste kenmerken van de eerste vier mogelijke cases*

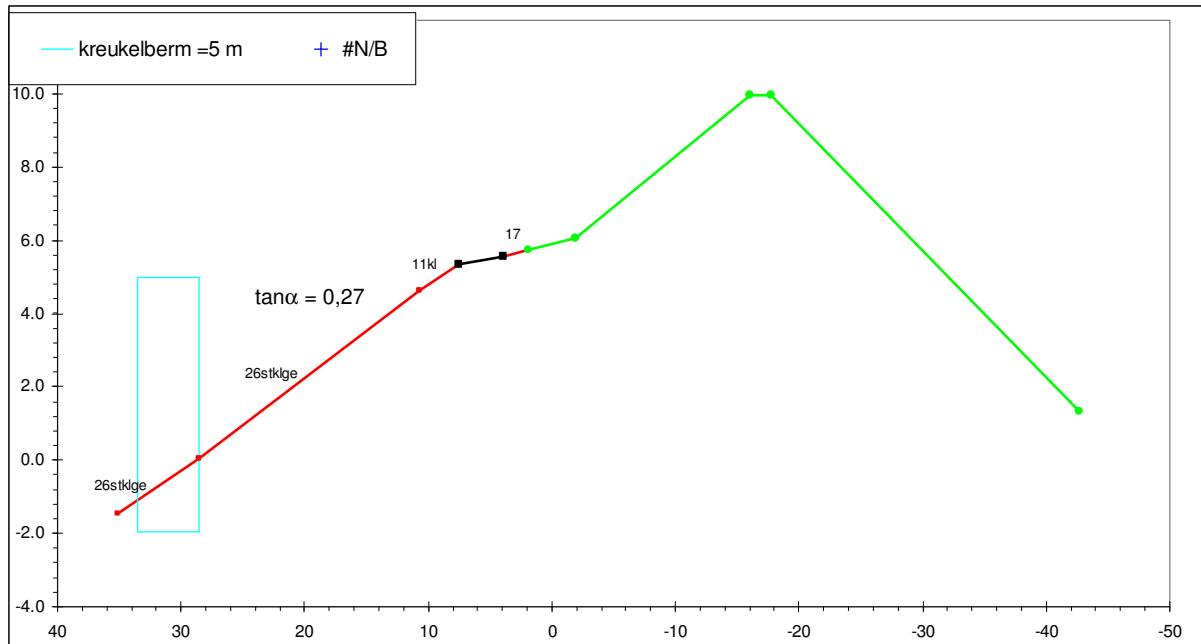
Nr.	Locatie	Toplaag	Filterlaag	Geotextiel	Onderlaag
1	Zimmerman-polder	Haringmanblokken (gekanteld)	puin / steenslag	ja	klei
2	Oost Inkelenspolder	gezette basalt, ingegoten met gietasfalt	puin + vlijlaag	nee	klei
3	Borssele-polder	gezette basalt, ingegoten en overlaagd met vol en zat gepenetreerde breuksteen	puin + vlijlaag	nee	klei
4	Zuidwatering	gezette basalt	steenslag	ja	klei

Een grafische samenvatting van de bekledingen van deze vier cases is gegeven in bijlage 2.

##### 3.1.2 Selectie en beschrijving profiel eerste case

In overleg met de opdrachtgever is ervoor gekozen profiel nummer 4 als eerste uit te werken case te kiezen. In figuur 1 is de locatie van dit profiel weergegeven. In figuur 2 is een schematische weergave van het profiel weergegeven zoals dat op basis van de gegevens in het toegeleverde excel-spreadsheet door het spreadsheet zelf is gegenereerd.

*Figuur 1: Locatie profiel 4 (Zuidwatering)*



Figuur 2: Profielschets van profiel 4

De in het profiel weergegeven codes langs het buitenbeloop corresponderen met de onder andere in het programma 'Steentoets' gehanteerde codes. De code 26 op het zwaarst door golven aangevallen deel staat voor een toplaag van gezette basalt.

Beschikbare relevante gegevens van de (basalt)bekleding van profiel 4 zijn verzameld in het reeds genoemde toegeleverde excel-spreadsheet. Deze gegevens zijn samengevat in tabel 2.

Tabel 2: Beschikbare gegevens basaltbekleding van profiel 4

Algemene beheergegevens		Gegevens bekleding	
jaar van aanleg	1985	percentage open oppervlak	10%
opgetreden schaden	nee	inklemming toplaagelementen	ja
zakkingen over grote oppervlakte	nee	steendikte (min. resp. max.)	30 cm, 40 cm
zakkingen individuele steen	5 cm	toplaag ingewassen/dichtgeslibd	nee/nee <sup>1)</sup>
opgetreden verschuiving	nee	filter dichtgeslibd	nee
ruimte tussen toplaag en filter	nee	filtermateriaal	steenslag
kwaliteit zetwerk	matig	D <sub>15</sub> filtermateriaal	40 mm
kwaliteit steen	goed	min. resp. gem. dikte filterlaag	10 cm, 10 cm <sup>2)</sup>
kwaliteit constructie opbouw	goed	geotextiel	ja
oordeel beheerder	goed	dikte kleilaag/samenstelling klei	30 cm/vettig <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> In de aangeleverde gegevens in het spreadsheet staat vermeld dat de toplaag zowel ingewassen als dichtgeslibd is. In de aangeleverde steentoetstabel van dit vak (zie bijlage 3) staat daarentegen vermeld dat de toplaag noch ingewassen noch dichtgeslibd is. Aangenomen mag worden dat op het niveau boven stormvloedpeil, hetgeen maatgevend zal zijn voor de veiligheidsbeoordeling van de basaltbekleding, geen sprake zal zijn van dichtslibbing.

<sup>2)</sup> De aangegeven blijkbaar zeer constante filterdikte (zowel minimum als gemiddelde waarde bedragen volgens opgave 10 cm) lijkt strijdig met de aangegeven variatie van de steendikte (minimaal 30 cm en maximaal 40 cm). Bij ontbreken van nadere informatie op dit punt wordt in de verdere uitwerking uitgegaan van een gemiddelde steendikte van 34 cm (conform de steentoetstabel) en wordt er verder van uitgegaan dat daarmee de dikte van het filter onder een individuele steen weliswaar kan variëren tussen 4 cm en 14 cm maar toch tenminste op steenvlakkniveau wel zeer constant is.

<sup>3)</sup> In het inwinformulier voor de verzameling van gegevens van bekledingen zoals dat door het waterschap de Zeeuwse Eilanden is opgesteld (zie bijlage II van de Handleiding STEENTOETS 3.32) worden vier kleikwaliteiten onderscheiden, respectievelijk vettig, zavelig, zanderig en gestructureerd. De klei in de bekleding van het hier beschouwde profiel 4 heeft volgens de beschikbaar gestelde gegevens het oordeel '1' gekregen. Aangenomen is dat hiermee 'vettig' is bedoeld.

Van de kwaliteitsoordelen die in de kolom met algemene beheergegevens in bovenstaande tabel zijn weergegeven is geen objectivering gevonden. Aangenomen mag worden dat deze oordelen een sterk kwalitatief karakter dragen.

Over de opbouw van het dijklichaam onder de kleilaag zijn geen gegevens toegeleverd.

### 3.1.3 Hydraulische randvoorwaarden eerste case

In de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 staan de gegevens voor de Westerschelde langs Walcheren in tabel 3.1 29-7 (hydraulische randvoorwaarden voor de Westerschelde). Hieruit blijkt dat voor het betreffende vak 12 moet worden uitgegaan van een toetspeil van NAP +5,35m. Een significante golfhoogte en golfperiode is echter niet gegeven.

Gegevens betreffende de hydraulische randvoorwaarden zijn separaat nageleverd in het bestand 'rikzgolvenOSenWS.xls'. Met de gegeven referentie van de dwarsprofiellocatie van 73.918,110 zijn vervolgens in dit bestand de relevante gegevens af te lezen voor de strekking tussen 73.650 en 74.050. De aangegeven waarden voor het gemiddeld hoogwater (GHW) en het toetspeil 2006 (TP2006) bedragen respectievelijk GHW = NAP +2,07m en TP2006 = NAP +5,50m. De gegevens betreffende de golfdata zijn weergegeven tabel 3.

Tabel 3: Golf randvoorwaarden voor case Zuidwatering

waterstand h [m +NAP]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	golfrichting [°]
2	2,50	7,00	van 196 tot 233
4	2,40	7,60	
6	2,60	7,80	

De hoek die de normaal op deze dijk maakt met de noord bedraagt 160 graden. De hoek van inval van de maatgevende golven varieert derhalve tussen 36 graden en 73 graden.

## 3.2 Uitwerking case volgens deterministische aanpak

### 3.2.1 Inleiding

De deterministische aanpak is de thans gangbare praktijk als het gaat om de beoordeling van de veiligheid van bekledingen. Voor nadere inhoudelijke informatie wordt verwezen naar met name het Technisch Rapport Steenzettingen [TAW 2003] alsmede het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) [V&W 2004]. Voor een beknopte samenvattende uiteenzetting over de huidige deterministische toetsmethode wordt ook verwezen naar de voorloper van dit rapport [Fugro 2004].

De beschouwde case bleek reeds in de praktijk al te zijn getoetst in steentoets. Hieruit bleek de bekleding 'goed' te scoren voor wat betreft toplaagstabiliteit en materiaaltransport, maar 'twijfelachtig' voor wat betreft afschuiven. Hierbij moet worden opgemerkt dat juist deze toets op afschuiven, welke in steentoets nog conform de LTV wordt uitgevoerd, in het nieuwe VTV aanzienlijk is veranderd. Niettemin scoort de bekleding bij toepassen van het nieuwe toetschema in het VTV voor afschuiven wederom twijfelachtig (zie paragraaf 3.2.3).

De volledige toegeleverde steentoetstabel is opgenomen in bijlage 3. In deze paragraaf is in aanvulling daarop de in het kader van dit onderzoek uitgevoerde inhoudelijke uitwerking van de deterministische toets beschreven op basis van de gegevens die separaat zijn toegeleverd voor een profiel uit de strekking waarop de steentoetsgegevens betrekking hebben, en welke zijn verzameld in het toegeleverde spreadsheet 'ExpAlg probKapstoka.xls'.

### 3.2.2 Toplaaginstabiliteit onder golfaanval (ZTG)

#### **Stabiliteit toplaag**

De eenvoudige methode voor beoordeling van de toplaagstabiliteit onder golfaanval maakt gebruik van grafieken waarin de parameter  $H_s/\Delta D$  en de parameter  $\xi_{op} = \tan\alpha / \sqrt{(H_s / L_{op})}$  tegen elkaar zijn uitgezet.

Op basis van de gegevens die zijn gepresenteerd in paragraaf 3.1 volgt:

$$\begin{aligned}H_s &= 2,40 + (1,5 / 2) \times (2,60 - 2,40) = 2,55 \text{ m (lin. interpol. tussen golfhoogten bij } h=4 \text{ en } h=6) \\ \Delta &= (2.900 - 1.025) / 1.025 = 1,83 \\ D &= 0,34 \text{ m (gemiddelde steendikte uitgaande van inklemming)} \\ \tan\alpha &= 0,27 \\ L_{op} &= gT_p^2 / 2\pi = 9,81 \times (7,60 + (1,5 / 2) \times (7,80 - 7,60))^2 / 2\pi = 93,8 \text{ m}\end{aligned}$$

Waarmee volgt:

$$\begin{aligned}H_s/\Delta D &= 4,10 \\ \xi_{op} &= 1,64\end{aligned}$$

Wanneer met deze gegevens getoetst wordt met behulp van figuur 8 - 2.8 uit het VTV (type 3b: steenzetting op granulaire laag, normale constructie, met  $C_{slib} = 1,0$ ) dan blijkt deze bekleding een score twijfelachtig op te leveren.

Wanneer vervolgens gedetailleerd wordt getoetst, met de ANAMOS-formules binnen het programma STEENTOETS, dan volgt de score goed (zie ook bijlage 3).

Hierbij wordt nog wel opgemerkt dat in de beoordeling met STEENTOETS is uitgegaan van een golfvalshoek van 0 graden, terwijl op basis van de golftrandvoorwaarden zou moeten zijn uitgegaan van een golfvalshoek van 36 graden tot 73 graden. Op het resultaat van de beoordeling heeft dit echter geen invloed, aangezien voor de invloedsfactor voor strijkgolven de waarde 1 is aangehouden. Deze invloedsfactor mag volgens de handleiding van STEENTOETS alleen worden veranderd in overleg met de opsteller van de randvoorwaarden (RIZA of RIKZ).

#### **Erosie toplaag en granulaire onderlaag**

Op reststerkte van de toplaag plus granulaire laag mag op grond van de gestelde voorwaarde aan de score van de toplaag op afschuiving niet gerekend worden (zie par. 3.2.3).

Als voor het vervolg het niet voldoen aan deze voorwaarde even genegeerd wordt, dan volgt voor de reststerkte  $t_{rg}$  berekend volgens de daarvoor in het VTV gegeven formule:

$$t_{rg} = 45,3 \cdot T_p \cdot \exp[-0,74 \cdot \sqrt{(H_s \cdot L_{op})}] = 0,004 \text{ uur (minder dan een minuut)}$$

Geconcludeerd kan worden dat zelfs als de voorwaarden voor het mogen toepassen van de reststerkteregel van toplaag en granulaire onderlaag genegeerd worden, nog maar erg weinig wordt bereikt.

Voor de duidelijkheid wordt opgemerkt dat reststerkte voor deze situatie dus niet nodig is. De beoordeling van de stabiliteit van de toplaag heeft immers al een score 'goed' opgeleverd.

#### **Erosie kleilaag**

De reststerkte van de kleilaag kan bepaald worden met behulp van tabel 8-2.1 uit de VTV. De tabel geeft echter geen waarden voor de reststerkte in geval van een waarde van  $H_s$  van groter dan 2 meter. Bij deze golfhoogte is een grens getrokken omdat het ervaringsgebied aangaande de erosiebestendigheid van klei zich uitstrekt tot golven van 1,5 meter. Is de significante golfhoogte groter dan 2 meter, zoals in deze case, dan mag er niet op reststerkte van de kleilaag gerekend worden.

### 3.2.3 Afschuiving (ZAF)

Bij ontbreken van gegevens over de opbouw van het dijklichaam onder de bekleding kan de bekleding niet op veiligheid tegen afschuiving worden getoetst. De score is dientengevolge 'twijfelachtig'.

Indien er vanuit kan worden gegaan dat het profiel geen zandscheg bevat, dan kan de veiligheid tegen afschuiven gedetailleerd worden beoordeeld (dit is nodig ervan uitgaande dat de bekleding niet op een kleikern ligt). Aan de gestelde eis van de gedetailleerde beoordeling blijkt dan bij invullen van de verstrekte gegevens evenmin te worden voldaan (zie ook figuur 4.20 uit het deel 'Toetsing' van het Technisch Rapport Steenzettingen:  $H_s/L_{op} \approx 0,03$  en  $\tan\alpha \approx 0,27$  levert bij  $H_s = 2,55$  m en  $\Delta D + b_f + b_k = 1,02$  m de score 'twijfelachtig' op, ongeacht de  $D_{15}$  van het zand onder de kleilaag).

### 3.2.4 Materiaaltransport vanuit de ondergrond (ZMO)

De toets op materiaaltransport vanuit de ondergrond levert op basis van het gedrag het resultaat 'goed' op. De gegevens in de toegeleverde informatie geven immers onvoldoende reden te twifelen aan het gedrag. Zakkingen over grote oppervlakten zijn niet geconstateerd, en zakkingen van individuele stenen komen voor tot maximaal ca. 5 cm (zie tabel 2). De beoordelingsregels in de VTV leggen de grens tussen de score 'goed' en 'twijfelachtig' op een verzakking van de individuele steen van ca. 5 cm.

Indien op basis hiervan aan de beoordeling van het gedrag toch het predikaat 'twijfelachtig' zou zijn toegekend, dan zou nadere beoordeling met behulp van het programma STEENTOETS het resultaat 'onvoldoende' opgeleverd hebben. Oorzaak is het ontbreken van gegevens betreffende zowel de  $O_{90}$  van het geotextiel als de gradering van het zand in de ondergrond, beiden benodigd voor de toets op geometrische dichtheid.

### 3.2.5 Materiaaltransport vanuit granulaire laag (ZMG)

De toets op materiaaltransport vanuit de granulaire laag levert op basis van het gedrag het resultaat 'goed' op. De gegevens in de toegeleverde informatie geven immers onvoldoende reden te twifelen aan het gedrag. Zakkingen over grote oppervlakten zijn niet geconstateerd, en zakkingen van individuele stenen komen voor tot maximaal ca. 5 cm (zie tabel 2). De beoordelingsregels in de VTV leggen de grens tussen de score 'goed' en 'twijfelachtig' op een verzakking van de individuele steen van ca. 5 cm.

Indien op basis hiervan aan de beoordeling van het gedrag toch het predikaat 'twijfelachtig' zou zijn toegekend, dan zou met nadere beoordeling vermoedelijk alsnog het resultaat 'goed' worden gehaald. De gegeven diameter van het filtermateriaal is relatief groot.

## 3.3 Inventarisatie beschikbare probabilistische formuleringen

In het recente verleden zijn reeds diverse onderzoeken uitgevoerd waarin de probabilistische benadering van de veiligheid van bekledingen een meer of minder grote rol speelde. Voor een overzicht hiervan, inclusief beknopte toelichting, wordt verwezen naar de voorloper van dit rapport [Fugro 2004].

In deze paragraaf wordt meer specifiek ingegaan op reeds beschikbare probabilistische formuleringen voor de berekening van de kans op falen van de bekleding.

### 3.3.1 Stabiliteit van de toplaag

In [RWS 2001] is een inventarisatie gemaakt van bestaande betrouwbaarheidsfuncties voor de stabiliteit van de toplaag van een steenbekleding. Deze functies blijken op één na allemaal van een min of meer vergelijkbare vorm te zijn. De oorzaak hiervan is dat deze formuleringen allen dezelfde oorsprong hebben.

De in de hier aangehaalde rapportage uiteindelijk gekozen formulering lijkt sterk op de formulering die binnen PC-ring gehanteerd wordt voor een steenzetting op een granulaire filter. Deze laatste kan worden geschreven als:

$$\text{bezwijken bekleding} = \{Z_b < 0\}, \text{ met } Z_b = \min\{Z_{b1}, Z_{b2}\}$$

De grenstoestandfuncties  $Z_{b1}$  en  $Z_{b2}$  zijn als volgt geformuleerd:

$$Z_{b1} = \frac{c_f \Delta D^{1,67} \Gamma^{-1,67}}{(\Lambda \tan \alpha_u)^{0,67}} - \frac{r H_s}{(r S_{op})^{0,33}} \quad (\text{Anamos-fit})$$

en

$$Z_{b2} = c_{gf} \left( \frac{\tan \alpha_u}{\sqrt{S_{op}}} \right)^{-2/3} - \frac{H_s}{\Delta D} \quad (\text{Algemene stabiliteitsgrens of } 6\xi\text{-regel})$$

met

- $c_f$  = coëfficiënt voor de sterkte van de steenzetting (5,2) [-]
- $\Delta$  = relatieve dichtheid [-]
- $D$  = dikte steenzetting [m]
- $\Gamma$  = invloedsfactor waarmee wordt verdisconteerd het effect van onderlinge wrijving tussen stenen, massa draagbaarheid en verminderde toestroming [-]
- $\Lambda$  = lek lengte [m]
- $\alpha_u$  = helling buitentalud [-]
- $S_{op}$  = golfsteilheid [-]
- $H_s$  = significante golfhoogte [m]
- $r$  = richtingsreductiefactor (i.v.m. golf invalshoek) [-]
- $c_{gf}$  = coëfficiënt voor de sterkte van de steenzetting (7,5) [-]

Voor nadere gegevens met betrekking tot berekening van sommige van deze parameters, alsmede handreikingen met betrekking tot aan te houden waarden voor ligging en spreiding van sommige van deze parameters wordt verwezen naar [TNO 2003-A] en [TNO 2003-B]. Van de beide coëfficiënten in bovenstaande parameterdeclaratie is overigens ter indicatie al de in genoemde bronnen aangegeven waarde voor ligging tussen haakjes vermeld.

### 3.3.2 Reststerkte steenzetting op granulaire filter en kleilaag

Voor erosie van de steenzetting op een granulaire filter en erosie van de onderliggende kleilaag wordt de grenstoestandfunctie gegeven door:

$$Z_r = t_{RS} + t_{RK} - t_s$$

met

- $t_{RS}$  = reststerkte steenzetting op granulaire filter [s]
- $t_{RK}$  = reststerkte kleilaag [s]
- $t_s$  = stormduur [s]

De formuleringen voor reststerkte steenzetting op granulair filter en reststerkte kleilaag zijn in de verschillende geraadpleegde bronnen alle van dezelfde vorm, en verschillen uitsluitend voor wat betreft aangehouden waarden van coëfficiënten. In de handleiding van PC-ring [TNO 2003-A] zijn deze formuleringen als volgt geschreven:

$$t_{RS} = 57 \cdot 10^3 T_p e^{-\sqrt{H_s L_{op}} / c}$$

$$t_{RK} = \frac{0,4 L_K C_{RK}}{r^2 H_s^2}$$

met

$T_p$  = piekperiode [s]

$c$  = coëfficiënt (1,5 à 2,4 afhankelijk van hoek van inval) [m]

$L_K$  = breedte van de afdeklaag van klei [m]

$C_{RK}$  = coëfficiënt met betrekking tot de erosiebestendigheid van de kleilaag (7.000 à 54.000 afhankelijk erosiebestendigheid van de klei) [ms]

Voor nadere gegevens met betrekking tot berekening van sommige van deze parameters, alsmede handreikingen met betrekking tot aan te houden waarden voor ligging en spreiding van sommige van deze parameters wordt wederom verwezen naar [TNO 2003-A] en [TNO 2003-B]. Alleen van de beide coëfficiënten in bovenstaande parameterdeclaratie is ter indicatie al de in genoemde bronnen aangegeven waarde voor ligging tussen haakjes vermeld.

