

DEELONDERZOEK 5.1  
VAN HET ONDERZOEKSPROGRAMMA  
STEENBEKLEDINGEN

**KAPSTOK  
PROBABILISME**

**(stap 1: eerste opzet)**

Opmachtnummer: K00161000

Opmachtngever : Rijkswaterstaat Directie Zeeland  
Projectbureau Zeeweringen  
Postbus 114  
4460 AC Goes

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

Rapport mede opgesteld door : ir. J.D. Stoop  
Projectleider Waterbouw

ir. W.R. Halter  
Projectleider Waterbouw

VERSIE	DATUM	OMSCHRIJVING WIJZIGING	PARAAF PROJECTLEIDER
1	9 december 2003	concept	
2	9 januari 2004	eindconcept	
3			

doc.: k00161000.r04

## 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 Plan van aanpak .....	3
3.	ONDERZOEKSRESULTATEN .....	5
	3.1 Inventarisatie van beschikbare relevante informatie .....	5
	3.1.1 Huidige (deterministische) toetsmethode .....	5
	3.1.2 Probabilistische toetsmethode .....	6
	3.1.3 Reststerkte, inklemming en inslibbing .....	7
	3.1.4 Conclusies inventarisatie .....	7
	3.2 Probabilistische kapstok .....	8
	3.2.1 Gebeurtenissenboom .....	8
	3.2.2 Principe faalkansberekening .....	9
	3.2.3 Nadere toelichting per hoofdgebeurtenis .....	10
	3.2.4 Onderliggende probabilistische rekenmodellen .....	11
	3.2.5 Probabilistisch toetscriterium .....	12
	3.3 Relatie met overige deelonderzoeken .....	12
4.	AANBEVELINGEN MET BETREKKING TOT DE VERVOLGSTAP .....	15
	LITERATUUR .....	16

## BIJLAGEN

BIJLAGE 1: ONDERZOEKSPROGRAMMA KENNISLEEMTEN STEENBEKLEDINGEN  
BIJLAGE 2: OPZET PROBABILISTISCHE KAPSTOK

## 1. INLEIDING

Op 16 oktober 2003 ontving Fugro Ingenieursbureau B.V. te Nieuwegein van Rijkswaterstaat, Projectbureau Zeeweringen te Goes de opdracht<sup>1</sup> voor het opstellen van een 'Probabilistische kapstok' ten behoeve van het onderzoek naar steenbekledingen.

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 kan op basis van de huidige wetenschappelijke kennis aan veel steenbekledingen geen definitief toetsoordeel toegekend 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 onderdeel 5: 'Probabilistische rekenmethoden'. Het totale onderzoeksprogramma is weergegeven 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 ontwikkelde opzet van de probabilistische kapstok en het beoogde gebruik hiervan. In hoofdstuk 4 worden tenslotte de beoogde vervolgstap op de eerste opzet beschouwd, alsmede de relatie hiervan met het overige geprogrammeerde onderzoek.

Een overzicht van het totale onderzoeksprogramma is gegeven in bijlage 1. Een rudimentaire kwantitatieve voorbeelduitwerking van de probabilistische kapstok is gegeven in bijlage 2. Hierbij wordt alvast nadrukkelijk de waarschuwing gegeven dat deze voorbeelduitwerking tot doel heeft om heel concreet de rekengang te kunnen demonstreren, en nog verre van geschikt is voor toepassing in de praktijk.

---

<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 dit nader uitgewerkt voor het faalmechanisme 'instabiliteit van de toplaag (door golfbelasting)'. Dit is één van de drie hoofdfaalmechanismen van de bekleding naast 'afschuiving' en 'uitspoeling'.