### 3.3.3 Overig

De formuleringen in voorgaande subparagrafen hebben alle betrekking op falen van de bekleding geïnitieerd door falen van de toplaag onder golfaanval. Bestaande uitdrukkingen voor de probabilistische benadering van het falen van de bekleding door materiaaltransport vanuit de ondergrond of vanuit het filter zijn niet bekend. Hetzelfde geldt voor het falen van de bekleding door afschuiven van de toplaag of afschuiven van de kleilaag.

## 3.4 Consultatie van deskundigen bekledingen

### 3.4.1 Inleiding

In oktober 2004 zijn een tweetal besprekingen zijn gehouden, apart voor toplaag en onderlagen. Ter voorbereiding is de diverse deskundigen een voorbereidend memo gestuurd, waarin hiervoor beschreven bevindingen zijn samengevat, en aan de hand waarvan vragen zijn gesteld. Dit memo is opgenomen in bijlage 4.

Het doel van de consultatie van deskundigen was meerledig:

1. vraag om advies m.b.t. de bruikbaarheid van en tekortkomingen in de opzet en structuur van de gebeurtenissenboom;
2. vraag om advies m.b.t. de bruikbaarheid van en tekortkomingen in de onderliggende rekenmodellen;
3. vraag om advies m.b.t. de koppeling van de cases aan de deelonderzoeken (ter beantwoording van de vraag welke cases voor welke deelonderzoeken het meest interessant zijn);
4. vraag om advies m.b.t. de beoogde winst van de met de deelonderzoeken gegenereerde kennis en de wijze waarop dat in de boom zichtbaar kan worden gemaakt.

De verslagen van de beide besprekingen zijn eveneens opgenomen in bijlage 4.

### 3.4.2 Bevindingen aangaande opzet en structuur van de gebeurtenissenboom

De oorspronkelijke gebeurtenissenboom, zoals opgesteld in het kader van de eerste stap van de studie, is vatbaar voor verbetering en moet met name gedetailleerder worden uitgewerkt. De naar aanleiding hiervan verbeterde gebeurtenissenboom is gepresenteerd in bijlage 5. Een toelichting op de structuur van deze boom is ook gegeven in paragraaf 3.6.

Gerealiseerd moet worden dat het falen van de bekleding nog niet per definitie falen van de dijk inhoudt. Ook het dijklichaam zelf moet immers eerst voor een belangrijk deel eroderen voordat gesproken kan worden van een doorbraak en daarmee falen van de dijk. Bij beoordeling van de bekleding wordt dit laatste echter niet meegenomen, net zomin als dat bij de beoordeling van de diverse andere te onderscheiden faalmechanismen gedaan wordt.

### 3.4.3 Bevindingen aangaande onderliggende rekenmodellen

De probabilistische formuleringen die momenteel direct beschikbaar zijn (met name vanuit PC-ring, zie paragraaf 3.3) dekken nog lang niet alle in de gebeurtenissenboom onderscheiden mechanismen in het faalproces af. Slechts een deel van de knooppunten kan ermee gevuld worden.

Daarnaast is gesteld dat de bestaande betrouwbaarheidsfuncties, zoals aanwezig in PC-ring, gebaseerd zijn op eenvoudige onderliggende deterministische rekenmodellen. Er zijn inmiddels geavanceerder rekenmodellen in ontwikkeling die echter minder eenvoudig in een probabilistische aanpak ondergebracht kunnen worden. Dit is in zijn algemeenheid een manco van de probabilistische (niveau 2) rekenaanpak: deze loopt altijd achter de fysische (deterministische) modelontwikkeling aan. De vraag is dan dus eigenlijk hoe je het deterministische state-of-the-art rekenmodel snel in een probabilistische vorm kunt gieten omdat anders het probabilistisch rekenen eigenlijk een stap achteruit is in plaats van vooruit.

Tot slot is nog eens benadrukt dat het hele onderzoek naar de probabilistische aanpak niet als primair doel heeft een juiste waarde van de faalkans uit te kunnen rekenen. Het gaat erom het inzicht in de gevoeligheid van de beoordeling voor onzekerheden en variaties van parameterwaarden te vergroten.

### 3.4.4 Koppeling cases aan deelonderzoeken

Gesteld is dat case 1 (gekantelde Haringmanblokken) en case 4 (basalt) de twee relatief eenvoudige cases zijn in de set van vier aangedragen cases. Onderkend wordt dat het voor de hand ligt te beginnen met de eenvoudigste cases waarvan voldoende informatie voorhanden is.

Wel is het zo dat de voor de eerste uitwerking gekozen case 4 net weer even wat ongelukkig uitpakt vanwege de grote golf en de dunne onderlagen. De zichtbaarheid van de sterktebijdrage van de onderlagen komt niet naar voren. Aangegeven is dat de vrijheid moet worden genomen om de gegevens van de case zo aan te passen dat een interessantere case ontstaat. De sterktebijdrage van de onderlagen zou je daarmee zichtbaar willen maken.

## 3.5 Aanpassing van de case

### 3.5.1 Numerieke aanpassingen

In navolging van het voorstel de gegevens van de case aan te passen zodanig dat een interessantere case ontstaat, wordt voor verdere uitwerking uitgegaan van de volgende veranderde gegevens:

- kleinere zuildikte van 0,20 m i.p.v. 0,34 m
- lagere golf van 1,50 m bij TP2006 i.p.v. 2,55 m (en bijbehorende lagere piekperiode  $T_p = 6,53$  s)
- dikkere klei-onderlaag van 1,00 m i.p.v. 0,30 m



### 3.5.2 Aangepaste deterministische beoordeling toplaaginstabiliteit (ZTG)

Bij deze gegevens blijkt de stabiliteit van de toplaag, wanneer getoetst met behulp van STEENTOETS, nog maar juist te voldoen. Zoals verwacht mag worden voor deze relatief open bekleding wordt dit bepaald door het  $6\xi$ -criterium, immers:

- $H_s / \Delta D = 1,50 / 1,83 \times 0,20 = 4,1$
- $6\xi_{op}^{-2/3} = 6 \times (\tan\alpha / \sqrt{(H_s / L_{op})})^{-2/3} = 6 \times (0,27 / \sqrt{(1,50 / 66,47)})^{-2/3} = 6 \times 1,80^{-2/3} = 4,1$

Indien aanvullend wordt getoetst op reststerkte, dan blijkt voor de reststerkte van de toplaag en granulaire onderlaag een waarde te worden berekend van 2,4 uur, op basis van de volgende berekeningen:

- $t_{rg} = 45,3 \cdot T_p \cdot \exp[-0,74 \cdot \sqrt{(H_s \cdot L_{op})}] = 45,3 \times 6,53 \times \exp[-0,74 \times \sqrt{(1,50 \times 66,47)}] = 0,2$  uur
- $t_{rk} = 3 - 5/6 \times (3-2) = 2,2$  uur

De berekende bijdrage van de kleilaag volgt uit lineaire interpolatie tussen de waarden voor een kleilaagdikte van 1,0 meter en een golf van 1,0 meter (reststerkte is dan 3 uur, zie tabel 8-2.1 uit het VTV) respectievelijk een golf van 1,6 meter (reststerkte is dan 2 uur, zie eveneens genoemde tabel).

De totale reststerkte van filterlaag en kleilaag bedraagt derhalve in dit geval  $0,2 + 2,2 = 2,4$  uur.

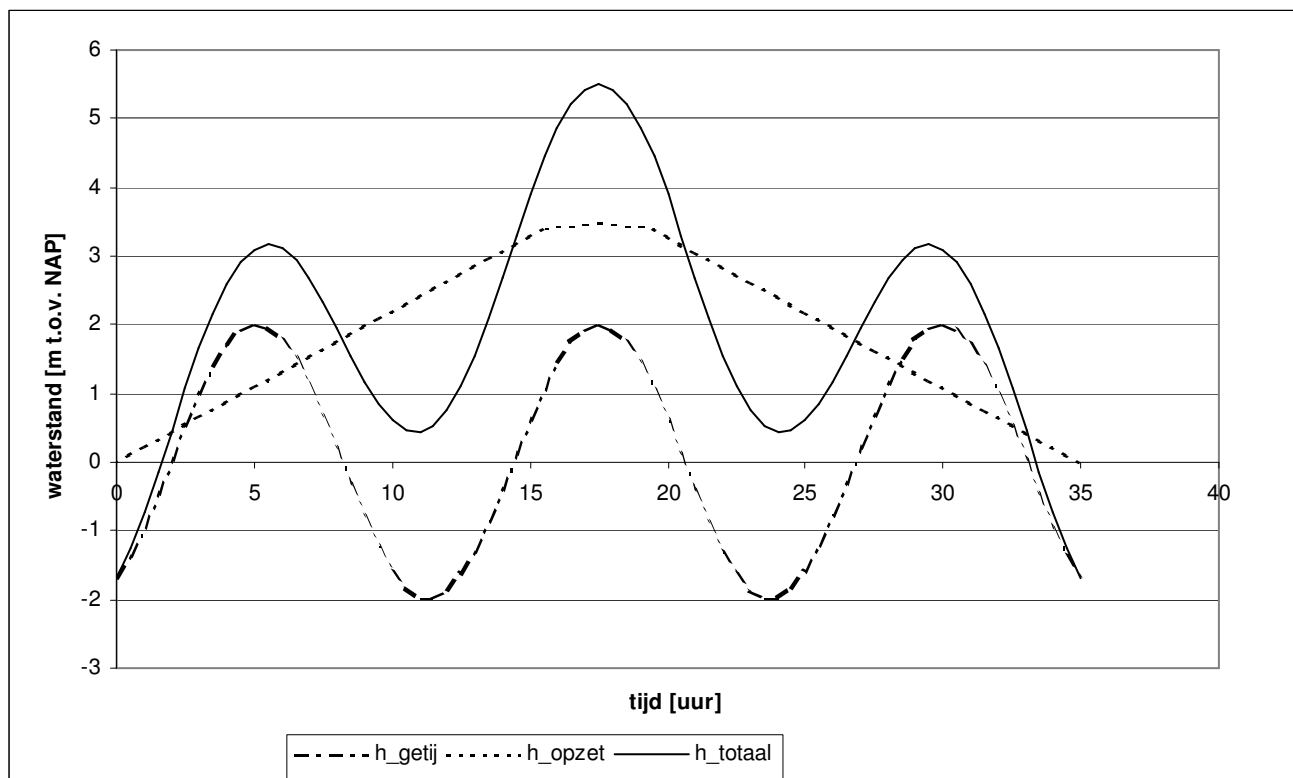
Wanneer het verloop van het hoogwater vervolgens wordt geconstrueerd conform de aanwijzingen in het VTV (zie figuur 4-3.9 uit het VTV), dan volgt bij een gemiddelde getij-amplitude van 2,0 meter, en een toetspeil van NAP +5,50m, een waterstandsverlooptlijn als weergegeven in figuur 3. Uitgaande van dit waterstandsverloop is per hoogteniveau van de bekleding  $h$  een totale belastingduur door invallende golven vast te stellen. Deze belastingduur wordt bepaald als de totale duur binnen de storm dat de waterstand zich bevindt tussen  $h + 0,1H_s \xi_{op}$  en  $h + 0,7H_s \xi_{op}$ . Overigens kan hierbij worden opgemerkt dat een faseverschuiving tussen verloop van getij- en windopzet, waarbij dus de top van het hoogwater en de maximale windopzet niet meer precies samenvallen, afhankelijk van het beschouwde hoogteniveau mogelijk tot een langere belastingduur leidt.

In tabel 4 zijn berekende belastingduren van een tweetal hoogteniveaus van de bekleding samengevat voor zowel de situatie dat de piek van de windopzet precies samenvalt met de piek in de getijdscyclus als voor de situatie dat deze precies samenvalt met het dal in de getijdscyclus.

Tabel 4: belastingduur toplaag door invallende golven

bekledingsniveau	belastingvenster		belastingduur	
	min: $h + 0,1H_s \xi_{op}$	max: $h + 0,7H_s \xi_{op}$	opzet en getij in fase	opzet en getij in tegenfase
NAP +2,0m (laag)	NAP +2,3m	NAP +3,9m	10 uur	7 uur
NAP +3,6m (hoog)	NAP +3,9m	NAP +5,5m (TP)	5 uur	7 uur

De berekende belastingduren in de tabel laten zien dat zelfs hoog op de bekleding de berekende reststerkte nog geen soelaas biedt. Pas boven een niveau van NAP +4,75m is de belastingduur door invallende golven bij de toetsstorm korter dan de berekende reststerkte van 2,4 uur.



Figuur 3: Waterstandsverlooptlijn bij TP2006

Geconcludeerd kan worden dat met de deterministische benadering de reststerkte van de toplaag plus filterlaag vermeerderd met de reststerkte van de kleilaag weinig oplevert, ook niet bij deze sterk verlaagde significante golfhoogte en sterk verhoogde kleilaagdikte. De reststerkte bedraagt immers ca. 2,4 uur en voor het grootste deel van de basaltbekleding is dit te weinig.

Om wel voldoende reststerkte te hebben zou, uitgaande van het bekledingsniveau NAP +1,0 m, er sprake moeten zijn van een lagere maatgevende significante golfhoogte van orde van grootte 1,00 meter. In dat geval bedraagt de reststerktebijdrage van het filter ruim 2 uur en de reststerkte van de kleilaag ca. 4 uur, en daarmee bedraagt de totale reststerkte ruim 6 uur. De totale duur gedurende de storm dat de waterstand binnen het beduidend kleiner geworden belastingvenster staat is in dat geval afgenomen tot een kleine 7 uur.

### 3.5.3 Aangepaste deterministische beoordeling afschuiving (ZAF)

In de aangepaste case is de golfhoogte afgenomen tot 1,5 meter en de dikte van de kleilaag toegenomen tot 1,0 meter. De veiligheid tegen afschuiven van de bekleding over een onder de kleilaag gelegen glijvlak blijkt in dat geval bij toepassing van de gedetailleerde regel ruimschoots te voldoen. Aangenomen mag worden dat dan ook de veiligheid tegen afschuiven van de toplaag zelf voldoende is, mits de teenconstructie voldoende sterk is.

### 3.5.4 Aangepaste deterministische beoordeling materiaaltransport (ZMO en ZMG)

De aanpassingen aan de case hebben geen invloed op de deterministische beoordelingen op materiaaltransport vanuit de ondergrond of vanuit het filter. De beoordelingen uit de paragrafen 3.2.3 en 3.2.4 zijn derhalve ook op deze aangepaste case van toepassing.

## 3.6 Toepassing probabilistische aanpak op de case

### 3.6.1 Aangepaste gebeurtenissenboom

Naar aanleiding van het commentaar dat tijdens het deskundigenoverleg over de toplaag is geleverd, is de oorspronkelijke gebeurtenissenboom verder uitgewerkt (zie bijlage 5). In deze update van de gebeurtenissenboom worden, bij gegeven hydraulische (golf)belasting, acht takken onderscheiden. Deze takken staan voor de onderscheiden mogelijke manieren waarop de bekleding de belasting die er op inwerkt al dan niet weerstaat.

De initiële gebeurtenissen zijn verdeeld over 8 paden:

- pad 1                geen initieel mechanisme (deze gebeurtenis treedt op als de overige zeven initiële mechanismen geen van allen optreden);
- pad 2, 3, en 4    instabiliteit toplaag (respectievelijk oplichten steengroep, uitlichten losse steen en uitlichten steengroep);
- pad 5 en 6        afschuiven (respectievelijk afschuiven van de toplaag en afschuiven langs een glijvlak onder de kleilaag);
- pad 7 en 8        materiaaltransport (respectievelijk uitspoelen van ondergrondmateriaal en uitspoelen van filtermateriaal).

Het vervolg van de takken na het initiële mechanisme is steeds meer of minder omvangrijk uitgewerkt. Die omvangrijkheid hangt af van het aantal onderscheiden vervolgebeurtenissen die na het optreden van het initiële mechanisme nog moeten optreden voordat gesproken kan worden van het falen van de bekleding. Het falen van de bekleding is daarbij, conform de definitie in paragraaf 2.1, opgevat als het aan de oppervlakte komen te liggen van de kern van de dijk. Alle in de gebeurtenissenboom onderscheiden vervolgebeurtenissen na het optreden van een initieel mechanisme zijn derhalve op te vatten als weerstanden, of reststerktecomponenten, op het pad naar de ongewenste eindgebeurtenis 'falen bekleding'. Deze ongewenste eindgebeurtenis kan per tak (met uitzondering uiteraard van de bovenste tak) alleen bereikt worden via de onderste route binnen die tak. Alleen in dat geval hebben ook alle reststerktecomponenten tekort geschoten.

Alle andere mogelijke routes leiden niet tot falen, maar mogelijk wel tot een meer of minder grote schade aan de bekleding. Onderscheiden worden drie gradaties binnen de eindgebeurtenis 'geen falen', namelijk 'geen schade', 'beperkte schade' en 'grote schade'.

In de verbeterde boom is de mogelijke bijdrage van een geotextiel aan de reststerkte van de bekleding vooralsnog genegeerd. Hiermee wordt in geval van de case natuurlijk wel impliciet een conservatieve aanname gedaan, omdat de reststerktebijdrage van het geotextiel zo wordt verwaarloosd. Erg groot is deze verwaarloosde reststerktebijdrage naar verwachting echter niet. Uitgaande van de inschattingen die zijn gemaakt in het kader van het DC-onderzoek 'Dijkdoorbraakprocessen' [DC 2002] moet worden gedacht aan een faalkans van een geotextiel, wanneer dit eenmaal aan directe golfaanval wordt blootgesteld, van orde grootte 0,5 (op basis van expertschattingen).

Hierbij past overigens de opmerking dat de met deze faalkansreductie te associëren sterktebijdrage van het geotextiel ook niet de reden is dat geotextielen worden toegepast. Geotextielen dienen immers in de eerste plaats uitspoeling van ondergrondmateriaal te voorkomen, ook in de situatie dat er verder geen schade aan de bekleding is opgetreden. Het geotextiel heeft daarmee in de eerste plaats betrekking op de kans op het optreden van dit initiële mechanisme.

Tot slot wordt opgemerkt dat de bijkomende sterktebijdrage van een geotextiel altijd nog weer vrij eenvoudig aan de boom kan worden toegevoegd (door middel van invoegen van een extra kolom met deze gebeurtenis tussen de bestaande kolommen (F) en (G), zie bijlage 5).

### 3.6.2 Rekenaanpak

In de onderscheiden takken in de gebeurtenissenboom worden na de initiële mechanismen uitsluitend splitsingspunten naar twee complementaire gebeurtenissen onderscheiden. Op deze splitsingspunten moet de kans worden vastgesteld waarmee het bovenste (geen falen) dan wel het onderste pad (falen) vervolgd wordt. Op grond van het complementair zijn van de beide gebeurtenissen na de splitsingspunten zal de som van de kansen steeds 1 zijn.

De gebeurtenissen zelf zijn steeds kort omschreven in de kaders na de splitsingspunten. De onderste van de twee mogelijke gebeurtenissen na een splitsingspunt is steeds de faalgebeurtenis. Van al deze faalgebeurtenissen moet een verdelingsfunctie worden vastgesteld van de tijd die gemoeid is met het doorlopen van die faalgebeurtenis. Uit combinatie van de diverse verdelingsfuncties van de faaltijd kan dan een verdelingsfunctie van de totale faaltijd (voor doorlopen van een geheel faalpad tussen initieel mechanisme en ongewenste eindgebeurtenis) worden bepaald. Met een gegeven verdelingsfunctie van de belastingduur is dan de kans op falen door een te grote belastingduur te bepalen.

Om de boom voor de beschouwde case te kunnen doorrekenen zijn de in de paragraaf 3.3.1 en paragraaf 3.3.2 vermelde uitdrukkingen in de boom gehangen. Deze zijn aangevuld met tot betrouwbaarheidsfuncties omgeschreven uitdrukkingen voor uitspoeling van filtermateriaal door de onbeschadigde toplaag (materiaaltransport filtermateriaal), en voor het wegspoelen van in de toplaag losgeraakte stenen op basis van de formule van Hudson. De vele dan nog resterende lege plekken ter plaatse van splitsingspunten en gebeurtenissen zijn aangevuld met directe kansschattingen of schattingen op basis van varianten op de hiervoor bedoelde uitdrukkingen.

In de betrouwbaarheidsfuncties zijn 'modelfactoren' gedefinieerd om betrouwbaarheid van de gebruikte modellen aan te geven. Deze modelfactor bestaat uit twee componenten:

1. Een component voor correctie op de 'ingebouwde' veiligheid in het model (model ten opzichte van meetwaarden).
2. Een component voor verdiscontering van de onzekerheid in de geldigheid van het gebruikte model (model als representatie van de werkelijkheid).

Vervolgens zijn voor alle relevante stochasten, d.w.z. de parameters die in de diverse uitdrukkingen voorkomen, inschattingen gedaan van het type verdeling waarmee de spreiding van de parameterwaarde van die parameter het beste beschreven kan worden, en voorts zijn voor ligging en spreiding numerieke waarden vastgesteld.