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:

- Er is uitgegaan van gezette steenbekledingen. De ontwikkelde aanpak is ook toepasbaar voor andere typen steenbekledingen, zoals Noorse stenen en met asfalt ingegoten steenbekledingen, maar bij de inhoudelijke uitwerking is hiermee niet expliciet rekening gehouden.
- De gezette steenbekleding is steeds opgedeeld gedacht in een toplaag, een filterlaag en een kleilaag. De eventuele aanwezigheid van geotextielen, vlijlagen en dergelijke is derhalve niet expliciet meegenomen, maar dit vormt geen principiële beperking van de methode.
- 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 in overleg met vertegenwoordigers van de opdrachtgever, en enkele andere direct betrokkenen, deze grens voorlopig arbitrair vastgesteld op 1,5 meter (dikte onderlaag). Uiteraard kan deze grens worden herzien wanneer nadere inzichten daartoe aanleiding geven.
- Conform [Haskoning 2003] worden er drie faalmechanismen voor steenbekledingen onderscheiden: toplaaginstabiliteit, uitspoeling filtermateriaal en afschuiving. De kapstok is primair opgezet en uitgewerkt voor het faalmechanisme toplaaginstabiliteit.
- Het bezwijken van de steenbekleding door andere oorzaken, 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.
- Omdat er volgens de huidige inzichten ook geen aanwijzingen zijn voor het ontstaan van deze mechanismen ten gevolge van het gedeeltelijk falen van de steenbekleding, valt ook dat buiten het kader van dit onderzoek.
- 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 direct 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 ook dan nog best klein genoeg zijn.

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 doel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een eerste opzet van een probabilistische kapstok voor steenbekledingen. De kapstok dient de vorm te krijgen van een probabilistisch rekensheet (in Excel), waarmee volgens een gebeurtenissenboomstructuur de opeenvolgende situaties kunnen worden doorgerekend tot een globale faalkans van de bekleding (de kans op een gat in de bekleding tot op de kern van de dijk). Hiermee wordt concreet het volgende bereikt:

- a) Er wordt inzichtelijk gemaakt op welke wijze kennis uit lopend onderzoek in rekening kan worden gebracht, ook in kwantitatieve zin, en daarmee wat het (relatieve) belang is van deze kennis;
- b) De interacties tussen deelonderzoeken worden inzichtelijk gemaakt en daarmee bediscussieerbaar, zodat onderlinge afstemming kan plaatsvinden;
- c) De discussie over normstelling kan zakelijker worden gevoerd;
- d) Er wordt een aanzet gegeven aan de ontwikkeling van een geavanceerde toetsmethode, waarmee ook tussentijds mogelijk al concrete resultaten kunnen worden geboekt;
- e) De mogelijkheden van meer gedetailleerde en specifieke probabilistische rekenmodellen (zoals bedoeld in deelonderzoek 5) kunnen worden afgetast.

## 2.3 Probleemanalyse

Om de toetsing van steenbekledingen te optimaliseren, vindt de komende tijd veel onderzoek plaats. De resultaten van dit onderzoek kunnen echter binnen de huidige toetsmethode, zoals beschreven in het Technisch Rapport Steenzettingen [Haskoning 2003], waarschijnlijk niet zondermeer ten volle worden benut. De oorzaak hiervan is dat deze methode gebaseerd is op een deterministische benadering. In een deterministische benadering worden de verschillende onzekerheden afgedekt door even zovele veilige, conservatieve benaderingen. De totale veiligheid is derhalve het resultaat van een optelling van al die veiligheden, welke naar verwachting voldoende is, maar welke op zijn minst matig inzichtelijk is en daardoor moeilijk gericht valt aan te scherpen. Dit gegeven vormt een beperking voor de optimalisatie van de deterministische toetsmethode op basis van uitgevoerd onderzoek.

Al met al ontbreekt het dus aan een geavanceerde toetsmethode, waarin de afzonderlijke onderdelen van het faalproces van steenbekledingen, alsmede de daaraan gerelateerde onzekerheden, op een inzichtelijke wijze kwalitatief en kwantitatief met elkaar in verband zijn gebracht.