Tenslotte zijn door middel van Monte Carlo simulatie de kansen op een zekere schade of zelfs falen van de bekleding ingeschat. Voor de Monte Carlo simulaties is gebruik gemaakt van het programma Crystal Ball 2000 [Crystal Ball 2000] dat direct gebruikt kan worden binnen windows/excel - omgeving.

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de doorrekening van de gebeurtenissenboom voor de geselecteerde case wordt verwezen naar bijlage 6.

### 3.6.3 Rekenresultaten

De resultaten van de berekening, uitgevoerd volgens de hiervoor beschreven aanpak, zijn eveneens weergegeven in bijlage 6, in de kwantitatief gevulde gebeurtenissenboom. Deze resultaten zijn in tabel 5 samengevat

Tabel 5: Resultaten kansberekening aangepaste case

initieel mechanisme	kans op initieel mech. [1/jaar]	deelkans geen schade [1/jaar]	deelkans schade [1/jaar]	deelkans falen [1/jaar]	bepalingswijze
geen beweging topklaag	$7,92 \cdot 10^{-1}$	$7,92 \cdot 10^{-1}$	0,00	0,00	
oplichten steengroep	$7,64 \cdot 10^{-2}$	$2,77 \cdot 10^{-2}$	$4,78 \cdot 10^{-2}$	$8,80 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
uitlichten steen	$1,03 \cdot 10^{-2}$	0,00	$9,23 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	MC simulatie
uitlichten steengroep	$4,47 \cdot 10^{-3}$	0,00	$3,34 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	MC simulatie
afschuiven topklaag	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-5}$	schatting
afschuiven kleilaag	$1,00 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit ondergrond	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,00	$9,50 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit filter	$1,17 \cdot 10^{-1}$	0,00	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$8,13 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
	$\Sigma$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	$1,77 \cdot 10^{-1}$	$4,13 \cdot 10^{-3}$	

De wijze waarop deze kansen aan de hand van de in bijlage 6 weergegeven boom zijn berekend zijn hieronder kort toegelicht.

#### Kans op een initieel mechanisme

De kans op de diverse onderscheiden initiële mechanismen volgt in beginsel rechtstreeks uit het aantal simulaties dat een bepaalde tak van de boom ingaat gedeeld door het totaal aantal simulaties. Het aantal uitgevoerde simulaties bedraagt  $1 \cdot 10^6$ .

Het aantal simulaties dat op een bepaald eindpunt van de boom terechtkomt wordt in de boom bijgehouden in de kolom Ni. Kijkend naar de bijvoorbeeld tak 2 van de gebeurtenissenboom, de tak met initieel mechanisme 'oplichten steengroep', dan blijkt dat in totaal  $28.075 + 24.360 + 15.561 + 110 + 8.414 + 892 = 77.412$  keer deze tak is ingeslagen. De kans op dit initieel mechanisme is daarmee dan vervolgens eenvoudigweg te berekenen als  $77.412 / 1 \cdot 10^6 = 7,74 \cdot 10^{-2}$ .

Dat deze kans uiteindelijk naar  $7,64 \cdot 10^{-2}$  is bijgesteld heeft te maken met een correctie in verband met de in het model aanwezige correlatie tussen de optredenkansen van de diverse initiële mechanismen. Dit heeft tot gevolg dat binnen één simulatie meerdere initiële mechanismen tegelijkertijd kunnen optreden, met dubbeltellingen als gevolg. Het aantal realisaties kan zo groter worden dan het aantal simulaties. Op de dubbeltellingen die hiervan het gevolg zijn is heel eenvoudig gecorrigeerd door als deler bij de berekening van de kansen niet het aantal simulaties ( $1 \cdot 10^6$ ) te gebruiken, maar het totaal aantal realisaties ( $\geq 1 \cdot 10^6$ ).

Voor de weergegeven kansen op de initiële mechanismen 5 (afschuiven topklaag), 6 (afschuiven kleilaag) en 7 (materiaaltransport vanuit ondergrond) is niet gebruik gemaakt van betrouwbaarheidsfuncties, maar is voorsnog een directe, min of meer willekeurige kansschatting ingevuld.

#### Onderscheid tussen schade en falen

Als niet de bovenste twee van de in totaal 31 mogelijke eindpunten van de diverse takken bereikt wordt (zie de nummering voor de kolom met aantallen realisaties Ni) dan treedt tenminste schade op, en mogelijk zelfs falen. Hierbij is falen gedefinieerd als het optreden van een zodanige schade aan de bekleding dat de kern van de dijk bloot komt te liggen. De kansen op schade of falen zijn weergegeven in de kolom Pi.

In de boom kan de eindsituatie 'falen bekleding' alleen bereikt worden via de onderste route binnen elke tak. De kans op volledig doorlopen van de onderste route in iedere tak is gelijk aan het product van alle faalkansen bij de splitsingspunten die gepasseerd moeten worden.

In dit rekenvoorbeeld blijkt dat de reststerkte (de resterende sterkte na optreden van een initieel mechanisme) een significante reductie van de faalkans oplevert. De gesommeerde kans op de zeven daadwerkelijke initiële mechanismen is immers berekend op  $2,08 \cdot 10^{-1}$  per jaar (=  $1 - 7,92 \cdot 10^{-1}$ ). De berekende kans op falen van de bekleding bedraagt  $4,13 \cdot 10^{-3}$  per jaar. Reststerkte levert in dit geval dus een reductie met een factor 50 op.

### Vergelijking met deterministische toets

De deterministische toets is slechts gedeeltelijk numeriek uitgewerkt, met name voor wat betreft de toplaagstabiliteit en de reststerkte van het ondermijningsproces van de toplaag en het erosieproces van de kleilaag.

Voor wat betreft de toplaagstabiliteit blijkt de bekleding juist aan het  $6\xi$ -criterium te voldoen (zie par. 3.5.2). Het voldoen aan de deterministische toetsregel wordt in het algemeen geassocieerd met een faalkans die kleiner is dan de normfrequentie, in dit geval  $2,5 \cdot 10^{-4}$  per jaar. De berekende kans op dit initiële mechanisme bedraagt  $1,03 \cdot 10^{-2}$  per jaar. Het resultaat van de kansberekening sluit dus nog niet op de verwachting behorende bij het deterministische resultaat, en blijkt beduidend groter.

Voor wat betreft de reststerkte blijkt deterministische beoordeling niks op te leveren. De berekende totale reststerkte bedraagt 2,4 uur (zie par. 3.5.2) en is daarmee beduidend lager dan de belastingduur op het niveau NAP +2,0 m van ca. 10 uur. De berekende reductiefactor tussen de kans op het initieel mechanisme en de kans op falen van de bekleding bedraagt  $1,03 \cdot 10^{-2} / 1,07 \cdot 10^{-3} = 9,6$ . In tegenstelling tot wat het deterministische resultaat doet vermoeden wordt derhalve een significante faalkansreductie in verband met reststerkte berekend.

### 3.6.4 Gevoeligheidsanalyse

Om enig zicht te krijgen op de robuustheid / gevoeligheid van de berekeningsresultaten zijn een drietal aanvullende berekeningen gemaakt. Dit betreft achtereenvolgens:

1. Een berekening met precies dezelfde invoer, om enig zicht te krijgen op de toevallige variatie in het berekeningsresultaat.
2. Een berekening met 'gunstiger' waarden voor de modelfactoren voor toplaagstabiliteit, namelijk een verhoogde ligging van 1,0 naar 1,1 en een verlaagde variatie van 0,20 naar 0,10.
3. Een berekening met 'gunstiger' waarden voor de reststerktecoëfficiënt van de kleilaag, namelijk een verhoogde ligging van 34.000 naar 54.000 en een verlaagde variatie van 0,30 naar 0,15.

De resultaten zijn verzameld in de gebeurtenissenbomen in bijlage 8 en in de tabellen 6, 7 en 8.

Tabel 6: Resultaten gevoeligheidsanalyse (zelfde invoer)

initieel mechanisme	kans op initieel mech. [1/jaar]	deelkans geen schade [1/jaar]	deelkans schade [1/jaar]	deelkans falen [1/jaar]	bepalingswijze
geen beweging toplaag	$7,92 \cdot 10^{-1}$	$7,92 \cdot 10^{-1}$	0,00	0,00	
oplichten steengroep	$7,61 \cdot 10^{-2}$	$2,75 \cdot 10^{-2}$	$4,77 \cdot 10^{-2}$	$8,53 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
uitlichten steen	$1,02 \cdot 10^{-2}$	0,00	$9,09 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	MC simulatie
uitlichten steengroep	$4,38 \cdot 10^{-3}$	0,00	$3,09 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	MC simulatie
afschuiven toplaag	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-5}$	schatting
afschuiven kleilaag	$1,00 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit ondergrond	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,00	$9,50 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit filter	$1,17 \cdot 10^{-1}$	0,00	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$8,27 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
	$\Sigma$	$8,20 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^{-1}$	$4,10 \cdot 10^{-3}$	

Tabel 7: Resultaten gevoeligheidsanalyse (gunstiger modelfactoren top laagstabiliteit)

initieel mechanisme	kans op initieel mech. [1/jaar]	deelkans geen schade [1/jaar]	deelkans schade [1/jaar]	deelkans falen [1/jaar]	bepalingswijze
geen beweging top laag	$8,26 \cdot 10^{-1}$	$8,26 \cdot 10^{-1}$	0,00	0,00	
oplichten steengroep	$7,70 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$5,81 \cdot 10^{-5}$	MC simulatie
uitlichten steen	$1,07 \cdot 10^{-4}$	0,00	$9,30 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	MC simulatie
uitlichten steengroep	$1,60 \cdot 10^{-5}$	0,00	$9,00 \cdot 10^{-5}$	$7,00 \cdot 10^{-6}$	MC simulatie
afschuiven top laag	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-5}$	schatting
afschuiven kleilaag	$1,00 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit ondergrond	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,00	$9,90 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit filter	$1,66 \cdot 10^{-1}$	0,00	$1,66 \cdot 10^{-1}$	$2,45 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
	$\Sigma$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$1,69 \cdot 10^{-1}$	$3,36 \cdot 10^{-4}$	

Tabel 8: Resultaten gevoeligheidsanalyse (gunstiger modelfactor reststerkte klei)

initieel mechanisme	kans op initieel mech. [1/jaar]	deelkans geen schade [1/jaar]	deelkans schade [1/jaar]	deelkans falen [1/jaar]	bepalingswijze
geen beweging top laag	$7,92 \cdot 10^{-1}$	$7,92 \cdot 10^{-1}$	0,00	0,00	
oplichten steengroep	$7,67 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-2}$	$4,87 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
uitlichten steen	$1,03 \cdot 10^{-2}$	0,00	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
uitlichten steengroep	$4,34 \cdot 10^{-3}$	0,00	$4,15 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	MC simulatie
afschuiven top laag	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-5}$	schatting
afschuiven kleilaag	$1,00 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,00	$1,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit ondergrond	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,00	$9,90 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	schatting
transport uit filter	$1,16 \cdot 10^{-1}$	0,00	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$8,70 \cdot 10^{-5}$	MC simulatie
	$\Sigma$	$8,20 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	$5,54 \cdot 10^{-4}$	

Wanneer de resultaten in voorgaande drie tabellen beschouwd worden dan blijkt het volgende geconcludeerd te kunnen worden:

- De herhalingsberekening met dezelfde invoer levert vrijwel dezelfde faalkansen op als de oorspronkelijke berekening (vergelijk tabel 6 met tabel 5). Dit houdt verband met het gegeven dat relatief grote kansen berekend worden, en daarmee de resultaten weinig gevoelig zijn voor enkele realisaties meer of minder. Anders geformuleerd: de miljoen trekkingen is voor de basisberekening een voldoende groot aantal.
- De berekening met een verhoogde waarde voor de ligging van de modelfactoren voor top laagstabiliteit en een verlaagde waarde voor de spreiding van de modelfactoren voor top laagstabiliteit levert een verlaging van de faalkans van de bekleding op met een factor 12,2 (vergelijk tabel 7 met tabel 5).
- De berekening met een verhoogde waarde van de ligging van de reststerktecoëfficiënt van de kleilaag en een verlaagde variatie van deze reststerktecoëfficiënt levert een verlaging van de faalkans van de bekleding op met een factor 7,5 (vergelijk tabel 8 met tabel 5).

De resultaten laten zien dat als een verbeterd inzicht in de stabiliteit van de top laag gewaardeerd kan worden met gunstiger waarden voor ligging en variatie van de modelfactoren, zowel de kans op schade en daarmee ook de kans op falen van de bekleding (die immers via schade loopt) beiden aanzienlijk kunnen reduceren. Als een verbeterd inzicht in de erosiesterkte van de kleilaag onder golfaanval gewaardeerd kan worden met gunstiger waarden voor ligging en variatie van de reststerktecoëfficiënt van de klei, dan kan de kans op falen van de bekleding aanzienlijk reduceren, maar op de schadekans heeft dit logischerwijze nauwelijks invloed.

### 3.6.5 Interpretatie kansberekeningen

Het zal duidelijk zijn dat aan de numerieke waarden die uit deze berekening volgen slechts beperkte waarde mag worden gehecht. Daarvoor is het bestaande kennistekort, en daarmee samenhangend het aantal witte vlekken in de boom, te groot. Deze witte vlekken zijn nu in eerste instantie opgevuld met afgeleiden van modellen die daar niet voor bedoeld zijn, of zelfs met min of meer willekeurige directe kansschattingen. Daarmee is weliswaar een volledig kwantitatief beeld verkregen, de numerieke waarde is echter nog discutabel.

Hierbij moet worden opgemerkt dat het verkrijgen van numeriek correcte resultaten ook niet was beoogd en was onderkend als voorlopig nog een stap te ver. Het ging erom met name de structuur van de probabilistische berekeningsaanpak op te stellen, deze een eerste keer zo goed als mogelijk met voorhanden zijnde bouwstenen te vullen, en vervolgens een eerste keer door te rekenen om zo het functioneren van deze structuur en berekeningsaanpak te kunnen testen. Het resultaat kan al wel gebruikt worden als hulpmiddel bij de identificatie van de belangrijkste witte vlekken c.q. de belangrijkste onzekerheden bij de beoordeling van steenbekledingen.

Naar aanleiding van deze eerste stap op weg naar verdere kwantitatieve invulling van de boom zijn voorts de volgende constatering en aandachtspunten te noemen:

- De gehanteerde betrouwbaarheidsfuncties uit PC-ring dekken maar een klein deel van de onderscheiden mechanismen in de boom af, waaronder met name instabiliteit van toplaagelementen. Echter ook binnen de drie takken in de gebeurtenissenboom die betrekking hebben op de toplaagstabiliteit, is de aansluiting tussen de daarin onderscheiden mechanismen en de mechanismen waarop deze betrouwbaarheidsfuncties verondersteld worden betrekking te hebben nog een punt van aandacht. Zo wordt de kans op enerzijds het uitlichten van een individuele steen en anderzijds in één keer een steengroep onder andere bepaald door de verdeling van de dikte van individuele stenen enerzijds en de klemkrachten en verdeling van de gemiddelde dikte van een steengroep anderzijds. Dit aspect is nog niet expliciet in de betrouwbaarheidsfuncties verwerkt.
- In relatie tot het vorige aandachtspunt wordt opgemerkt, dat uit de gesprekken met bekledingsdeskundigen als belangrijk manco van de probabilistische rekenaanpakken genoemd is, dat deze altijd achterlopen op de (fysische) modelontwikkeling. Gesteld is dat de in dit deelonderzoek gebruikte betrouwbaarheidsfuncties uit PC-ring ook weer zijn gebaseerd op weinig geavanceerde rekenmodellen. De modelontwikkeling is al weer een stuk verder. De state-of-the-art modellen zijn veelal te complex of omvangrijk om ze in een hanteerbare probabilistische schil onder te kunnen brengen. Mogelijkheden om deze tekortkoming op praktische wijze te ondervangen zouden wellicht kunnen zijn een slimmere, efficiëntere rekenaanpak, of het voor een specifieke situatie iken van eenvoudig geformuleerde modellen aan de meer geavanceerde modellen.
- Ook de probabilistische invulling voor de bijdrage van reststerkte is nog maar zeer beperkt uitgewerkt en past daarmee niet één op één op de onderscheiden, als reststerkte te beschouwen, vervolggebeurtenissen in de gebeurtenissenboom. De werkelijke oorsprong van dit 'aansluitingsprobleem' zit hem uiteraard niet in de probabilistische rekenaanpak, maar in de bestaande reststerktemodellen en daarop gebaseerde (deterministische) reststerkteformuleringen die eigenlijk nog maar zeer rudimentair zijn.
- In de betrouwbaarheidsfunctie voor reststerkte wordt in de reststerkteformulering voor de kleilaag uitgegaan van de dikte van de kleilaag in horizontale richting gemeten. De taludhelling heeft daarmee een grote invloed op de berekende reststerkte van de kleilaag. In de deterministische toetsregels wordt daarentegen nog altijd uitgegaan van de werkelijke kleilaagdikte, gemeten in de richting loodrecht op het talud. De helling van het talud speelt dan geen rol. Een verklaring voor dit verschil in benadering is niet bekend.



- Kijkend naar het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen (zie bijlage 1), dan blijkt een belangrijk deel van de geprogrammeerde inspanning gericht op verbetering van de inzichten aangaande de toplaagstabiliteit van gezette steen. Dit heeft vooral betrekking op de initiële mechanismen van de takken 1, 2 en 3. Daarnaast is tevens een belangrijke inspanning voorzien in het onderzoek naar reststerkte. Dit heeft betrekking op de snelheid van de erosieprocessen na een initiële schade aan de toplaag, en daarmee op onderdelen van de resterende delen van de takken 2, 3 en 4 na het initiële mechanisme. Deze resultaten zijn vermoedelijk in meer of mindere mate ook bruikbaar in resterende takken na de overige initiële mechanismen. Tot slot blijkt dat onderzoek naar materiaaltransport in het onderzoeksprogramma geen plaats heeft. Blijkbaar is de verwachte nog te behalen winst met nader onderzoek hiernaar van ondergeschikt belang.

## 4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 4.1 Conclusies

Naar aanleiding van het in dit rapport beschreven deelonderzoek zijn hieronder de belangrijkste conclusies verzameld:

1. De gebeurtenissenboom uit de eerste fase van dit deelonderzoek is naar aanleiding van de besprekingen met diverse bekledingsdeskundigen in het kader van deze tweede fase van het onderzoek aangepast en verder uitgewerkt. Deze boom is te beschouwen als kapstok waar ontwikkelde en nog te ontwikkelen rekenmodellen aan opgehangen (moeten) kunnen worden. Om deze rol te kunnen vervullen is het van belang dat brede overeenstemming wordt bereikt over de juistheid en bruikbaarheid van de hoofdstructuur van de kapstok.
2. De gebeurtenissenboom is opgesteld voor open steenbekledingen (steensetting op granulaire filter op kleilaag). De reststerktebijdrage van een eventueel aanwezig geotextiel heeft in de boom vooralsnog geen plaats gekregen. De boom kan echter eenvoudig in die richting worden uitgebreid. Evenzo worden ook geen principiële hindernissen gezien voor de eventuele aanpassing van de boom voor toepassing op anders opgebouwde en/of ingegoten bekledingen.
3. Er is een eerste aanzet gegeven voor een probabilistische doorrekening van een bestaande bekleding met behulp van de boom. Hiertoe is een aantal eenvoudige tot betrouwbaarheidsfuncties geschreven rekenmodellen in de boom gehangen, evenals een aantal eenvoudige reststerktefuncties. Voor de probabilistische doorrekening bleek Monte Carlo simulatie een bruikbare techniek waarmee complicerende factoren als correlatie tussen verschillende faalprocessen en seriewerking van opeenvolgende faalprocessen in de diverse paden eenvoudig numeriek zijn te verwerken.
4. De betrouwbaarheid van de gebruikte modellen is verdisconteerd met 'modelfactoren'. Dit houdt in dat van de beschikbare modellen deze modelfactoren zouden moeten worden vastgesteld. In deze studie is volstaan met eerste ruwe schatting.
5. Aan het numerieke resultaat van de probabilistische doorrekening kan vooralsnog slechts beperkte waarde worden toegekend. Hiertoe bleek het aantal witte vlekken in de boom, welke voor een deel zijn opgevuld met afgeleide en niet geverifieerde modellen, nog te groot. Bovendien is nog maar de vraag of de al wel bestaande en eigenlijk nog zeer rudimentaire rekenmodellen (zoals uit PC-ring) al wel de juiste verbinding leggen tussen deterministische uitkomst en probabilistische uitkomst.

In aansluiting op het laatste punt wordt voor de volledigheid opgemerkt dat het probabilistisch onderzoek geen alternatief vormt voor verdere modelontwikkeling. Juist het tegenovergestelde is waar, verbeterde modellen zijn nodig om ook de probabilistische aanpak verder te kunnen brengen. Daarbij kan dan de probabilistische aanpak dienen als hulpmiddel om het inzicht in het resulterend effect van de cumulatie van veiligheidsmarges te verbeteren, welke in elk model aanwezig zijn in verband met altijd aanwezige meer of minder grote onzekerheden. Verbetering van dit inzicht kan in de regel tot aanscherping van de veiligheidsmarges in rekenmodellen leiden. Voorts kunnen de resultaten van probabilistisch onderzoek mogelijk een hulpmiddel vormen bij de prioritering van voortschrijdend (model)onderzoek.

Algemeen wordt geconcludeerd dat met de boom een zo compleet mogelijk totaaloverzicht kan worden gegeven van het samenstel van onderscheiden faalprocessen en faalsequenties binnen die faalprocessen die tot het falen van de bekleding kunnen leiden. Tevens kan aan de hand van deze structuur het overzicht worden gegeven van al dan niet reeds bestaande meer of minder geavanceerde rekenmodellen die betrekking hebben op die onderscheiden faalprocessen van bekledingen. Bestaande, maar ook nieuw ontwikkelde rekenmodellen (al naar gelang de stand van het onderzoek) zijn, zonedig in vereenvoudigde vorm, als modules in de boom te hangen of daar weer uit te halen. De boom kan zo worden gebruikt als kapstok of instrument voor de daadwerkelijke probabilistische doorrekening van bekledingen met al bestaande en nog te ontwikkelen modellen.

## 4.2 Aanbevelingen

In onderstaande lijst is in min of meer willekeurige volgorde een overzicht gegeven van de aanbevelingen die naar aanleiding van de bevindingen van dit deelonderzoek worden gedaan:

1. Uitvoeren van nader onderzoek naar de onderscheidbaarheid en volledigheid van de drie onderscheiden initiële faalmechanismen van de toplaag onder golfbelasting.
2. Inventariseren van mogelijke aanvullingen betreffende bestaande en/of nog te ontwikkelen rekenmodellen die kunnen worden gerelateerd aan de onderscheiden initiële faalmechanismen van de toplaag onder invloed van golfbelasting.
3. Uitvoeren van nader onderzoek naar de te hanteren waarden van modelfactoren voor de gebruikte rekenmodellen.
4. Vaststellen van een probabilistische formulering van het rekenmodel waarmee de veiligheid van de bekleding tegen afschuiven (zowel toplaag als langs een glijvlak onder de kleilaag) kan worden beoordeeld. Aanbevolen is in het algemeen pragmatisch te beginnen met verder optuigen van de boom door zoveel als mogelijk nog bruikbare onderdelen van de toetsregels in de VTV er in op te nemen.
5. Verificatie, bijvoorbeeld d.m.v. het peilen van de mening van bekledingdeskundigen, van de relevantie, onderscheidbaarheid en volledigheid van de onderscheiden reststerktecomponenten in de boom na de initiële faalmechanismen.
6. Inventariseren van mogelijke aanvullingen betreffende bestaande en/of nog te ontwikkelen rekenmodellen waarmee de diverse reststerktecomponenten in de boom kunnen worden beschreven.
7. Onderzoeken en testen van methodieken om resultaten van geavanceerde deterministische rekenmodellen, die in een probabilistische aanpak niet zondermeer hanteerbaar zijn, toch in de probabilistische aanpak mee te kunnen nemen. Aanknopingspunt hiervoor vormen mogelijk de ontwikkelingen die gaande zijn met betrekking tot het probabilistisch rekenen in relatie tot Plaxis (een eem-model voor rekenen aan grondconstructies).
8. Verdergaande verbetering van rekenmodellen in het algemeen door ook bijzondere aspecten mee te nemen zoals scheve golfaanval, relatief lange golven, invloed van bermen, invloed van inslibbing, invloed van duur van golfbelasting op het ontstaan van initiële schade etc.
9. Uitbreiden van de boom en de rekenmodellen daarin voor anders opgebouwde of andere typen bekledingen zoals ingegoten bekledingen.
10. Onderzoeken van de mogelijkheden waarop bewezen sterkte in het probabilistische onderzoeksspoor een plaats kan worden gegeven. Bewezen sterkte is immers bij uitstek een aspect dat met een probabilistische aanpak optimaal benut kan worden.
11. Uitbreiding van de berekeningsaanpak met het lengte-effect, dit ten behoeve van de vertaling van rekenresultaten voor een profiel naar rekenresultaten op het niveau van een vak.
12. Opstellen van een verbeterde procedure voor stochastische karakterisering van de golfbelasting, met name voor wat betreft verloop binnen de stormduur en in samenhang daarmee voor wat betreft de samenhang met het waterstandsverloop. Aanknopingspunten vormt [VAST 2001].
13. Verbeteren van het zicht op gevoeligheid van berekeningsresultaten van de boom voor zowel variatie van invoer per bekledingstype, alsook voor toepassing op verschillende soorten bekledingstypen.

## LITERATUUR

[Fugro 2003]

Onderzoeksplan betreffende het oplossen van de witte vlekken voor het toetsen van steenbekledingen, K00124001, Fugro Ingenieursbureau B.V., april 2003.

[Fugro 2004]

Deelonderzoek 5.1 van het onderzoeksprogramma steenbekledingen, Kapstok Probabilisme, (stap 1: eerste opzet), K00161, Fugro Ingenieursbureau B.V., januari 2004

[V&W 2004]

Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001 - 2006 (VTV), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, januari 2004

[TAW 2003]

Technisch Rapport Steenzettingen, TAW, 2003.

[RWS 2001]

Veiligheidsanalyse Steenzettingen voor enkele dijkvakken langs de Westerschelde, VAST-T3-2000.001, Rijkswaterstaat, Bouwdienst, Waterbouw Innovatie Steunpunt, maart 2001.

[Infram 2000]

Veiligheid in rekentechnieken van steenzettingen, i256, Infram, februari 2000.

[WL / Infram 2002]

Onderzoek naar (rest)sterkte van zee- en meerdijken onder golfaanval, J.W. van der Meer en M. Klein Breteler, augustus 2002.

[TNO 2003-A]

Theoriehandleiding PC-RING (versie 4.0), Deel A: Mechanismebeschrijvingen, TNO-rapport 2003-CI-R0020, april 2003

[TNO 2003-B]

Theoriehandleiding PC-RING (versie 4.0), Deel B: Statistische modellen, TNO-rapport 2003-CI-R0021, april 2003

[DC 2002]

Dijkdoorbraakprocessen, rapportnr. 720201/39, Delft Cluster / GeoDelft, maart 2002

[Crystal Ball 2000]

User Manual Crystal Ball, Decisioneering Inc., 2002

[VAST 2001]

Veiligheidsanalyse Steenzettingen, Bouwdienst Rijkswaterstaat (F.M. Stroeve), maart 2001

[WL 1999]

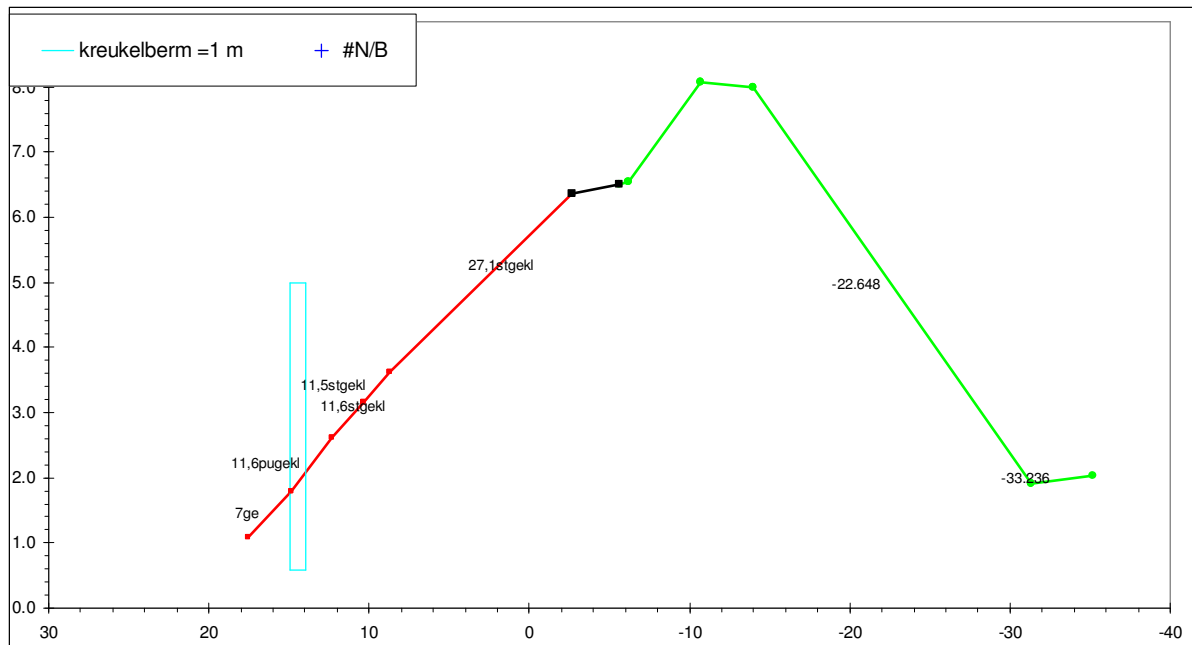
Dimensioneringsmethode 'Blokken op Kant met Brede voegen', WL|Delft Hydraulics (F. den Heijer), mei 1999

**BIJLAGE 1**

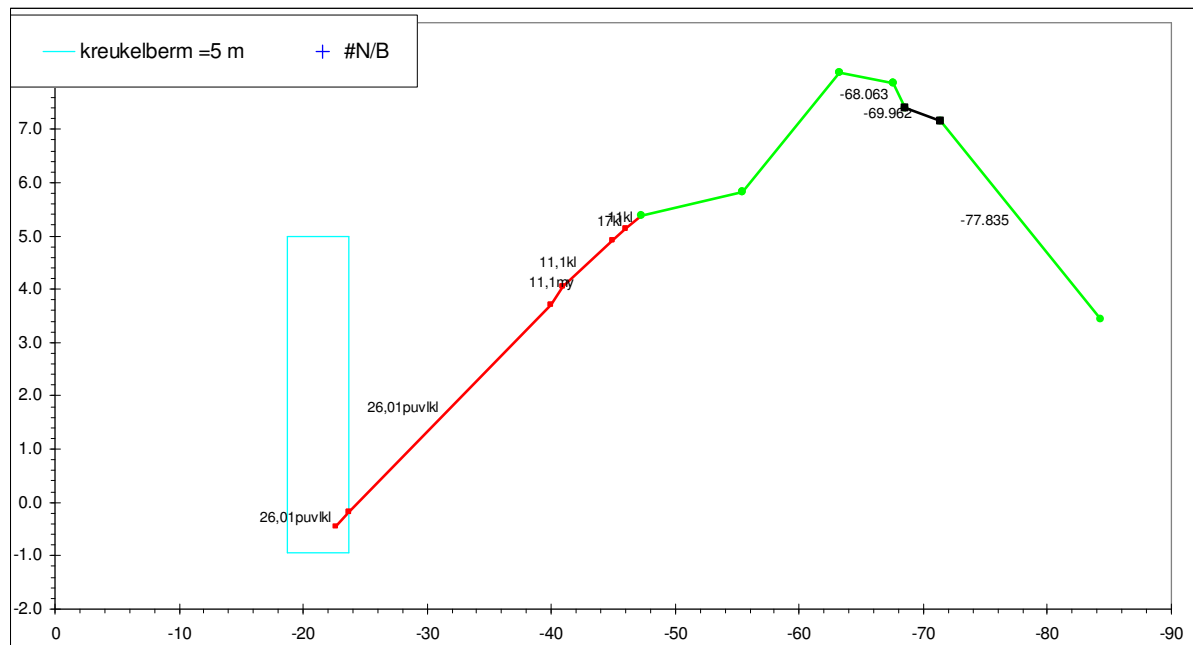
**ONDERZOEKSPROGRAMMA  
KENNISLEEMTEN STEENBEKLEDINGEN**

**BIJLAGE 2**  
**GESELECTEERDE CASES**

### Case 1: Zimmermanpolder (Haringmanblokken gekanteld - betonblokken - basalt)

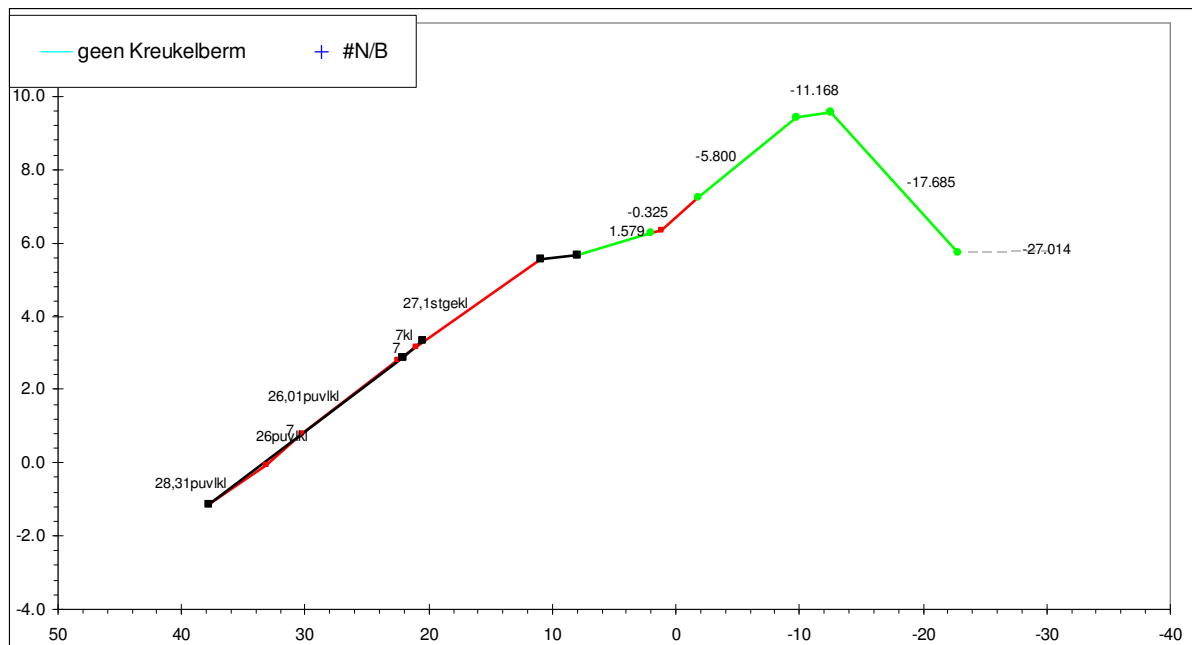


## Case 2: Oost Inkelenpolder (Basalt ingegoten - Haringmanblokken)

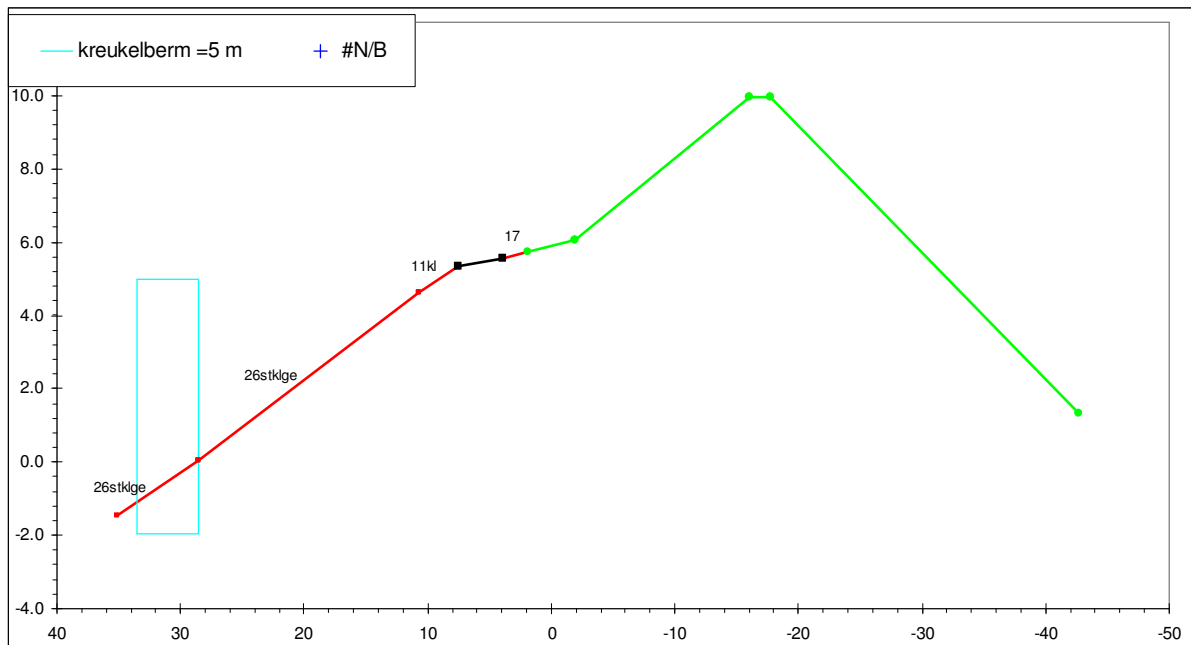




**Case 3: Borsselepolder (Basalt ingegoten en overlaagd - basalt)**



### Case 4: Zuidwatering (Basalt – betonblokken)



**BIJLAGE 3**

**STEENTOETSBEOORDELING  
VAN DE  
UIT TE WERKEN CASE**

STEENTOETS versie 3.32, Zeeweringen met extra ksi, inklemming, grafieken en afschuiving tot 1:2,7				aanleg- jaar	schade in jaar	dijkorien- tatie [gr tov N]	niveau onder- grens [m NAP]	niveau boven- grens [m NAP]
Volg- nr.	Naam van dijkvak	Subvakgrenzen						
		van	tot					
1	Zuidwatering	73.70	73.80				-0.296	4.648
1	Zuidwatering	73.80	73.90				-0.707	4.642

type		helling	als bekleding op berm ligt:		
toplaag	onderlagen (filter, geotex- tiel, klei, etc)	talud	helling	berm- breedte	niveau
		tan(hoek)	onder- talud	[m]	voorrand [m NAP]
26.00	stgekl	0.270			
26.00	stgekl	0.270			

TOPLAAG											
D [m]	B [m]	L [m]	spleet [mm]	open oppervlak [%]	soortelijke massa [kg/m <sup>3</sup> ]	inge- wassen ja/nee	inwasmateriaal		goed geklemd? ja/nee/?	slib ja/nee	waterdicht ingegoten ja/nee
							D15 [mm]	n [-]			
0.340				10.0	2900	n				n	n
0.340				10.0	2900	n				n	n

BOVENSTE FILTERLAAG					TWEEDE FILTERLAAG					GEOTEXTIEL
b [m]	D15 [mm]	D50 [mm]	poro- siteit [-]	slib ja/nee/?	b [m]	D15 [mm]	D50 [mm]	poro- siteit [-]	O90 [mm]	
0.100	40.0			n						
0.100	40.0			n						

KLEI	ZAND					ERVARING				Opmerkingen
b [m]	D50 [mm]	D90 [mm]	D15 [mm]	D50 [mm]	D90 [mm]	Afschuiving opgetreden ja/nee/?	Materiaal- transport ja/nee/?	Ruimte tussen toplaag en filter ja/nee/?		
0.300						n	n	nee		
0.300						n	n	nee		

GOLFCONDITIES EN WATERSTANDEN							
storm- duur [uur]	Golven- tabel 1/2/3	GHW [m+NAP]	Toetspeil 2006 [m+NAP]	maatgevende waterstand [m+NAP]	Hs [m]	Tp [s]	Maatgevende
							golfvalshoek [gr]
6.0	1	2.000	5.500	5.500	2.550	7.750	0.0
6.0	1	2.000	5.500	5.500	2.550	7.750	0.0

AFSCHUIVING				MATERIAALTR.
methode A	methode B	methode C	Score	Score
Twijfelachtig	Twijfelachtig	Twijfelachtig	Twijfelachtig	Goed
Twijfelachtig	Twijfelachtig	Twijfelachtig	Twijfelachtig	Goed

STABILITEIT TOPLAAG					
Hs/ΔD	ξop	eenvoudige toetsing			
		type	kwantitatief		Score
			g/t	t/o	
4.100	1.637	3b	0.604	1.141	Twijfelachtig
4.100	1.637	3b	0.604	1.141	Twijfelachtig

gedetailleerde toetsing										
								Score		
$F = \xi^{2/3} * Hs/\Delta D$		$F = \xi^{1/3} * Hs/\Delta D$		Resultaat Anamos	Score Anamos	Benodigde klemfactor				
						g/t	t/o	g/t	t/o	
5.694		4.832		Stabiel	Goed	1.00	1.00	1.00	1.00	Goed
5.694		4.832		Stabiel	Goed	1.00	1.00	1.00	1.00	Goed

RESTSTERKTE			EINDSCORE STEENTOETS
filter- laag [uur]	klei- laag [uur]	Score	
0.000	0.000	Onvoldoende	TWIJFELACHTIG
0.000	0.000	Onvoldoende	TWIJFELACHTIG

BEHEERDERS- OORDEEL  [g / t / o]	Vershil tussen Steentoets en beheerdersoordeel?	TOELICHTING	EINDOORDEEL
			TWIJFELACHTIG
			TWIJFELACHTIG

**BIJLAGE 4**

**BESPREEKVERSLAGEN  
VAN DE  
DESKUNDIGENBESPREKINGEN**

Aan : Mark Klein Breteler, Robert 't Hart, Dirk Jan Peters, Theo Stoutjesdijk (toplaag)  
Alessandra Bizzarri, Jentsje van der Meer, Adam Bezuijen (onderlagen)  
Van : Martin van der Meer / Jaap Stoop  
Ref. : 1204-0021-000  
Datum : 23-9-2004  
Betreft : **Voorbereidende info deskundigenoverleg bekledingen d.d. 1 okt. en 11 okt. 2004**

---

### ***Aanleiding en doel***

In het kader van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, Deelonderzoek 5 'Toepassing Probabilistische Rekenmethode', is in de periode eind 2003 - begin 2004 een eerste opzet van de zogenoemde 'probabilistische kapstok' opgesteld. Het beoogde doel daarvan was de diverse deelonderzoeken naar steenbekledingen op een overzichtelijke manier met elkaar in verband te brengen, en zo het zicht te vergroten op de mogelijke winst van nieuw ontwikkelde kennis in de diverse deelonderzoeken. Daarnaast wordt beoogd, uitgaande van de structuur van de kapstok, op langere termijn tot uitwerking van een (geavanceerd) toetsinstrument te komen.