## 2.4 Plan van aanpak

Gezien het doel en de complexiteit van de materie wordt gekozen voor een cyclische aanpak ('groeimodel'), waarbij regelmatig:

- teruggekoppeld/afgestemd moet worden met de deskundigen/onderzoekers,
- de bruikbaarheid van rekenmethode en onderzoeksresultaten wordt getoetst door deze toe te passen op een set referentiecasses.

Onderscheiden worden derhalve twee stappen. In de eerste stap wordt een eerste opzet van de probabilistische kapstok opgesteld. Daarna wordt in de vervolgstap deze kapstok op bruikbaarheid

beoordeeld en getest, en door middel van periodieke afstemming met bevindingen uit de diverse andere deelonderzoeken doorontwikkeld tot een breed en praktisch toepasbare rekenmethode.

Onderhavig onderzoek heeft betrekking op de eerste stap. Aan het eind van dit rapport, in het laatste hoofdstuk (hoofdstuk 4), wordt een doorkijk gegeven naar de vervolgstap.

Het hier beschreven onderzoek om te komen tot de eerste opzet van de probabilistische kapstok omvat de volgende drie onderdelen, namelijk:

- a) Inventarisatie van beschikbare relevante informatie  
Een inventarisatie wordt gemaakt van reeds beschikbare en relevante informatie uit eerdere probabilistische studies van steenbekledingen. Dit is beschreven in paragraaf 3.1.
- b) Decompositie van het faalproces en opzetten hoofdstructuur  
Met inachtneming van reeds beschikbare informatie zal een 'kapstok' worden opgesteld, uitgaande van een bekleding van gezette steen. Dit is beschreven in paragraaf 3.2.
- c) Implementatie van kapstok in rekensheet  
De 'probabilistische kapstok' wordt in de vorm van een rekensheet gegoten. Dit rekensheet is aan de hand van een fictief voorbeeld toegelicht in bijlage 2.

### 3. ONDERZOEKSRESULTATEN

#### 3.1 Inventarisatie van beschikbare relevante informatie

##### 3.1.1 Huidige (deterministische) toetsmethode

De huidige methode voor het toetsen van steenbekledingen [Haskoning 2003] volgt een deterministische aanpak. Dit betekent dat op basis van vaste (veilige) waarden voor alle relevante parameters stapsgewijs de toetsing wordt doorlopen. In grote lijn worden drie faalmechanismen onderscheiden:

- toplaaginstabiliteit;
- afschuiving;
- materiaaltransport.

De opzet van de probabilistische kapstok in dit onderzoek is gericht is op het mechanisme toplaaginstabiliteit. De huidige deterministische toetsmethode voor dit mechanisme komt in het kort neer op de hieronder beschreven benadering.

Eerst wordt de toplaag beschouwd. Deze wordt (uitgaande van de gedetailleerde toets) als voldoende stabiel beoordeeld als bij de maatgevende omstandigheden voldaan wordt aan drie deterministisch geformuleerde criteria:

- geen beweging bij golf ter grootte van  $H_s$ ;
- beweging van maximaal 10% van de steendikte bij golf ter grootte van  $H_{2\%}$ ;
- er wordt voldaan aan de algemene stabiliteitsgrens (6-ksi regel).

Met voldoen aan alledrie deze criteria wordt verondersteld dat de toplaag, en daarmee de bekleding, de maatgevende belasting met voldoende veiligheid kan weerstaan. Wordt niet voldaan aan alledrie deze criteria, dan kan niet met voldoende zekerheid worden uitgesloten dat er stenen uit de toplaag zullen wegspoelen. Er wordt dan van uitgegaan dat dit wel gebeurt, en ook dat dit instantaan gebeurt, bij aanvang van de hydraulische belasting. Er kan dan aanvullend worden bekeken of er sprake is van voldoende reststerkte van filterlaag en kleilaag.