De eerste opzet van de kapstok is vorm gegeven als een probabilistisch rekensheet (in Excel), waarmee volgens een gebeurtenissenboomstructuur de opeenvolgende stappen in het faalproces van een dijkbekleding moeten kunnen worden doorgerekend tot een kans op het begin van erosie van de dijkskern. Hiermee is de benadering, die ook al in bijvoorbeeld het Technisch Rapport Steenzettingen en in PC-ring wordt gevolgd, meer expliciet gemaakt: het gehele faalproces bestaat uit een aantal opeenvolgende mogelijke gebeurtenissen, en ieder van die gebeurtenissen vormt de beginconditie voor de analyse van de kans op de daarop volgende gebeurtenissen.

De huidige vorm van deze gebeurtenissenboom is weergegeven in de figuur aan het eind van dit memo. Daarbij is tevens een toelichting/beschouwing gegeven op de opzet en structuur van de boom.

Voor verdere inhoudelijke uitwerking van de boom is voorgesteld een lijst met mogelijke relevante cases op te stellen en ook een concrete case-study uit te voeren, en deze met inhoudelijk deskundigen op het gebied van bekledingen te bespreken. In deze deskundigensessies zullen de volgende onderwerpen aan de orde komen:

1. de bruikbaarheid van en tekortkomingen in de opzet en structuur van de gebeurtenissenboom;
2. de bruikbaarheid van en tekortkomingen in de onderliggende rekenmodellen;
3. de koppeling van de cases aan de deelonderzoeken (ter beantwoording van de vraag welke cases voor welke deelonderzoeken het meest interessant zijn);
4. de beoogde winst van de met de deelonderzoeken gegenereerde kennis en de wijze waarop dat in de boom zichtbaar kan worden gemaakt.

### ***Geselecteerde cases***

Door Hans van der Sande zijn gegevens van vier cases toegeleverd. Afsproken was dat uitgangspunt van de selectie van toegeleverde cases zou moeten zijn dat ze moeilijk door de toetsing komen (twijfelachtig t.a.v. toplaag). Alle vier de cases betreffen profielen van de dijk langs de Westerschelde (van Vlissingen tot Zimmermanpolder). Belangrijkste kenmerken zijn in onderstaande tabel samengevat.

#### *Belangrijkste kenmerken van de eerste vier mogelijke cases*

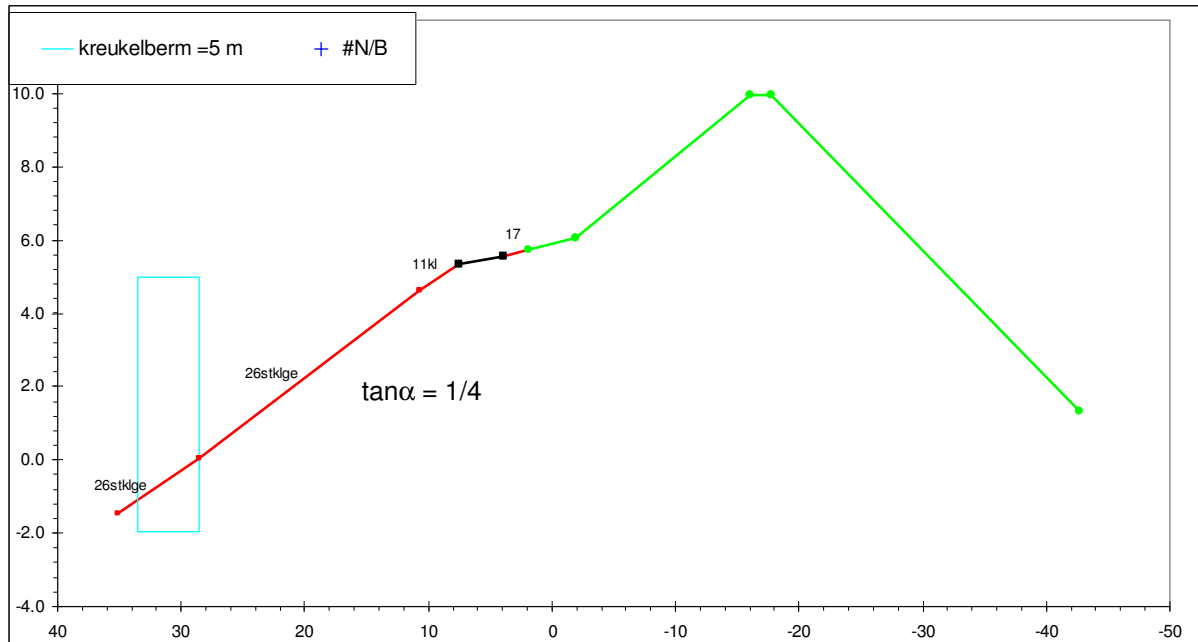
Nr.	Locatie	Toplaag	Filterlaag	Geotextiel	Onderlaag
1	Zimmermanpolder	Haringmanblokken (gekanteld)	puin / steenslag	ja	klei
2	Oost Inkelenspolder	gezette basalt, ingegoten met gietasfalt	puin + vlijlaag	nee	klei
3	Borsselepolder	gezette basalt, ingegoten en overlaagd met vol en zat gepenetreerde breuksteen	puin + vlijlaag	nee	klei
4	Zuidwatering	gezette basalt	steenslag	ja (onder kleilaag)	klei

Idee is dat met gedetailleerde uitwerkingen van deze cases een aantal referentiegevallen beschikbaar komen die kunnen helpen bij onder andere:

- beoordelen van de waarde van beoordelingsresultaten van andere bekledingen;
- bewaken consistentie deterministische en probabilistische rekenregels;
- concreter aanduiden van witte vlekken en plaats en mogelijke winst van lopend onderzoek.

### ***Uit te werken case***

Gekozen is de eerste detailuitwerking te maken voor case nr. 4 (gezette basalt). Geometrie van het profiel en belangrijkste kenmerken van de bekleding zijn in onderstaande figuur en tabel samengevat.



*Profiel van case nr.4: Zuidwatering*

### ***Beschikbare gegevens basaltbekleding van profiel 4***

Algemene beheergegevens		Gegevens bekleding	
jaar van aanleg	1985	percentage open oppervlak	10%
opgetreden schaden	nee	inklemming toplaagelementen	ja
zakkingen over grote oppervlakte	nee	steendikte (min. resp. max.)	30 cm, 40 cm
zakkingen individuele steen	5 cm	toplaag ingewassen / dichtgeslibt	ja / ja
opgetreden verschuiving	nee	filter dichtgeslibt	nee
ruimte tussen toplaag en filter	nee	filtermateriaal	steenslag
kwaliteit zetwerk	matig	D <sub>15</sub> filtermateriaal	40 mm
kwaliteit steen	goed	min. resp. gem. dikte filterlaag	10 cm, 10 cm
kwaliteit constructie opbouw	goed	dikte kleilaag	30 cm
oordeel beheerder	goed	samenstelling klei	vettig

Golfdata is in het randvoorwaardenboek voor het vak waar dit profiel in ligt niet gegeven. Om die reden is uit de PC-ring database met randvoorwaarden de voor de golfhoogte meest ongunstige windrichting en windsnelheid geselecteerd. De daarbij voor verschillende waterstanden berekende golfhoogte, -periode en -richting zijn in onderstaande tabel weergegeven.

### ***Golfdata uit PC-ring voor case Zuidwatering***

waterstand h [m +NAP]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	golfrichting [°]
2	2,17	4,24	203
4	2,48	4,49	200
6	2,70	4,65	200

Gegeven Toetspeil van NAP +5,35 is vervolgens d.m.v. lineaire interpolatie een waarde voor golfhoogte en -(piek)periode vastgesteld van respectievelijk 2,63m en 5,1s. De hoek die de normaal op deze dijk maakt met de noord bedraagt 160 graden. De hoek van inval is daarmee 40 graden.



Vragen die nu gesteld kunnen worden zijn onder andere:

1. Toepassen van eenvoudige toetsing levert in dit geval al meteen de verwijzing naar een geavanceerde toetsing op omdat de toplaag is dichtgeslibd en het filter niet. Is geavanceerde toetsing voor een dergelijke situatie voor zover bekend al eens gedaan en wat leverde dat op? Is er binnen het lopende onderzoeksprogramma ook aandacht voor dit soort situaties, en waar dan? Wat gaat dit naar verwachting opleveren?
2. Als vervolgens voor het gemak even wordt aangenomen dat de toplaag niet is dichtgeslibd, zodat er verder kan worden gegaan met de case, dan volgt uit de eenvoudige toets nog twijfelachtig, maar de gedetailleerde toets levert goed op. Stel dat dit niet zou zijn gelukt, en er wordt een beroep gedaan op reststerkte, dan levert dit een restlevensduur op van 5 minuten. Dit is de erosiesterkte van filterlaag + toplaag na initieel falen. De kleilaag doet bij golven > 2m immers al helemaal niks. Gaat het deelonderzoek naar reststerkte naar verwachting nog veel aanscherping opleveren? Wat is de beginconditie van de (beschadigde) toplaag waar bij onderzoek naar reststerkte van uit zou moeten worden gegaan?
3. Welke volgende case is uit oogpunt van voorkomen, problemen met toetsing en lopend onderzoek hierna het meest interessant om uit te werken.
4. Is meer algemeen van de diverse deelonderzoeken in het onderzoeksprogramma aan te geven of en waar in de boom ze wat op kunnen/zullen leveren en of dit veel of weinig zal zijn?

**Stand van zaken probabilistische rekenmodellen**

Bestaande probabilistische rekenmodellen betreffen met name de rekenmodellen in PC-ring en de probabilistische schil van Zsteen.

PC-ring maakt gebruik van bestaande deterministische (grotendeels empirische) rekenregels die zijn omgeschreven tot een betrouwbaarheidsfunctie. Grenstoestandsfuncties voor de volgende faalmechanismen van de toplaag zijn gedefinieerd:

- instabiliteit steenzetting op klei:  $Z = c_k \Delta D - rH_s$
- instabiliteit steenzetting op granulaair filter:  $Z_{b1} = \frac{c_f \Delta D^{1,67} \Gamma^{1,67}}{(\Lambda \tan \alpha_u)^{0,67}} - \frac{rH_s}{(rS_{op})^{0,33}}$  (niet teveel beweging)

en

$$Z_{b2} = c_{gf} \left( \frac{\tan \alpha_u}{\sqrt{S_{op}}} \right)^{-2/3} - \frac{H_s}{\Delta D} \text{ (6-ksi regel)}$$

- opdrukken asfaltbekleding:  $Z = \Delta D - 0,21 Q_n (a + v) R_w$
- falen door golfklappen:  $Z = D - D_{benodigd}$  (waterasfaltbeton en open steenasfalt)

$$Z = D_{n50} - \frac{H_s \xi_{op}^b}{\Delta_m \Psi_m \Phi_{sw} \cos(\alpha_u)} \text{ (gedeeltelijk gepenetreerde breuksteen)}$$

Daarnaast is ook voor de reststerkte van de steenzetting op een granulaair filter alsook de afdekkleilaag een betrouwbaarheidsfunctie gedefinieerd:

- onvoldoende reststerkte bekleding:  $Z = t_{rs} + t_{rk} - t_s$

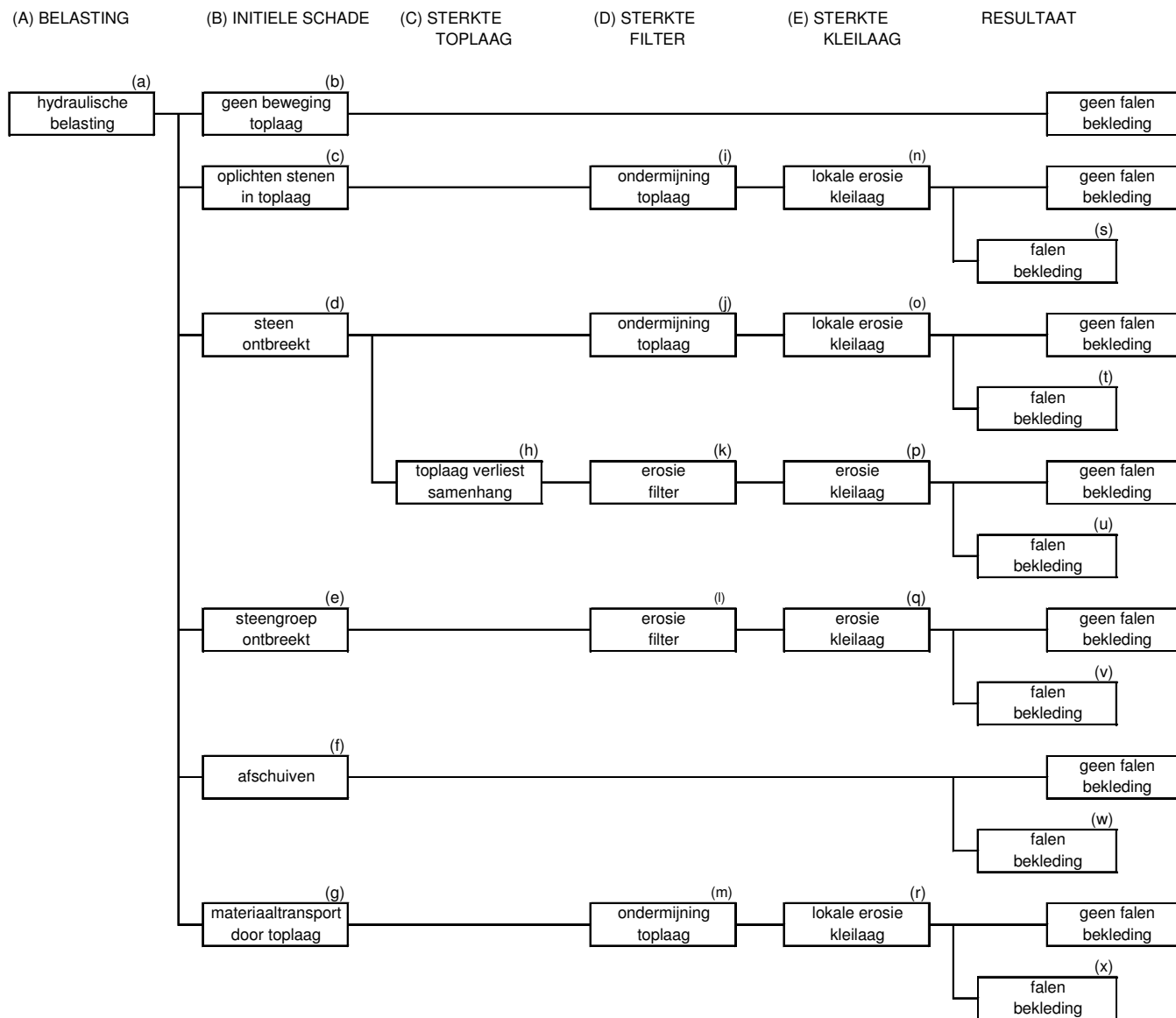
Van de probabilistische schil van Zsteen is nog weinig bekend.

Vragen

5. Is er nieuwe (praktisch toepasbare) kennis die verbetering en/of aanvulling van de bestaande probabilistische bouwstenen mogelijk maakt, specifiek waar het de case Zuidwatering (gezette basalt) betreft? Hoe komt in de betrouwbaarheidsfunctie voor de toplaag de gevoeligheid van al dan niet dichtgeslibd zijn van de toplaag tot uiting?

6. De uitkomst van een probabilistische som, gegeven de gehanteerde formulering van betrouwbaarheidsfuncties, wordt helemaal bepaald door aangehouden verdeling, ligging en spreiding van relevante parameters. Wat zijn de belangrijke parameters die voor een specifiek profiel (m.n. case Zuidwatering) in het veld moeten worden verzameld, en zijn die wel redelijkerwijs te verzamelen? Wat is de herkomst van de defaults in PC-ring, en hoe waar zijn die (zie tabel 3.5 uit deel B van de theoriehandleiding van PC-ring)?
7. Praktijkdata is relatief schaars, en vertoont een behoorlijke spreiding (zie de black-box grafieken). Uitbreiding van de dataset en mogelijke verkleining van de spreiding zal aanscherping van de deterministische rekenregels opleveren, maar zeker ook van een probabilistische aanpak. Welke perspectieven zijn er op dit punt? Is niet gebruik te maken van schadegevallen in de praktijk, maar ook van het niet optreden van schade in de praktijk?
8. Het meenemen van een verdeling van de klemkracht (die dus in het geval van de case voor sommige loszittende stenen dus ook heel klein of gewoon nul zal zijn) kun je goed in een probabilistische aanpak kwijt. Maar ook als die aanpak wordt gevolgd om wat scherper te kunnen gaan moet je wel mogen rekenen op reststerkte na lokaal ontstaan van een klein gat in de toplaag, anders levert het niks op. Moet er dus niet altijd eerst hoe dan ook duidelijkheid zijn over acceptatie hiervan alsmede de mogelijkheden die reststerkte vervolgens kan bieden? Meer algemeen met betrekking tot reststerkte: uit oogpunt van veiligheid gaat het om de kans op verlies van de waterkerende functie en zou je dus niet zelfs erosiesterkte van het dijklichaam zelf moeten mogen meenemen bij beoordeling van de bekleding (als ook in PC-ring gebeurt)?
9. Met Zsteen kan nu ook probabilistisch gerekend worden aan de stabiliteit van een groep stenen onder golfbelasting, en dan wel gebaseerd op fysische modellering in plaats van fitten van labdata. Vraag is dan hoeveel verder je hiermee komt voor met name de beschouwde case, want onzekerheden van verschillende invoerparameters zullen altijd groot blijven (klemming, doorlatendheden, toevallige geometrische afwijkingen, combinaties van belastingen door golven in een onregelmatig golfveld etc.)? Hoe vertaal je de berekende faalkans van een steen in een klein groepje stenen naar faalkans van een steen in een heel steenvlak?

# MEMO VOORBEREIDENDE INFO



***Opzet en structuur van de kapstok***

In de boom worden bij een gegeven (storm)belasting zes takken onderscheiden. Deze representeren de veronderstelde toestanden waarin de bekleding (bestaande uit toplaag met daaronder filterlaag/vlijlaag en daaronder kleilaag) terecht kan komen, uiteindelijk resulterend in "geen falen" of "falen". De gebeurtenissen per tak zijn als volgt te omschrijven:

- tak 1 via (b) In deze tak gebeurt er helemaal niets met de bekleding, deze doorstaat de storm zonder enige schade. De kans hierop is 1 minus de kans dat er wel een of andere schade optreedt.
- tak 2 via (c) In deze tak is de toplaag op zich zwaar en sterk genoeg om de storm zonder schade te doorstaan, maar vind door oplichten van de toplaag wel migratie van onderliggend filtermateriaal plaats (vorming S-profiel). De daardoor veroorzaakte ondermijning van de toplaag leidt uiteindelijk toch tot falen van toplaag, gevolgd door erosie van filterlaag en toplaag en, uiteindelijk van onderliggende kleilaag.
- tak 3 via (d) In deze tak wordt een individuele steen uit de toplaag gedrukt. Vervolg van het faalproces kan op twee manieren plaatsvinden.  
In de bovenste tak is sprake van incidenteel ontstane gaten door verlies van enkele toevallig losliggende en zwaarbelaste stenen. Dit wordt gevolgd door uitspoeling van filtermateriaal ter plaatse van die gaten en daarmee ondermijning van een groter deel van de toplaag. Na instorten vindt doorgaande erosie van filtermateriaal en toplaag over een groter oppervlak plaats en erodeert uiteindelijk ook de onderliggende kleilaag.  
In de onderste tak is de belasting dermate groot dat grootschalig uitspoelen van toplaagelementen optreedt (lokaal meerdere elementen per m<sup>2</sup>). De toplaag verliest dan z'n samenhang en filter en toplaag zullen wegspoelen. Vervolgens erodeert ook de onderliggende kleilaag.
- tak 4 via (e) In deze tak is sprake van het uitgedrukt worden van in één keer een samenhangende groep stenen. Ter plaatse van het ontstane gat vindt vervolgens verdere erosie plaats van filter en toplaag en vervolgens van de onderliggende kleilaag.
- tak 5 via (f) In deze tak is sprake van afschuiven van de gehele bekleding.
- tak 6 via (g) In deze tak is sprake van uitspoeling van ondergrondmateriaal of van filtermateriaal. Dit leidt op den duur tot ondermijning van de toplaag en na instorten van toplaag tot doorgaande erosie van filter en toplaag. Vervolgens zal ook de onderliggende kleilaag eroderen.

***Vragen die we in het kader van de uitvoering van de case o.a. willen beantwoorden zijn:***

- Welke fouten / tekortkomingen zitten er in deze structuur en hoe kunnen die verbeterd worden?
- Is het redelijk de uitwerking / invulling van de takken 2 (oplichten), 5 (afschuiven) en 6 (materiaaltransport) op z'n minst voorlopig te laten voor wat het is, op grond van de volgende redenen?
  - tak 2: Het proces van migratie van filtermateriaal langs het talud onder de toplaag, leidend tot ondermijning van de toplaag, heeft een veel grotere tijdschaal dan een storm. Goed beheer (voldoende inspectie en eventueel tijdig ingrijpen) kan de kans op falen langs deze tak daarmee verwaarloosbaar klein maken.
  - tak 5: Het mechanisme afschuiving is meestal niet maatgevend. De bekleding blijkt bij toepassing van de gedetailleerde toetsing vaak al te voldoen, terwijl deze tamelijk conservatief is.
  - tak 6: De kennis ten aanzien van uitspoeling is redelijk uitontwikkeld, en daarmee zijn de onzekerheden in de rekenregels relatief klein. Bovendien is ook de tijdschaal van falen van de bekleding via dit mechanisme dermate groot dat goed beheer (voldoende inspectie en eventueel tijdig ingrijpen) de kans op falen verwaarloosbaar klein kan maken.
- Is tak 4 (uitdrukken van in één keer een hele samenhangende steengroep) eigenlijk wel relevant? En als dat zo is, wat is daarvan bekend?

Aan : Aanwezigen: Robert 't Hart, Mark Klein Breteler, Theo Stoutjesdijk, Dirk Jan Peters  
Overig betrokkenen: Alessandra Bizzarri, Jentsje van der Meer, Adam Bezuijen  
Van : Jaap Stoop  
Ref. : 1204-0021-000  
Datum : 7-10-2004  
Betreft : **Verslag deskundigenoverleg toplaagstab. d.d. 1 okt. 2004 van 9.00 uur - 12.30 uur**

---

## Algemeen

De voorgaande rapportage van begin dit jaar, "Kapstok probabilisme (1e opzet)", was niet in ieders bezit. Fugro zal deze alsnog rondmailen.

Hoofddoel van het onderzoek moet duidelijk worden neergezet: het primaire doel is om de gevoeligheden voor onzekerheden (en daarmee ook nut en noodzaak van onderzoek) in beeld te kunnen brengen. De gebeurtenissenboom met daarin de probabilistische rekeninstrumenten gebruiken voor een absolute beoordeling van bekledingen in termen van kansen is hooguit op lange termijn een secundair doel.

In de boom zitten witte vlekken omdat van sommige aspecten gewoon weinig bekend is.

Met een fysisch model is er sprake van relatief kleine onzekerheden, als er geen fysisch model is zijn onzekerheden relatief groot.

De structuur van de boom zal per bekledingstype kunnen verschillen. Gecontroleerd moet worden of alle faalmechanismen er wel in zitten. Daarnaast kan de vraag zijn of alle relevante mechanismen wel onderkend zijn.

Vraag is of bij opstellen van de gebeurtenissenboom wel alle relevante achtergrondinfo eerst geraadpleegd is. Als relevante stukken zijn met name genoemd het DC-rapport "Dijkdoorbraakprocessen" en het onderzoek van Den Heijer.

N.B. Genoemd DC-rapport is geraadpleegd, maar bij opzet van de boom is gekozen voor een sterk ingedikte weergave van het faalproces gericht op basalt bekleding. Bestaan van de stukken van Den Heijer is bekend maar zijn niet geraadpleegd. Deze zijn voor zover bekend gericht op blokken op z'n kant.

## Selectie cases en beschikbare info

Van de vier voorgestelde cases is gesteld dat case 1 en case 4 relatief eenvoudig zijn. Hebben respectievelijk grote en kleine leklengte (voor case 1 nog controleren of het blokken tegen elkaar betreft). Van de voorgestelde uit te werken case 4 wordt de interpretatie van de ligging van het geotextiel (in de tabel aangegeven als aanwezig onder de kleilaag) ernstig betwijfeld. Dit zou betekenen dat de codering van onderlagen in het weergegeven profiel daaronder (26stklge) niet klopt.

Onderkend wordt dat voor aansluiting tussen det. en prob. uitwerking je met (fysisch) relatief goed begrepen cases moet beginnen, waarvan voldoende info voor handen is (dit pleit ook voor starten met case 4).

De info van de basaltbekleding van case 4 die in de verzameltabel is weergegeven (afkomstig uit een toegeleverd spreadsheet van Hans van der Sande) is op sommige punten discutabel en ook niet compleet. Concreet:

- De combinatie dichtgeslibte toplaag en niet dichtgeslibt filter komt in de praktijk niet voor. Is de enige van de vier mogelijke combinaties die nou net niet kan.
- Als de steendikte varieert tussen 30 cm en 40 cm, dan kan er geen sprake zijn van een min of meer constante dikte van de filterlaag van 10 cm (anders is toplaag immers niet vlak). Hierbij is aanvullend wel opgemerkt dat ruimtelijke variabiliteit ook een rol speelt. Voor wat betreft de filterdikte gaat het om de dikte van orde grootte een vierkante meter als je het hebt over de kans op mechanismen.
- Hydraulische randvoorwaarden ontbreken nog.

Geadviseerd wordt bij Hans van der Sande na te vragen of de steentoetstabel beschikbaar is en nageleverd kan worden. Dan hebben we meteen de belangrijkste voor det. toetsing benodigde gegevens compleet. Daarnaast wordt geadviseerd ook kopie van de brekerformulieren op te vragen, geeft indruk van werkelijke variaties. Bovendien gaat veel info al verloren bij inkloppen van brekergegevens in de computer.

In dit verband is gesteld dat analyse in het veld en interpretatie van verkregen gegevens ook onzekerheden introduceert. Onzekerheid over de data hoort ook in de prob. analyse meegenomen te worden.

Voorts gaat schematiseren ook gepaard met onzekerheden.

N.a.v. vraag 2 in de memo (ongunstige score voor reststerkte) wordt opgemerkt dat de reststerkteformules in het VTV zwaar aan de veilige kant zitten. Maar ook is dit wel een wat bijzondere case die uit oogpunt van reststerkte wat ongelukkig gekozen is: dunne kleilaag en enorme golf. Zouden we ook niet nog eens een normalere case erbij moeten kiezen.

Reststerkte geotextiel zit nog niet in de boom. Hoort ook deel uit te maken van de procesbeschrijving van het falen van deze bekleding.

De kans op het terechtkomen in de diverse takken van de boom is met grote onzekerheden omgeven. Is niet veel van bekend maar je moet het wel kwantificeren. Voor wat betreft falen topklaag is er het onderscheid te maken tussen 1) individuele steen eruit (en verder niks), 2) individuele steen eruit waarna meerdere stenen verdwijnen, en 3) verdwijnen van in één keer een steengroep. Vaak is sprake van een dikkere kleilaag en kleinere golf. Scala van voorbeeldcases zal dus nog wel uitgebreid moeten worden.

## **Betrouwbaarheidsfuncties in PC-ring**

Betrouwbaarheidsformules die nu in PC-ring zitten zijn gebaseerd op oude formules. Er zijn betere fysische modellen. De probabilistische nivo 2 rekenaanpak loopt altijd achter de ontwikkeling in fysische modellering aan. Zouden niet geavanceerdere deterministische fysisch modellen leidend moeten zijn, geven immers een beter beeld. Je kunt je derhalve afvragen wat de waarde is van kansen die je berekent met PC-ring in relatie tot de resultaten van geavanceerde deterministische berekening.

Je zou eerst het eenvoudige rekenmodel moeten controleren a.h.v. berekening met geavanceerd rekenmodel, voor je dit eenvoudige rekenmodel mag gebruiken in probabilistische analyse.

Discussie over de Z-functies in PC-ring is dus eigenlijk niet zo relevant. Grote vraag is eigenlijk hoe je deterministische state-of-the-art rekenmodel in een probabilistische vorm kunt gieten. Mogelijkheid is er via aantal slim gekozen berekeningen met het deterministische state-of-the-art rekenmodel. Dit is de "buitenlandse" aanpak.

## **Gebeurtenissenboom**

Er is ook onzekerheid over de hydraulische belasting. Die moet ook meegenomen worden.

Faalprocessen van de bekleding zijn in de boom teveel ingedikt, moet uitgebreid worden om alles er in kwijt te kunnen. Dat het dan niet meer niet op een A4-tje past mag geen criterium zijn.

Oplichten van een steen en het uitgedrukt worden van een steen kunnen via het verdwijnen van een steengroep tot falen van de bekleding leiden. Dit maakt dat je vanuit de tweede en derde tak van de boom verticale verbindingen wilt leggen naar het eerste hokje van de vierde tak. Eigenlijk is het verdwijnen van een steengroep een centrale schakel in het falen van de topklaag waar je via meerdere faalprocessen op terecht kunt komen. Deze situatie van de ontbrekende steengroep zouden we in meerdere takken terug moeten laten komen. Dit voorkomt een nodeloos ingewikkelde structuur (de boom blijft dan van links naar rechts leesbaar).

Het op meerdere mogelijke manieren kunnen bereiken van de situatie dat een hele steengroep verdwenen is, is ook een oorzaak van begripsverwarring over wat nou reststerkte is. Als dit de

resterende sterkte na initieel falen is, dan verschilt reststerkte per tak (na oplichten individuele steen is reststerkte anders dan na weggedrukt zijn van in één keer en steengroep). Reststerkte van de onderlagen is dus ook niet eenduidig, maar hangt af van de ontstane conditie wanneer de onderlagen na initieel falen van de toplaag worden aangesproken (oplichten, klein gaatje, of in één keer en groot gat).

Bij verdere detailuitwerking van de boom zou met een schuin oog gekeken moeten worden naar de foutenbomen uit het DC-rapport dijkdoorbraakprocessen.

De procesbeschrijvingen die in het memo op de blz. na de boom gegeven worden zijn noodzakelijke ondersteuning voor de boom.

Voor andere bekledingtypen dan basalt zal boom wellicht deels aangepast moeten worden.

Voor wat betreft afschuiving moet duidelijk worden gemaakt dat de geotechnische afschuiving buiten beschouwing blijft. Voor wat betreft het afschuiven van de bekleding moet onderscheid worden gemaakt tussen enerzijds "afschuiven toplaag" en anderzijds "afschuiven toplaag + klei".

In z'n algemeenheid is het van belang bij alle vereenvoudigingen die in de boom gemaakt worden wel te noteren waarom deze vereenvoudigingen in de boom (en dus de case) zijn gemaakt.

Voor wat betreft materiaaltransport door de toplaag moet het onderscheid worden gemaakt tussen transport vanuit de ondergrond en transport van filtermateriaal.

Vraag is gesteld hoe je in de boom kunt laten zien dat je ook te maken hebt met onzekerheden aangaande belastingen. In de case is bijvoorbeeld de lange golf niet beschouwd. Impliciet wordt deze (net als in het randvoorwaardenboek) als niet maatgevend beschouwd.

Van belang is dat bij het kwantificeren van de boom wel alle onzekerheden die er zijn, maar die niet expliciet in de berekening worden meegenomen, in begeleidende tekst worden benoemd. Meer algemeen zit achter elk knooppunt een heel verhaal dat je niet in de boom kunt/wilt laten zien, maar dat er wel is. Moet er op een of andere manier wel onder worden gehangen.

Lijst met onderzoeksvragen uit het TR Steenzettingen zou erbij gepakt moeten worden. Dit is een checklist voor identificatie van onzekerheden en witte vlekken in de boom. Sommige knooppunten zullen noodgedwongen niet of met veel onzekerheden ingevuld kunnen worden, eenvoudigweg omdat kennis ontbreekt of tekort schiet.

## **Reststerkte dijklichaam**

Meningen over zichtbaar meenemen hiervan verschillen. Heeft zo z'n gevoeligheden ook buiten technisch inhoudelijke voors en tegens. Voorgesteld is zichtbaarheid op te lossen door de boom "bekleding" te presenteren als een subboom van de dijk in z'n totaliteit die door veel meer mechanismen kan falen. In die subboom hoeft je dan de reststerkte van het dijklichaam niet meer noodzakelijk mee te slepen terwijl je het ook niet kwijt raakt.

## **Tot slot**

Benadrukt is nogmaals dat de hele exercitie niet primair gaat om vaststellen van een juiste waarde van de faalkans, maar om het vergroten van het inzicht van gevoeligheid van de beoordeling voor onzekerheden en variaties.

Zsteen rekent niet probabilistisch. Er is sprake van terugredentie vanuit het faalcriterium.

Vervolgacties zullen zijn:

- boom aanpassen
- info completeren
- som maken

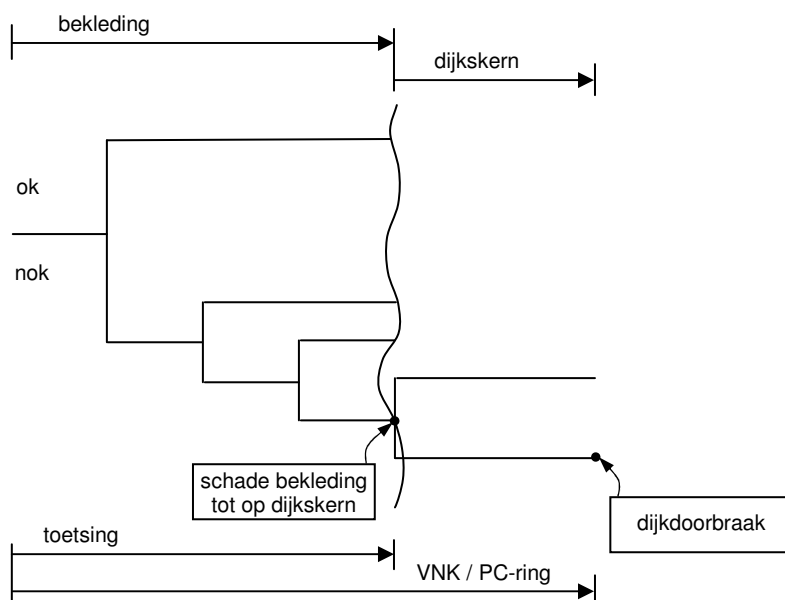
Aan : Alessandra Bizzarri, Jentsje van der Meer, Adam Bezuijen  
Van : Jaap Stoop  
Ref. : 1204-0021-000  
Datum : 12-10-2004  
Betreft : **Verslag deskundigenoverleg onderlagen d.d. 11 okt. 2004 van 13.45 uur - 17.15 uur**

## Algemeen

Doel van het onderzoek wordt nogmaals aangeduid: het gaat er in de eerste plaats om dat het zicht op gevoeligheden van de beoordeling van bekledingen voor onzekerheden wordt vergroot. Je wilt de grootste onzekerheden met voorrang elimineren.

Het begrip reststerkte zou je niet moeten gebruiken, sterkte = sterkte. Het is een beleidsmatige beslissing om in de beoordeling mee te nemen sterkte te begrenzen tot sterkte van de bekleding.

In VNK / PC-ring wordt bij bijdrage van bekleding aan faalkans dijk gerekend t/m doorbraak van de dijk. Bij toetsing mag niet verder worden gerekend dan t/m erosie onderlagen tot aan de dijkskern (zie onder).



Hoogte is van belang v.w.b. reststerkte na "falen" bekleding. Bepaalt resterend nog weg te eroderen dijkbreedte voordat een doorbraak optreedt.

Er zijn voorbeelden van aanzienlijke schaden aan de bekleding waarbij echter de veiligheid van de dijk niet in gevaar kwam. Genoemd zijn Oesterdam (uitspoeling onderlaag en in één keer een groep stenen eruit) en Zuidwal (hele bekleding weg, maar er resteerde een situatie met natuurlijk talud onder 1:7). Schadegevallen zou je ook nog eens kunnen meenemen als case.

Zelfs grote schaden aan de toplaag leiden nog niet noodzakelijk tot grootschalige erosie. Golf krijgt op den duur geen vat meer op het geheel, boven het erosiegat zit ook nog veel dijk en veel toplaag.

In geval van kale klei treedt wel voortschrijdende erosie op die uiteindelijk tot falen van de dijk kan leiden.

Te onderscheiden stappen in falen van de bekleding leidend tot falen dijk zijn:



1 steen -----> steengroep -----> hele bekleding -----> dijk

De "overgangskans" van 1 steen naar meer stenen kan best groot zijn en kun je in eerste veilige benadering best 1 voor aanhouden. Meeste reststerkte zit vermoedelijk in de onderlagen in combinatie met nog in tact zijn van wel een groot deel van de bekleding.

Vaak zit er een berm net onder de stormvloedstand. Dit levert een enorme bijdrage aan de sterkte ook na optreden van het initieel mechanisme.

Gedachtemodellen moet je valideren voor ze in de praktijk te kunnen gebruiken. Hier ontbreekt het nogal eens aan.

In de kansen die binnen VNK worden berekend zitten sterktecomponenten (reststerkte dijk) die in de praktijk niet geaccepteerd worden als bijdragen (resultaten toetsing en VNK zijn dus niet uitwisselbaar).

In huidige onderzoeksprogramma is meeste inspanning nog wel gericht op de toplaag, maar er wordt wel stap verder gezet dan het 10% bewegen criterium. Bijvoorbeeld onderzoek naar klemming. Meenemen van het resultaat daarvan betekent impliciet dat verlies van individuele losse stenen geaccepteerd wordt. In het lopende onderzoeksprogramma zit ook onderzoek in de deltagoot met steen eruit, gericht op onderzoek naar wat er daarna gebeurt. Binnen het lopende onderzoeksprogramma zit het onderzoek naar reststerkte voor een deel in het onderzoek naar klemming. Voor een ander deel zit het in het aparte deelonderzoekspoor "Reststerkte". Dit deelspoor is nu wel even in de halt gezet.

In de geselecteerde case met basalt zal de vrijheid genomen moeten worden met parameters te variëren om mogelijke sterktebijdrage onderlagen zichtbaar te maken. Filter en kleilaag van deze case zijn immers wel erg mager.

Gesteld is dat het gegeven van inslibbing van de toplaag van de bekleding in deze case niet zo relevant is. Boven stormvloedpeil kan geen sprake zijn van inslibbing, en dit hogere niveau is maatgevend. Conservatieve benadering is uit te gaan van steen eruit boven stormvloedstand, immers:

- daar is geen inslibbing;
- de belasting is vermoedelijk het hoogst;
- de dijk heeft daar de minste breedte.

De foto's van schade in Infram-rapport (Veiligheid in rekentechnieken van steenzettingen) tonen aan dat er nog veel marge is tussen schade toplaag en falen dijk. Meestal ligt het filter er zelfs nog, en vaak liggen ook toplaagelementen er nog, zij het uit hun verband. Uitgaande van bijv. een helling van 1:4, zoals in de case, zit je ter plaatse van de schade al snel op een natuurlijk talud van orde 1:7. Bij dergelijk talud gebeurt er in de regel niet zo veel meer. Een schade aan de bekleding heeft uiteindelijk beperkte afmetingen. Boven de schade zit ook nog dijk en bekleding.

Bestaande reststerktemodellen hebben maar beperkte dekking en zijn conservatief. In huidige aanpak wordt er van uitgegaan dat na aanspreken van reststerkte van het filter (uitspoeling filter door gat in toplaag en vervolgens instorten toplaag) de klei wordt aangesproken. In werkelijkheid zal er na aanspreken van de reststerkte van het filter sprake zijn van een gat in de toplaag waarin de losse toplaagelementen van de gedeeltelijk ingestorte toplaag zullen liggen. Dit is nog geen groot onverdedigd kleivlak waarop dan weer de reststerkteformulering voor de kleilaag is gebaseerd.

Reststerktemodellen mogelijk aan te scherpen met gegevens in schadedatabase. Aandachtspunt is dan nog de belastingdata, die is meestal maar zeer globaal bekend.

Reststerkte zien als mogelijke evacuatietijd is onzinnig. In Zeeland is bij maatgevende omstandigheden dijkbewaking en evacuatie niet meer mogelijk.

Onzekerheid over reststerkte moet je verkleinen door proeven te doen, kijken wat er in werkelijkheid gebeurt.

## **Gestelde vragen in het voorbereidend memo**

vraag 1: boven stormvloedstand is toplaag niet dichtgeslibt. Bij Hans van der Sande zou moeten worden nagegaan hoe de bekleding van deze case scoort in de toetsing. Alessandra zal dit navragen.

vraag 5: invloed dichtslibbing kun je kwijt in de leklengte.

vraag 6: erosiebestendigheid van klei is belangrijke "parameter" waar het gaat om reststerkte. Dunne kleilaag zal snel gescheurd zijn, en erodeert dan snel. Dikke kleilaag kan veel erosiebestendiger zijn. Voor die dikke laag zal het vervolgens nog veel uitmaken hoe die aangevallen wordt, direct of niet direct.

## **Verbeteren boom en kwantificeren case**

Reststerkte in verschillende stappen van de verder uitgedetailleerde boom zouden we nog eens kunnen invullen met expertschattingen.

De betrouwbaarheidfuncties die in het memo zijn genoemd, en die in PC-ring zitten, zijn beperkt. Gevraagd is of de dijkkring waar de beschouwde case deel van uit maakt eigenlijk wel in het kader van VNK zal worden doorgerekend met PC-ring. Vermoed wordt van niet, maar Alessandra gaat dit nog even na.

## **Afspraken voor vervolg**

Boom uitwerken op basis van geleverde commentaar. Vervolgens kwantificeren, daarbij betrouwbaarheidsfuncties waar mogelijk gebruiken, en verder aanvullen met expertschattingen.