De reststerkte van filterlaag en kleilaag wordt uitgedrukt als een tijdsduur. Het model voor reststerkte van de filterlaag is opgesteld op grond van schaarse informatie uit modelproeven en wordt gezien als conservatief. Er kan alleen reststerkte worden toegekend aan de filterlaag als aan bepaalde voorwaarden voor de inklemming (niet teveel losse elementen), laagdikte van het filter en golfbelasting wordt voldaan. Op basis van het model kan een veilige schatting worden gemaakt van de tijd die nodig is om via uitspoeling van filtermateriaal door een gat in de toplaag tot zodanige ondermijning van de toplaag te komen dat deze grootschaliger faalt (dit wordt op grond van onderzoek verondersteld op te treden bij een ondermijning met een diameter van ca. 3 meter).

Na falen van de filterlaag, en dus het ontstaan van een groter gat in de toplaag, resteert nog de kleilaag. Ook aan de kleilaag kan reststerkte worden toegekend in de vorm van een veilige schatting van een tijdsduur, in dit geval de tijdsduur benodigd voor erosie van de kleilaag. Deze reststerkte is afhankelijk van met name de erosiebestendigheid van de klei, de dikte van de kleilaag en de hoogte van de golven. Het reststerktemodel voor klei is gebaseerd op proeven met een onbeschermd, kale kleilaag en wordt gezien als conservatief.

Indien de totale reststerkte van filterlaag en kleilaag groter blijkt dan de duur van de belasting, dan kan de sterkte van de bekleding onder de maatgevende golfbelasting alsnog als voldoende worden beoordeeld.

Een gebrek aan kennis over de opbouw en kwaliteit van de (bekleding van de) dijk onder de toplaag kan overigens nog wel een hindernis vormen voor het in rekening brengen van de reststerkte. Zo is bijvoorbeeld de werkelijk aanwezige dikte en kwaliteit van een kleilaag niet per definitie overal in

overeenstemming met hetgeen is aangegeven in het bestek. In de uitvoering kan immers bewust of onbewust van het bestek zijn afgeweken zonder dat dit is vastgelegd, en de kwaliteit van klei kan door structuurvorming met verloop van tijd achteruit zijn gegaan.

Het vertrouwen in de aanwezige bekleding is deels een kwestie van beschikbare praktijkkennis over de vroegere uitvoering, aangevuld met de beheerervaring met de bekleding. Dit vertrouwen zou door middel van inspectie vergroot kunnen worden, ware het niet dat inspectie van alles wat zich onder de toplaag bevindt een erg lastige zaak is.

Een objectieve aanpak voor het vaststellen en in rekening brengen van de mate van vertrouwen in de aanwezige bekleding onder de toplaag is niet voorhanden. Dit vormt met name in de deterministische benadering een beperking van de toepasbaarheid van reststerkte, maar zal ook met toepassing van een probabilistische benadering nog niet zondermeer opgelost zijn. In verband met deze problematiek is opgemerkt dat de inspanning in nader fysisch onderzoek naar reststerkte in evenwicht zou moeten zijn met de inspanning in onderzoek naar de praktische aantoonbaarheid van samenstelling en kwaliteit van onderlagen.

### 3.1.2 Probabilistische toetsmethode

In [Rijkswaterstaat 2001] is een probabilistische beoordelingsmethode toegepast op de bekleding van een tweetal vakken langs de Westerschelde. Deze vakken waren in de toetsing als 'onvoldoende' beoordeeld.

Bij de probabilistische beoordeling is primair de stabiliteit van de toplaag beschouwd, waarbij is uitgegaan van een bestaande formulering voor de beoordeling van de stabiliteit van toplaagelementen. In plaats van deterministische (reken)waarden voor de diverse relevante parameters zijn in dit geval echter stochasten hiervoor ingevuld, gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde en een standaardafwijking. Op basis hiervan is de kans op instabiliteit van de toplaag (uitlichten van toplaagelement) berekend. De toplaag van alle beschouwde bekledingen bleek aan het probabilistisch geformuleerde stabiliteitscriterium van eenhonderdste van de norm te voldoen, al was dit in één van de gevallen maar net aan.