Basisgegevens mogen hierbij gevarieerd worden tot filterlaag van maximaal orde van grootte 20 cm en kleilaag van maximaal 80 cm à 100 cm. Toplaagdikte kan andersom verminderd worden tot dikte waarbij deze nog net voldoet (ijkpunt kansresultaat aan deterministisch resultaat).

## **Restplanning**

Ten behoeve van de klankbordgroepvergadering van 21/10 wordt op 18 oktober een verbeterde boom + toelichting geleverd. Dit is het conceptrapport. Vervolgens wordt ten behoeve van de eerstvolgende klankbordgroepvergadering daarna het eindconcept uitgewerkt. Deze vergadering zal vermoedelijk in de derde week van november plaatsvinden, en dus moet dan het eindconcept in de eerste week van november klaar zijn. Uiterlijk 1 december moet dan het rapport definitief zijn.

Commentaar op het eindconcept moet ook kunnen worden geleverd door de geraadpleegde deskundigen die niet in de klankbordgroep zitten. Jentsje van der Meer kan dit doen via Ep, en Adam Bezuijen via Theo.

**BIJLAGE 5**  
**GEBEURTENISSENBOOM**

## TOELICHTING BIJ DE GEBEURTENISSENBOOM

In de gebeurtenissenboom worden acht paden onderscheiden. Het bovenste pad is het succespad. Langs de overige zeven paden daaronder kan, gegeven een zekere hydraulische (golf)belasting, de ongewenst gebeurtenis 'falen van de bekleding' kan worden bereikt. De initieel mechanismen van deze zeven paden zijn genummerd van 2 tot en met 8. Het succespad heeft het nummer 1. De gebeurtenissen per tak zijn als volgt te omschrijven:

- (1) In deze tak gebeurt er helemaal niets met de bekleding, deze doorstaat de storm zonder enige schade. De kans hierop is 1 minus de kans dat er één of meer initiële schaden optreden.
- (2) In deze tak is de toplaag op zich zwaar en sterk genoeg om de storm zonder schade te doorstaan, maar vind door oplichten van de toplaag wel migratie van onderliggend filtermateriaal plaats (vorming S-profiel). De daardoor veroorzaakte ondermijning van de toplaag leidt uiteindelijk tot instorten van de toplaag, gevolgd door erosie van filterlaag en toplaag en, uiteindelijk van onderliggende kleilaag.
- (3) In deze tak wordt een individuele steen uit de toplaag gedrukt. Vervolg van het faalproces kan op twee manieren plaatsvinden.  
In de bovenste tak is sprake van incidenteel ontstane gaten door verlies van enkele toevallig losliggende en zwaarbelaste stenen. Dit wordt gevolgd door uitspoeling van filtermateriaal ter plaatse van die gaten en daarmee ondermijning van een groter deel van de toplaag. Na instorten vindt doorgaande erosie van filtermateriaal en toplaag over een groter oppervlak plaats en erodeert uiteindelijk ook de onderliggende kleilaag.  
In de onderste tak is de belasting dermate groot dat grootschalig uitspoelen van toplaagelementen optreedt (lokaal meerdere elementen per m<sup>2</sup>). De toplaag verliest dan z'n samenhang en filter en toplaag zullen wegspoelen. Vervolgens erodeert ook de onderliggende kleilaag.
- (4) In deze tak is sprake van het uitgedrukt worden van in één keer een samenhangende groep stenen. Ter plaatse van het ontstane gat vindt vervolgens verdere erosie plaats van filter en toplaag en vervolgens van de onderliggende kleilaag.
- (5) In deze tak is sprake van afschuiven van de toplaag van de bekleding.
- (6) In deze tak is sprake van afschuiven van de gehele bekleding langs onder de kleilaag.
- (7) In deze tak is sprake van uitspoeling van ondergrondmateriaal. Dit leidt op den duur tot ondermijning van de toplaag en na instorten van toplaag tot doorgaande erosie van filter en toplaag. Vervolgens zal ook de onderliggende kleilaag eroderen.
- (8) In deze tak is sprake van uitspoeling van filtermateriaal. Dit leidt op den duur tot ondermijning van de toplaag en na instorten van toplaag tot doorgaande erosie van filter en toplaag. Vervolgens zal ook de onderliggende kleilaag eroderen.

**BIJLAGE 6**  
**OVERZICHT**  
**PROBABILISTISCHE BEREKENING**

## **Berekeningsaanpak**

De gebeurtenissenboom geeft een overzicht van de mogelijke manieren waarop een bekleding een stormbelasting doorstaat (zie ook de boom in de vorige bijlage 5). De kans op een zeker pad binnen de gebeurtenissenboom wordt bepaald door de waarde van de relevante parameters. Deze parameters zijn alle meer of minder onzeker voor wat betreft hun waarde. Daarnaast speelt ook de onzekerheid aangaande de gehanteerde (fysisch) modellen waarmee het gedrag van de bekleding wordt beschreven een rol (modelonzekerheid).

Voor de zowel de fysische parameters, alsook de modelfactoren, welke de modelonzekerheid representeren, kunnen de onzekerheden worden gekwantificeerd door ze als stochasten op te vatten. Deze stochasten kunnen worden gekarakteriseerd door het verdelingstype en waarden voor ligging en spreiding.

Hiervan uitgaande kan nu door middel van Monte-Carlo simulaties de gebeurtenissenboom een zeer groot aantal keer worden doorgerekend. Per trekking wordt een set parameters uit de opgegeven verdelingen getrokken waarmee de boom tot een zekere eindgebeurtenis wordt doorlopen (een simulatie). Elke trekking (in de berekening zijn dit er in totaal 1 miljoen) creëert een storm met constante belastingparameters en worden ook de sterkteparameters bepaald.

Op basis van het aantal keer dat een zekere eindsituatie (geen schade, beperkte schade, grote schade of falen bekleding) wordt bereikt kan nu eenvoudig de kans op die eindsituatie worden berekend door dat aantal keer te delen door het totaal aantal trekkingen van parametersets (in de uitgevoerde berekening dus 1 miljoen).

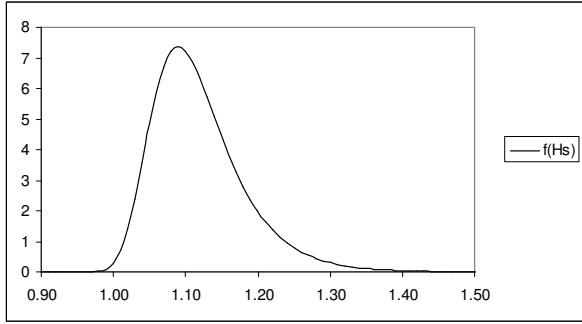
Gegeven een trekking van een set parameterwaarden kunnen echter meerdere initiële mechanismen tegelijkertijd optreden (en dus meervoudig falen kan optreden). In de berekening is vooralsnog op eenvoudige wijze achteraf voor deze dubbeltellingen gecorrigeerd door berekende kansen naar rato van de verhouding tussen het aantal trekkingen (1 miljoen) en het aantal realisaties (gelijk aan of groter dan 1 miljoen) te verlagen. Een nettere maar rekentechnisch wat bewerklijker aanpak is deze correctie meteen per trekking uit te voeren. Als in een zekere trekking bijvoorbeeld drie initiële mechanismen tegelijkertijd optreden, dan tellen de realisaties van die trekking allen voor slechts een derde mee.

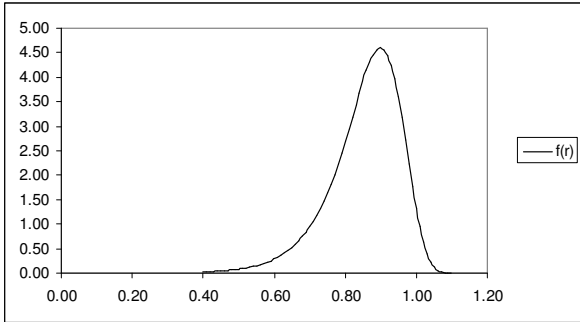
Onderscheid wordt gemaakt tussen instantaan optredende faalgebeurtenissen en tijdsafhankelijke faalgebeurtenissen. De kans op instantaan optredende faalgebeurtenissen is niet tijdsafhankelijk, maar treedt gegeven een belasting groter dan de sterkte per direct op. De kans op tijdsafhankelijke faalgebeurtenissen hangt af van de belastingduur. In de boom kunnen de instantaan optredende gebeurtenissen worden geassocieerd met het vervolgen van de onderste tak op de splitsingspunten. Deze splitsingspunten zijn aangeduid met kleine letters tussen haakjes, bijvoorbeeld (i). De tijdsafhankelijke faalgebeurtenissen kunnen worden geassocieerd met het passeren van de blokjes op de onderste tak kort na een splitsingspunt. Deze blokjes zijn allen aangeduid met een hoofdletter en een volgnummer, bijvoorbeeld C4. Alle tijdsafhankelijke faalgebeurtenissen zijn in de boom aangeduid met een arcering rechts in het betreffende gebeurtenissenblokje.

Tussen de splitsingspunten en de gebeurtenissenblokjes zijn steeds de kansen gegeven van het langs dat pad verder doorlopen van de boom. De bovenste kans betreft de kans op geen falen, de onderste kans betreft de kans op falen. De onderste kans is samengesteld uit de kans op de instantaan optredende faalgebeurtenis behorende bij het splitsingspunt ervoor, en de kans op de tijdsafhankelijke faalgebeurtenis behorende bij het gebeurtenissen blokje. Deze laatste kans is berekend als de kans dat de belastingduur (de stormduur) groter is dan de cumulatieve tijdsafhankelijke reststerkte tot en met dit gebeurtenissenblokje.

## Variabelen

In onderstaande tabel zijn de variabelen weergegeven die gebruikt zijn in de analyse. Als geen waarde voor de spreiding is weergegeven is deze nul verondersteld.

Parameter	Ligging	Spreiding	Type verdeling	Toelichting
$H_s$ [m]	1,09 (mode)	$s = 0,05$ (schaal)	extreme waarde (maxima)	Significante golfhoogte. Verdeling gefit aan ontwerpwaarde van $H_s = 1,5$ m met een overschrijdingsfrequentie van 1/4.000 jaar, en een "eens per 10 jaar golf" van $H_s = 1,20$ m. Dit levert de kansdichtheidsfunctie in onderstaande figuur. 
$S$ [m]	1/36	$V = 0,1$	normaal	Golfsteilheid. Ligging en variatie zijn geschatte waarden bij optreden van de ontwerpgolf $H_s = 1,5$ m. Bij deze waarden voor ligging en variatie is er een kans van ca. 2,5% op overschrijding van de waarde $S = 1/44,3$ bij optreden van de ontwerpgolf. Deze laatste waarde correspondeert met de waarde voor de piekperiode in de deterministische berekening (par. 3.5.1), immers $T_p = \sqrt{(H_s / 1,56 \times S)} = 6,53$ s
$\xi$ [-]				Brekerparameter: $\xi = \tan(\alpha)/(S)^{0,5}$ De waarde van de brekerparameter volgt derhalve direct uit de waarde van de stochasten $\tan(\alpha)$ , zie verderop, en $S$
$t_s$ [s]	36.000 (10 uur)	$\sigma = 7.200$	normaal	Gedeelte van de totale stormduur van 35 uur waarin het beschouwde bekledingsniveau (NAP +2,0m) wordt aangevallen. De aangehouden waarde van de ligging is een schatting gebaseerd op het volgens de aanwijzingen uit de VTV geconstrueerde verloop van het hoogwater (zie figuur 3 in par. 3.5.2). De aangehouden waarde van de spreiding is niet meer dan een inschatting.
$t_0$ [s]	0			Tijdstip waarop een initieel mechanisme (aanspreken reststerkte) optreedt ten opzichte van het begin van de denkbeeldige storm. Conservatieve inschatting: $t_0 = 0$ s. Hiermee is aangenomen dat als het initieel mechanisme optreedt, dat het dan ook meteen aan het begin van de storm optreedt.
$F_{B2}$ [-]	5,5	$V = 0,10$	normaal	Coëfficiënt sterkte steenbekleding tak B2. Waarde voor ligging ingeschat o.b.v. $F_{B3}$ . $F_{B2} = 0,73 \cdot F_{B3}$ . Waarde voor spreiding o.b.v. notitie D.J. Peters (bijlage 7)
$F_{B3}$ [-]	7,5	$V = 0,124$	normaal	Coëfficiënt sterkte steenbekleding tak B3. Waarden gebaseerd op tabel 3.5 van handleiding B van PC-ring [TNO 2003-B].
$F_{B4}$ [-]	9,0	$V = 0,15$	normaal	Coëfficiënt sterkte steenbekleding tak B4. Waarde voor ligging ingeschat o.b.v. $F_{B3}$ . $F_{B4} = 1,20 \cdot F_{B3}$ . Waarde voor spreiding o.b.v. notitie D.J. Peters (bijlage 7)

Parameter	Ligging	Spreiding	Type verdeling	Toelichting
$F_{C4}$ [-]	7,5	$V = 0,186$	normaal	Coëfficiënt sterkte steenbekleding tak C4. Waarde voor ligging en spreiding conform voorstel R. 't Hart: ligging als $F_{B3}$ , spreiding 1,5 maal de spreiding van $F_{B3}$ .
$D$ [m]	0,20	$V = 0,027$	normaal	Steendikte toplaag. Ligging betreft verlaagde gemiddelde steendikte; Variatie op basis van [TNO 2003-B]. N.B. Bij beschouwing van uitdrukken losse steen zou moeten worden uitgegaan van gemiddelde en standaardafwijking van de individuele stenen. Bij beschouwing van een samenhangende steengroep die er als geheel uit spat zou kunnen worden uitgegaan van gemiddelde en standaardafwijking van een steengroep. Die standaardafwijking van de groep zal kleiner zijn dan die van de individuele steen. In de deterministische regels mag je dan ook i.g.v. veel klemming rekenen met een gemiddelde dikte i.p.v. met een veilig (lage) waarde van de dikte. In deze berekening is dit opgelost met een hogere waarde van de factor $F_B$ ( $F_{B3} = 9,0$ )
$c_{rs}$ [m]	1,5	$\sigma = 0,18$	normaal	Coëfficiënt reststerkte steenzetting op granulaire filter. Waarden gebaseerd op tabel 3.5 van handleiding B van PC-ring [TNO 2003-B].
$D_k$ [m]	1,0	$\sigma = 0,20$	normaal	Dikte van de afdekkende kleilaag. De waarde voor de spreiding is ontleend aan de studie VAST [VAST 2001]. Met de waarde voor de kleilaagdikte $D_k$ en de hellingshoek $\alpha$ van het talud, wordt de waarde van de horizontale breedte van de kleilaag $L_k$ berekend volgens $L_k = 1/\sin\alpha$ .
$c_{rk}$ [ms]	34.000	$V = 0,3$	normaal	Coëfficiënt reststerkte kleibekleding. Ligging en spreiding o.b.v. tabel 3.5 van handleiding B van PC-ring [TNO 2003-B], uitgaande van goede klei.
$r$ [-]	0,90 (mode)	$s = 0,08$ (schaal)	extreme waarde (minima)	Reductiefactor op schuin invallende golven. Deze reductiefactor wordt direct toegepast op de significante golfhoogte $H_s$ . Tijdens een 2e overleg met de toplaagdeskundigen is aangegeven dat kan worden uitgegaan van een gemiddelde van 0,9, en een 95%-betrouwbaarheidsinterval met ondergrens van 0,6 en bovengrens van 1,0. Aangegeven verdelingstype met bijbehorende waarden voor ligging en spreiding voldoet hieraan. Dit levert de volgende kansdichtheidsfunctie.  
$K_d$ [-]	5	$\sigma = 1,5$	normaal	Hudson coëfficiënt. Waarden zijn geschat.



Parameter	Ligging	Spreiding	Type verdeling	Toelichting
$D_n$ [m]				Diameter van de denkbeeldige kubus die dezelfde massa $M$ en dichtheid $\rho$ heeft als beschouwde element (gezette basalt). Deze vervangende kubusdiameter wordt gebruikt in de formule van Hudson (voor beoordeling van de stabiliteit van losgespoelde stenen). De kansverdeling van de vervangende kubusdiameter $D_n$ wordt berekend uitgaande van een uniform verdeelde kopdiameter $D_{kop}$ van de basaltzuilen, variërend tussen 0,20 en 0,35. De verdeling van de dikte $D$ is reeds eerder beschreven. De vervangende kubusdiameter is dan te berekenen volgens $D_n = (D \times D_{kop}^2)^{1/3}$ .
$D_{50f}$ [m]	0,06	$\sigma = 0,01$	normaal	De $D_{50}$ van het filtermateriaal (granulaire laag). Aangenomen op $1,5 \cdot D_{15}$ (met $D_{15} = 40$ mm, ofwel 0,04 m)
$G$ [m]	0,08	$\sigma = 0,015$	normaal	Gatdiameter tussen gezette basaltblokken (geschatte waarde).
$\Omega$ [-]	10%		normaal	Open ruimte gehalte van de toplaag; afhankelijk van de gatdiameter ( $G$ ) en de afmeting van de basaltblokken ( $D_n$ ).
$t_1$ [s]				Reststerkte erosie ingestorte toplaag. Aangenomen op 10% van de reststerkte steenzetting op granulaire filter $t_{rs}$ .
$t_2$ [s]				Reststerkte filterlaag (doorgaande gatgroei tot op kleilaag). Aangenomen op 10% van de reststerkte steenzetting op granulaire filter $t_{rs}$ .
$t_{rs}$ [s]				Reststerkte steenzetting op granulaire filter.
$t_{rk}$ [s]				Reststerkte kleilaag.
$Y$ [m]				Uitspoelingsdiepte.
$\Delta$ [-]	1,83			Relatieve dichtheid.
$\tan(\alpha)$	0,27			Tangens van de helling van het buitentalud.
$g$ [ $m/s^2$ ]	9,81			Zwaartekrachtversnelling.
$m_{zB2}$	1,0	0,2	normaal	Modelfactor grenstoestandfunctie B2. Waarden voor ligging en spreiding zijn overgenomen van de waarden voor $m_z$ (modelfactor zuilen) uit het rapport 'Dimensioneringsmethode Blokken op kant met brede voegen', [WL 1999]
$m_{zB3}$	1,0	0,2	normaal	Modelfactor grenstoestandfunctie B3. Waarden voor ligging en spreiding zijn overgenomen van de waarden voor $m_z$ (modelfactor zuilen) uit het rapport 'Dimensioneringsmethode Blokken op kant met brede voegen', [WL 1999]
$m_{zB4}$	1,0	0,2	normaal	Modelfactor grenstoestandfunctie B4. Waarden voor ligging en spreiding zijn overgenomen van de waarden voor $m_z$ (modelfactor zuilen) uit het rapport 'Dimensioneringsmethode Blokken op kant met brede voegen', [WL 1999]
$m_{zC4}$	1,0	0,2	normaal	Modelfactor grenstoestandfunctie C4. Waarden voor ligging en spreiding zijn overgenomen van de waarden voor $m_z$ (modelfactor zuilen) uit het rapport 'Dimensioneringsmethode Blokken op kant met brede voegen', [WL 1999]

Parameter	Ligging	Spreiding	Type verdeling	Toelichting
$m_{zB8}$	1,0	0,2	normaal	Modelfactor grenstoestandfunctie B8. Waarden voor ligging en spreiding zijn overgenomen van de waarden voor $m_z$ (modelfactor zuilen) uit het rapport 'Dimensioneringsmethode Blokken op kant met brede voegen', [WL 1999]
$m_{zE}$	1,0			Modelfactor grenstoestandfunctie E (Hudson).
$m_{t1}$	1,0			Modelfactor tijdsduur ondermijning en instorten toplaag.
$m_{t2}$	1,0			Modelfactor tijdsduur erosie filterlaag (doorgaande gatgroei tot op kleilaag).
$m_{trs}$	1,0			Modelfactor reststerkte van steenzetting op granulaire filter.
$m_{trk}$	1,0			Modelfactor tijdsduur erosie kleilaag.

### Uitgangspunten

De belangrijkste uitgangspunten van de berekening zijn:

- Het initiële mechanisme treedt op aan het begin van de (denkbeeldige) stormduur. De reststerkte benadering begint op het moment dat er een initieel mechanisme optreedt. Dit is een veilige benadering.
- Het golfspectrum binnen een storm wordt gekarakteriseerd door één  $H_s$  die gedurende de gehele stormduur constant is, en dus onafhankelijk is verondersteld van de waterstand.
- Aan het geotextiel onder de kleilaag wordt geen reststerkte toegekend.
- Naast de onzekerheid over de invoerparameters is er ook onzekerheid over de gebruikte modellen. De mate van onzekerheid over de modellen is verdisconteerd in de modelfactor. De modelfactor bestaat uit twee componenten:
  1. Een component voor correctie op de 'ingebouwde' veiligheid in het model (model ten opzichte van meetwaarden).
  2. Een component voor verdiscontering van de onzekerheid in de geldigheid van het gebruikte model (model als representatie van de werkelijkheid).

De modelfactor kan ook gebruikt worden om een 'simpel' probabilistisch berekeningsmodel te fitten aan een geavanceerd, op de fysica gebaseerd, model. De waarde en plaats van de modelfactor is nog onderwerp van discussie. In deze berekening is gekozen om de modelfactor aan de 'sterkte' kant van de grenstoestandfunctie te plaatsen. Voor de diverse modelfactoren in de berekening is vooralsnog de waarde 1 aangehouden.
- De bekleding is in goede staat voordat de storm begint. De aannemelijkheid van dit uitgangspunt is een aandachtspunt dat nog wel onderzocht moet worden. Zie ook paragraaf 2.1.
- De kansberekening met de boom heeft betrekking op één hoogteniveau in één raai van de bekleding. Vertaling naar kans op vakniveau is niet beschouwd.