Naast de kans op instabiliteit van de toplaag is aanvullend ook de kans op onvoldoende reststerkte van een onderliggende kleilaag berekend. Deze bleek in de beschouwde situaties relatief groot, hetgeen mede werd veroorzaakt door de relatief grote golfhoogten ter plaatse en onzekerheid over aanwezigheid en kwaliteit van de kleilaag.

Hoewel de gevolgde aanpak een waardevolle demonstratie geeft van de mogelijkheden van de probabilistische benadering zijn er toch ook enkele praktische tekortkomingen en beperkingen te noemen. Dit betreft met name het volgende:

- Onzekerheden die niet op basis van (statistisch) onderzoek gekarakteriseerd kunnen worden moeten ingeschat worden op basis van 'engineering judgement'. Dit roept altijd weer de vraag op in hoeverre men bij een werkelijke toetsing wil vertrouwen op soms moeilijk grijpbare inschattingen van de waarde van stochastische parameters.
- De berekende instabiliteitskans van de individuele steen in de toplaag wordt geïnterpreteerd als de instabiliteitskans van de toplaag van het vak. Daarbij wordt niet expliciet rekening gehouden met het aantal stenen in het vak, welke vele tienduizenden of honderduizenden stenen kan bedragen. Hoewel aanzienlijke correlatie verondersteld mag worden zal dit waarschijnlijk toch een significante vergroting opleveren van de kans dat er ergens binnen het vak een steen wordt uitgelicht.
- De gevolgde aanpak oogt zeer bewerkelijk en specifiek van toepassing op de beschouwde situatie. Voor grootschaliger toepassing zal het noodzakelijk zijn dat naast inhoudelijke doorontwikkeling van de theorie ook de nodige inspanning wordt gestopt in ontwikkeling van een meer generieke aanpak en in de ontwikkeling van hulpmiddelen voor toepassing ervan.



### 3.1.3 Reststerkte, inklemming en inslibbing

In [GeoDelft 2002] wordt het gehele faaltraject van een dijk beschouwd na het optreden van initiële schade aan de toplaag. Het uitlichten van een steen uit de toplaag wordt gezien als initiële schade. Het doel van deze studie is om zicht te krijgen op de hierna nog aanwezige reststerkte, te schatten in termen van faalkansen.

Hiertoe is een decompositie gemaakt van de te onderscheiden fasen binnen het schadeverloop, vanaf het optreden van de initiële schade aan de toplaag tot en met het optreden van verlaging van de kruin tot onder de waterstand. Aan de hand van gebeurtenissenboom zijn de verschillende situaties die in de opeenvolgende fasen kunnen ontstaan in beeld gebracht en zijn de overgangskansen tussen de verschillende fasen geschat. Op basis hiervan volgt een schatting voor de totale overgangskans tussen optreden van initiële schade aan de toplaag en het daadwerkelijk falen van de waterkering (kruinverlaging tot onder de waterstand). De overgangskans is geschat voor een dijk met een steenzetting op een uitvullaag + geotextiel + kleilaag op zand. Voor de beschouwde dijk wordt dan gevonden:

$$P(\text{onvoldoende reststerkte onderliggende lagen}) = 0,5 \text{ à } 0,0002$$

De bandbreedte tussen onder- en bovengrens van deze schatting is groot, hetgeen duidelijk maakt dat over aanwezige reststerkte op z'n minst grote onzekerheid bestaat, maar ook dat reststerkte mogelijk een significante reducerende invloed heeft op de faalkans van een dijk.

Ook in [Infram 2000] en [WL / Infram 2002] wordt het belang van het kwantificeren van de reststerkte onderschreven. In de eerstgenoemde referentie is dit mede sterk praktisch onderbouwd door te verwijzen naar een overzicht van in het verleden opgetreden en gemelde schades aan bekledingen, welke echter geen van alle hebben geleid tot bezwijken van de dijk. In de beide rapportages worden aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek gericht op het beter in kaart brengen van reststerkte.

In [Fugro 2003] wordt gesteld, dat zonder versoepeling van het huidige faalcriterium (uitlichten van één steen staat gelijk falen van de dijk) er weinig ruimte is voor optimalisatie van de toetsregels. Het huidige faalcriterium kan alleen worden versoepeld als reststerkte in een zekere mate in rekening mag worden gebracht. Reeds bij een kleine versoepeling van het genoemde faalcriterium in deze richting kunnen bijvoorbeeld klemkrachten tussen de stenen worden meegerekend, omdat dan eventueel incidenteel voorkomende losse blokken in de bekleding niet meer per definitie 'fataal' zijn. Deze versoepeling kan tot een aanzienlijke optimalisatie van de toetsing leiden.

In [Rijkswaterstaat 2003] is aan de hand van een vragenlijst een inventarisatie gemaakt van het voorkomen van dichtgeslibde bekledingen, en is tevens de mening van beheerders gepeild inzake de verwachte invloed hiervan op de stabiliteit van de toplaag. Uit de resultaten blijken (plaatselijk) dichtgeslibde bekledingen vrij veel voor te komen. Over het antwoord op de vraag of dit al dan niet in positieve zin bijdraagt aan de stabiliteit van de bekleding en of dit dan wel mag worden meegerekend bij de beoordeling van de stabiliteit blijken de meningen echter sterk verdeeld. Dit hangt samen met enkele grote onzekerheden zoals over omvang en diepte van de inslibbing, de vraag of het positieve effect op de klemkracht wel groter is dan het negatieve effect op drukverschillen over de toplaag, en de vraag of onder maatgevende omstandigheden de bekleding niet weer schoonspoelt.

### 3.1.4 Conclusies inventarisatie

De stabiliteit van de toplaag van steenbekledingen is met aanzienlijke onzekerheid omgeven. Deze onzekerheid wordt veroorzaakt door onder andere onzekerheid over aanwezige klemkrachten en onzekerheid over het effect van dichtslibbing, naast vele andere onzekerheden die een rol spelen. Ook de aanwezige reststerkte van de waterkering na het ontstaan van initiële schade aan de toplaag is met grote onzekerheid omgeven.

In de bestaande toetsmethoden worden de verschillende onderkende onzekerheden afgedekt door veilige, soms zeer veilige benaderingen te volgen. Zo wordt bijvoorbeeld de aanwezigheid van reststerkte, bij gebrek aan zekerheid hierover, vaak geheel verwaarloosd.

Het breed gedragen vermoeden bestaat dat de totale veiligheid, welke de resultante is van een opeenstapeling van alle afzonderlijke veilige benaderingen, in sommige gevallen wel eens significant groter zou kunnen zijn dan strikt genomen nodig is. Dit betekent dat er ruimte is voor optimalisatie van de toetsregels. Een dergelijke optimalisatie kan worden gerealiseerd door enerzijds aanwezige onzekerheden te verkleinen door middel van gericht onderzoek. De regels voor de afzonderlijke veilige benaderingen kunnen dan immers mogelijk worden aangescherpt. Anderzijds kan geoptimaliseerd worden door het vergroten van het inzicht in het gecombineerde effect van alle onzekerheden en daarop toegepaste onzekerheidsafdekkingen op de totale veiligheid. Met oog op dit laatste is het wenselijk te beschikken over een probabilistisch model aan de hand waarvan dit inzicht kan worden verkregen.