### Splitsingspunten

De splitsingspunten zijn weergegeven als kleine letters, bijvoorbeeld (i). Op ieder splitsingspunt wordt kans op het optreden van de instantane faalgebeurtenis behorende bij dat splitsingspunt berekend. Bij een compleet gevulde boom is er voor ieder splitsingspunt een grenstoestandfunctie (Z-functie) geformuleerd, of is er sprake van een vooraf ingestelde verdeling van de aankomende kansmassa over de beide takken.

De gebeurtenissenboom bevat de volgende splitsingspunten:

- (a) De kans op 'geen beweging toplaag' kan worden gedefinieerd als de complementerende kans van alle initiële mechanismen. Als een initieel mechanisme niet optreedt, is 'geen beweging toplaag' waar.
- (b) Het optreden van het 'oplichten van een steengroep' is bepaald door middel van:

$$Z_{B2} = m_{zB2} F_{B2}(\xi)^{-2} - \frac{H_s}{\Delta D}$$

Deze betrouwbaarheidsfunctie is gebaseerd op de 6ξ-regel. Verondersteld is voor het gemak dat deze algemene stabiliteitsgrens voor het beschouwde bekledingstype (gezette basalt) altijd maatgevend is boven de Anamos-fit.

- (c) Migratie van filtermateriaal treedt op wanneer  $Z_{B2} < -0,20$ . In het andere geval is er geen migratie van filtermateriaal. Deze grenstoestand is willekeurig geschat en niet onderbouwd.
- (d) Aangenomen wordt dat in geval van optreden van migratie van filtermateriaal langs het talud (gebeurtenis C2) dat dan altijd ondermijning en op den duur instorten van de toplaag het gevolg zal zijn. Om die reden gaat alle kansmassa naar de onderste tak.
- (e) De stabiliteit van de losse elementen wordt berekend aan de hand van de formule van Hudson. Hieruit volgt de volgende grenstoestandfunctie:

$$Z_{E2} = m_{zE} \left( \frac{K_d}{\tan \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta D_n - H_s$$

De nominale diameter ( $D_n$ ) is als onafhankelijke stochast geschouwd. In werkelijkheid is de  $D_n$  gecorreleerd met de dikte  $D$  van de steenzetting.

- (f) Aangenomen wordt dat als er losse basaltblokken wegspoelen, er doorgaande gatgroei plaatsvindt. Op den duur zal een situatie met een onbeschermd kleivlak worden bereikt als de belastingduur groot genoeg is. Om die reden gaat alle kansmassa naar de onderste tak.
- (g) De kleilaag erodeert als de bovenliggende filterlaag is weggeslagen (schatting). Een grenstoestandfunctie voor de erosiesterkte van klei is niet gedefinieerd.
- (h) Het optreden van het 'uitlichten van een steen' is bepaald door de volgende Z-functie:

$$Z_{B3} = m_{zB3} F_{B3}(\xi)^{-\frac{2}{3}} - \frac{H_s}{\Delta D}$$

- (i) Verdere afkalving toplaag. De kans op vervolgschade aan de toplaag nadat er eenmaal een los element is verdwenen heeft gevoelsmatig vooral te maken met spreiding in eigenschappen van toplaagelementen, de mate van klemming en spreiding daarin, en de mate waarin eenmaal verdwenen zijn van een toplaagelement de weerstand van aangrenzende toplaagelementen verlaagd of juist verhoogt (of niet beïnvloed). Hierover is weinig kennis voorhanden. De kans op verdere afkalving van de toplaag is geschat met behulp van de volgende Z-functie:

$$Z_{C4} = m_{zC4} F_{C4}(\xi)^{-\frac{2}{3}} - \frac{H_s}{\Delta D}$$

- (j) Aangenomen wordt dat als een losse steen wordt uitgelicht, er doorgaande uitspoeling van het filter plaatsvindt. De toplaag wordt ondermijnd en stort op den duur in.
- (k) De stabiliteit van de losse elementen wordt berekend aan de hand van de formule van Hudson. Hieruit volgt de volgende grenstoestandfunctie:

$$Z_{E3} = m_{zE} \left( \frac{K_d}{\tan \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta D_n - H_s$$

- (l) Aangenomen wordt dat als er losse elementen uitspoelen, de gatgroei doorgaat tot op de kleilaag, mits de belastingduur voldoende groot is.
- (m) Aangenomen wordt dat erosie van de filterlaag (doorgaande gatgroei tot op kleilaag) ook betekent dat vervolgens de onderliggende kleilaag erodeert.
- (n) Geschat wordt dat afkalving van de toplaag ook een verdere gatgroei tot op de kleilaag tot gevolg kan hebben (in geval van voldoende grote belastingduur).
- (o) Zie aanname bij beslispunt (m): De kleilaag erodeert als er doorgaande gatgroei van de filterlaag tot op de kleilaag heeft plaatsgevonden.

- (p) Het 'uitlichten van een steengroep' wordt beschreven door de volgende grenstoestandfunctie:
- $$Z_{B4} = m_{zB4} F_{B4}(\xi)^{-\frac{2}{3}} - \frac{H_s}{\Delta D}$$
- (q) Als een steengroep wordt uitgelicht, erodeert ook de onderliggende filterlaag (doorgaande gatgroei tot kleilaag).
- (r) Zie aanname bij beslispunt (m): de kleilaag begint te eroderen als er doorgaande gatgroei van de filterlaag heeft plaatsgevonden.
- (s) De kans op het afschuiven van de toplaag wordt verondersteld volledig te worden bepaald door de sterkte van de teen. Uitgaande van een voldoende sterke teenconstructie wordt de kans op optreden van dit initiële mechanisme zonder nadere onderbouwing geschat op maximaal  $10^{-5}$ .
- (t) Zie aanname bij beslispunt (m): de kleilaag begint te eroderen als er doorgaande gatgroei van de filterlaag heeft plaatsgevonden.
- (u) De grenstoestandfunctie van dit initiële mechanisme is niet nader bepaald. Orde grootte is op basis van de deterministische beoordeling in paragraaf 3.5.3 zonder verdere onderbouwing geschat op  $10^{-6}$ .  
N.B. Mogelijkheden voor een eerste nadere invulling zijn te ontleen aan de rekenregels uit het Technisch Rapport Steenzettingen (Ontwerpdeel, blz. 92).
- (v) De grenstoestandfunctie van dit initiële mechanisme is niet bepaald. Aspecten die hierin in ieder geval een rol zouden moeten spelen zijn de ervaringen m.b.t. het gedrag in de praktijk (bewezen sterkte: alleen relevant voor de bekledingsniveau's die al wel belast zijn geworden) en daarnaast de samenstelling en korrelgrootteverdeling van het ondergrondmateriaal alsmede de onzekerheid hierover. Voorts speelt ook de  $O_{90}$  van het aanwezige geotextiel een rol. De orde grootte van de kans op optreden van dit initiële mechanisme is, gegeven de geconstateerde zakkingen van individuele stenen van maximaal 5cm, maar het verder volledig ontbreken van relevante informatie, zonder nadere onderbouwing geschat op  $10^{-4}$ .
- (w) Aangenomen wordt dat materiaaltransport vanuit de ondergrond betekent dat de toplaag wordt ondermijnd en uiteindelijk instort.
- (x) De stabiliteit van de losse elementen kan worden geschat aan de hand van de formule van Hudson, beschreven bij beslispunt (e) en (k).
- (y) Als er losse elementen uitspoelen, gaat de gatgroei door tot op de kleilaag (schatting).
- (z) Zie aanname bij beslispunt (m): de kleilaag begint te eroderen als er doorgaande gatgroei van de filterlaag heeft plaatsgevonden.

- (aa) De Z-functie van dit initiële mechanisme is gebaseerd op de formules beschreven in hoofdstuk 5.2 van het Technisch Rapport Steenzettingen (achtergronden). Als de openingen in de toplaag groter zijn dan de korrelgrootte, kan materiaaltransport vanuit de granulaire laag optreden. Op basis van het modelonderzoek zijn empirische relaties opgesteld voor de uitspoelingsdiepte Y:

$$\text{voor } G \geq 0,1 \text{ m: } Y = G \cdot 0,23 \cdot \left( \frac{H_s}{D_{50}} \right)^{0,33}$$

$$\text{voor } G < 0,1 \text{ m: } Y = G \cdot 0,04 \cdot \sqrt{\frac{H_s}{D_{50}}} \cdot \Omega^{-0,75}$$

Aangenomen wordt dat dit mechanisme optreedt als de uitspoelingsdiepte Y groter is dan de toplaagdikte, hieruit volgt:

$$Z_{B8} = D - m_{zB8} Y$$

Bij een gatdiameter kleiner dan de  $D_{50}$  van de granulaire laag wordt geen materiaaltransport verwacht en geldt  $Z_{B8} > 0$ .

- (ab) Aangenomen wordt dat de toplaag wordt ondermijnd en op den duur instort als er materiaaltransport vanuit het filter plaatsvindt.
- (ac) De stabiliteit van de losse elementen is te berekenen aan de hand van de formule van Hudson. Hieruit volgt de volgende grenstoestandfunctie:

$$Z_{E8} = m_{zE} \left( \frac{K_d}{\tan \alpha} \right)^3 \cdot \Delta d - H_s$$

- (ad) Aangenomen wordt dat als er losse elementen uitspoelen, dat dan de gatgroei doorgaat tot op de kleilaag, als de belastingduur maar groot genoeg is. Daarmee wordt aangenomen dat de totale kansmassa die bij dit splitsingspunt aankomt doorgaat naar de onderste tak. (schatting).
- (ae) Zie aanname bij beslispunt (m): de kleilaag begint te eroderen als er doorgaande gatgroei van de filterlaag heeft plaatsgevonden.

### Gebeurtenissen

Gebeurtenissen zijn aangeduid met een grote letter en een cijfer, bijvoorbeeld C4. Gebeurtenissen op het onderste pad na een splitsingspunt kunnen tijdsafhankelijk zijn. In dat geval is met het optreden van de faalgebeurtenis een zekere tijdsduur gemoeid. Deze tijdsafhankelijke faalgebeurtenissen worden in de boom aangeduid met een arcering rechts in de gebeurtenissenblokjes. Ontbreekt deze arcering, dan is er geen tijdsafhankelijke reststerkte en wordt de gebeurtenis geacht instantaan op te treden.

De volgende gebeurtenissen zijn in de boom onderkend:

- B1 Geen beweging toplaag. In de beslisstructuur is deze gebeurtenis gedefinieerd als het niet optreden van alle andere mechanismen.
- B2 Oplichten steengroep. Door de hydraulische belasting wordt een groep stenen opgelicht. Er worden echter geen stenen uitgelicht.
- B3 Uitlichten losse steen. Door de hydraulische belasting wordt een enkele steen uitgelicht.
- B4 Uitlichten steengroep. In geval de stenen goed klemmen werken vormen ze een samenhangende toplaag. Niettemin kan de hydraulische belasting zo groot zijn dat een groep stenen als geheel wordt uitgelicht.
- B5 Afschuiven van de toplaag.
- B6 Afschuiven van de bekleding langs een glijvlak onder de kleilaag.
- B7 Materiaaltransport vanuit ondergrond.
- B8 Materiaaltransport vanuit de granulaire laag onder de toplaag. Door uitspoeling van de filterlaag door de toplaag kan mogelijk een instabiele situatie ontstaan.
- C1 Geen migratie van filtermateriaal. Het oplichten van de steengroep heeft geen migratie van filtermateriaal tot gevolg.
- C2 Migratie van filtermateriaal kan optreden doordat een steengroep wordt opgelicht. Door de migratie van filtermateriaal zal de toplaag vervormen (vorming S-profiel). Het optreden van dit proces kan op den duur tot zodanige ondermijning van de toplaag leiden dat deze instort. Dit tijdsafhankelijke faalproces is beschreven onder gebeurtenis D2.
- C3 Geen verdere afkalving toplaag. Nadat een enkele losse steen is weggeslagen, blijft de toplaag intact. Inklemming van de overige stenen is voldoende om de toplaag intact te houden. Het verdwijnen van de losse steen verkleint niet de weerstand van aangrenzende stenen tegen opwaartse drukken door de er op werkende golfbelasting.
- C4 In deze berekening is aangehouden dat de reststerkte van de toplaag zelf na verdwijnen van een losse steen vergelijkbaar is met die van een toplaag die ondermijnd wordt door uitspoeling van filtermateriaal na het verdwijnen van een losse steen, zie gebeurtenis D4. De reststerkte

van een steenzetting op een granulair filter (zie beschrijving bij D4) is voor die situatie gegeven door:

$$t_{rs} = m_{trs} \cdot 57 \cdot 10^3 T_p e^{-\sqrt{H_s L_{op} / c_{rs}}}$$

Deze uitdrukking is niet meer dan een eerste schot voor de boeg van de reststerkte in deze situatie.

D1 Toplaag blijft intact. Migratie van het filtermateriaal heeft niet tot gevolg dat de toplaag instort.

D2 Ondernijning en instorten toplaag. Door de verplaatsing van het filtermateriaal vervormt de toplaag (vorming S-profiel) waardoor op de langere duur de samenhang tussen de stenen verdwijnt. Bij gebrek aan kennis (en dus modellering) over het verloop van dit proces in de tijd is voorlopig aangenomen dat de reststerkte in dit geval met een vergelijkbare formulering kan worden beschreven als de reststerkte in geval van een toplaag die ondernijnd wordt door uitspoeling van filtermateriaal na het verdwijnen van een losse steen, zie gebeurtenis D4. De reststerkte zal echter naar verwachting beduidend groter zijn (geschat factor 10) dan in geval van gebeurtenis D4. Dit houdt in dat de reststerkte voor deze situatie wordt beschreven als:

$$t_{rs} = m_{trs} \cdot 10 \cdot 57 \cdot 10^3 T_p e^{-\sqrt{H_s L_{op} / c_{rs}}}$$

Ook deze uitdrukking is uiteraard niet meer dan een eerste schot voor de boeg van de reststerkte in deze situatie.

D3 Geen doorgaande uitspoeling filter. Door het uitlichten van een enkele steen komt de filterlaag bloot te liggen. De belasting op deze granulaire laag is echter onvoldoende om de filterlaag uit te spoelen.

D4 Ondernijning en instorten toplaag. Door de opening van de uitgelichte losse steen spoelt het filtermateriaal uit. Hierdoor ontstaat een ruimte onder de toplaag. Na een bepaalde tijdsduur wordt deze ruimte zo groot dat de inklemming tussen de overige stenen onvoldoende is om de toplaag in stand te houden waardoor deze instort. Dit tijdsafhankelijke proces wordt als volgt beschreven:

$$t_{rs} = m_{trs} \cdot 57 \cdot 10^3 T_p e^{-\sqrt{H_s L_{op} / c_{rs}}}$$

D5 Toplaag blijft intact. Materiaaltransport vanuit de ondergrond heeft niet tot gevolg dat de toplaag instort.

D6 Ondernijning en instorten toplaag. Door materiaaltransport vanuit de ondergrond wordt de toplaag ondernijnd en stort deze op den duur in. Dit is een tijdsafhankelijk proces dat qua principe vergelijkbaar is gebeurtenis D4. Naar verwachting duurt dit proces echter beduidend langer dan volgens de uitdrukking behorende bij gebeurtenis D4. Omdat het initiële mechanisme niet door een berekening is onderbouwd, is de totale reststerkte van deze tak geschat.

D7 Toplaag blijft intact. Materiaaltransport vanuit de granulaire laag heeft niet tot gevolg dat de toplaag instort.

D8 Ondernijning en instorten toplaag. Ook het verloop van dit proces is qua principe vergelijkbaar met het proces beschreven onder gebeurtenis D4. Naar verwachting is echter de reststerkte ook in dit geval groter dan in geval van het proces bij gebeurtenis D4. Het hanteren van dezelfde uitdrukking levert daarmee naar verwachting een conservatieve inschatting van de reststerkte.

E1 Losse elementen blijven liggen. De hydraulische belasting is kleiner dan de sterkte van de losse stenen.

E2 Losse elementen spoelen weg. Deze erosie van de steenzetting is een tijdsafhankelijk proces. De uitdrukking voor deze reststerkte wordt geschat aan de hand van de uitdrukking voor reststerkte van steenzetting op een granulair filter waaruit een losse steen verdwenen is:

$$t_1 = 0,1 \cdot t_{rs} = m_{t1} \cdot 0,1 \cdot 57 \cdot 10^3 T_p e^{-\sqrt{H_s L_{op}/c_{rs}}}$$

Bij de beschrijving van erosie van de ingestorte toplaag met filter is nu een scheiding gemaakt tussen de gebeurtenissen E (wegspoelen toplaagelementen) en gebeurtenissen F (wegspoelen filterlaag). Aangenomen mag worden dat beide gebeurtenissen tegelijkertijd op zullen treden en het dus moeilijk is om beide processen in de tijd te scheiden. Wellicht moet gebeurtenis E worden ondergebracht bij gebeurtenis F (erosie toplaag en filterlaag). In deze berekening is de bijdrage van beide gebeurtenissen gezamenlijk aan de reststerkte gelijk gesteld aan  $0,2 \cdot t_{rs}$  (zie ook F2).

- E3 Zie beschrijving bij E1.
- E4 Beschrijving van deze gebeurtenis staat bij E2.
- E5 Zie beschrijving bij E1.
- E6 Beschrijving van deze gebeurtenis staat bij E2.
- E7 Zie beschrijving bij E1.
- E8 Beschrijving van deze gebeurtenis staat bij E2.
- F1 Gatgroei komt tot stilstand voordat een onbeschermd aangevallen klei-oppervlak ontstaat. Afhankelijk van de dikte en samenstelling van de toplaag en filterlaag enerzijds, en de helling van het oorspronkelijke talud anderzijds, is het voorstelbaar dat met het losse materiaal een nieuwe evenwichtssituatie ontstaat voordat er sprake is van een groot (zeg diameter van tenminste 3 meter) onbeschermd kleivlak.
- F2 Doorgaande gatgroei tot op kleilaag. Het wegspoelen van de ingestorte toplaag en het wegspoelen van de onderliggende filterlaag kan worden beschouwd als een integraal optredend erosieproces (zie opmerking bij gebeurtenis E2). De bijdrage van het wegspoelen van de filterlaag (reststerkte) is aangenomen op ( $t_2$ ) 10% van de reststerkte van steenzetting op granulair filter ( $t_{rs}$ ):
 
$$t_2 = m_{t2} \cdot 0,1 \cdot 57 \cdot 10^3 T_p e^{-\sqrt{H_s L_{op}/c}}$$
 De totale reststerkte van gebeurtenis E2 en F2 is aangenomen op  $t_1 + t_2 = 0,2 \cdot t_{rs}$ . Het ontstaan van een voldoende groot onbeschermd kleivlak hangt met name af van het aanwezige talud en het natuurlijke talud dat uit de combinatie van de toplaag en het filtermateriaal kan ontstaan. De duur van het ontstaan van een natuurlijk talud kan worden derhalve worden beschouwd als een reststerktefunctie ( $t_1 + t_2 = \dots$ ) waarin naar verwachting met name taludhelling, dikte filter, dikte toplaagelementen en significante golfhoogte een rol spelen.
- F3 Zie beschrijving bij F1.
- F4 Zie beschrijving bij F2.
- F5 Zie beschrijving bij F1.
- F6 Zie beschrijving bij F2..
- F7 Zie beschrijving bij F1.
- F8 Zie beschrijving bij F2.
- F9 Zie beschrijving bij F1.
- F10 Zie beschrijving bij F2.
- F11 Zie beschrijving bij F1.
- F12 Zie beschrijving bij F2.
- G1 Erosiesterkte kleilaag is voldoende.

- G2 Erosie kleilaag tot op dijkskern. Nadat de bovenliggende losse toplaagelementen alsmede de filterlaag is weggespoeld komt de kleilaag bloot te liggen. De reststerkte van de kleilaag is gegeven door:

$$t_{rk} = m_{trk} \frac{0,4L_k C_{rk}}{r^2 H_s^2}$$

- G3 Erosiesterkte kleilaag is voldoende. Zie gebeurtenis G1.  
G4 Erosie kleilaag tot op dijkskern. Zie gebeurtenis G2.  
G5 Erosiesterkte kleilaag is voldoende. Zie gebeurtenis G1.  
G6 Erosie kleilaag tot op dijkskern. Zie gebeurtenis G2.  
G7 Erosiesterkte kleilaag is voldoende. Zie gebeurtenis G1.  
G8 Erosie kleilaag tot op dijkskern. Zie gebeurtenis G2.  
G9 Erosiesterkte kleilaag is voldoende. Zie gebeurtenis G1.  
G10 Erosie kleilaag tot op dijkskern. Zie gebeurtenis G2.  
G11 Erosiesterkte kleilaag is voldoende. Zie gebeurtenis G1.  
G12 Erosie kleilaag tot op dijkskern. Zie gebeurtenis G2.  
G13 Erosiesterkte kleilaag is voldoende. Zie gebeurtenis G1.  
G14 Erosie kleilaag tot op dijkskern. Zie gebeurtenis G2.



**BIJLAGE 7**

**NOTITIE  
FACTOREN FAALMECHANISMEN  
TOPLAAG**

**BIJLAGE 8**

**AANVULLENDE  
BEREKENINGEN  
GEVOELIGHEIDSANALYSE**