Overigens is het aanbevelenswaardig de beide invalshoeken voor optimalisatie tegelijkertijd invulling te geven. Er wordt dan wordt immers zicht gekregen op de meest belangrijke onzekerheden en onzekerheidsafdekkingen binnen het gehele stelsel, terwijl tevens de resultaten van het uitgevoerde onderzoek gericht op verkleining van die onzekerheden en onzekerheidsafdekkingen zo goed mogelijk kunnen worden benut.

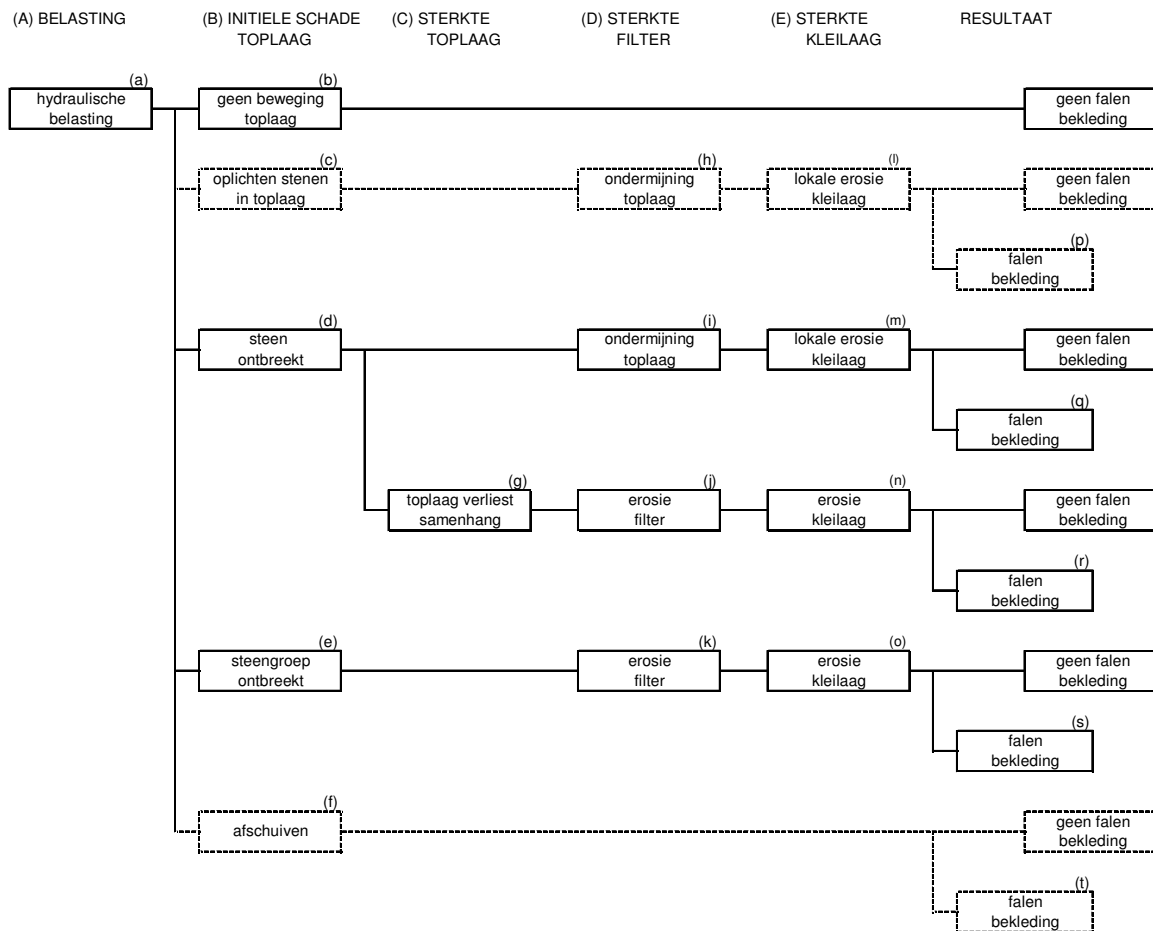
Tot slot wordt opgemerkt dat in voorgaande met optimalisatie steeds de aanscherping van de toetsregels voor de veiligheidsbeoordeling is bedoeld. Los van de veiligheidsvraag is er nog de mogelijkheid dat beheertechnische overwegingen en criteria kunnen leiden tot andere beslissingen. Zo kan voor een bestaande constructie, die wel voldoet aan de veiligheidsnorm, toch besloten worden om de constructie te vervangen, bijvoorbeeld vanwege te grote onderhoudskosten. Veiligheid en beheer vormen derhalve twee aparte beoordelingsporen met elk hun eigen criteria, met dien verstande dat veiligheid een eis is, maar als daar aan voldaan wordt er nog andere besliscriteria kunnen zijn die te maken hebben met de integrale beheerscyclus.

## **3.2 Probabilistische kapstok**

### **3.2.1 Gebeurtenissenboom**

De mogelijke situaties waarin de bekleding terecht kan komen wanneer deze onderhevig is aan een zekere (golf)belasting, zijn met behulp van een gebeurtenissenboom in beeld te brengen. Het faalproces van een steenbekleding is hierin op te delen in een aantal elkaar opvolgende gebeurtenissen. Het falen van de bekleding is gedefinieerd als het ontstaan van een gat in de bekleding tot op de kern van de dijk, en daarmee het begin van erosie van de kern van de dijk.

In figuur 1 is de gebeurtenissenboom voor de bekleding weergegeven. Hierin worden vier takken onderscheiden die kunnen leiden tot het falen van de bekleding, uitgaande van een bekleding bestaande uit een zetsteenlaag op een filterlaag met daar weer onder een kleilaag. Deze takken corresponderen met de eerder onderscheiden faalmechanismen: uitspoeling filtermateriaal (tak via blokje (c) 'oplichten stenen in toplaag'), toplaaginstabiliteit (tak via blokjes (d) 'steen ontbreekt' en (e) 'steengroep ontbreekt') en afschuiving (tak via blokje (f) 'afschuiving'). Omdat in deze studie alleen toplaaginstabiliteit nader is beschouwd, zijn de takken via (c) en (f) gestippeld weergegeven. De gebeurtenissenboom vormt de basis voor de probabilistische kapstok, welke feitelijk niet meer is dan de gebeurtenissenboom opgetuigd met een probabilistische rekenaanpak voor de berekening van kansen op de verschillende gebeurtenissen.



Figuur 1: Gebeurtenissenboom voor bekleding onder golfbelasting

Als uitkomst van het doorlopen van de gebeurtenissenboom worden twee mogelijke resultaten onderscheiden, te weten 'falen bekleding' en 'geen falen bekleding'. Hierbij is met falen bedoeld het niet meer afdoende functioneren van de bekleding als beschermingslaag van de dijk tegen erosie door stroming en golven. Er wordt daarmee een oordeel gegeven uit oogpunt van veiligheid. Zoals al eerder gesteld moet dit los worden gezien van de beheertechnische beoordeling. Uit oogpunt van veiligheid is immers in sommige gevallen een aanzienlijke schade mogelijk nog best acceptabel, zolang het functioneren van de dijk als bescherming tegen overstroming maar niet in gevaar komt.

De probabilistische kapstok, welke gebaseerd is op deze gebeurtenissenboom, is weergegeven in bijlage 2. Deze is daar tevens aan de hand van een fictief getallenvoorbeeld uitvoerig nader toegelicht.

### 3.2.2 Principe faalkansberekening

Met de probabilistische kapstok wordt de kans berekend op falen van de bekleding gegeven het optreden van een zekere storm met daarbij behorende waterstand en golfbelasting. Het principe van deze faalkansberekening komt neer op het volgende:

De golfbelasting (A) wordt gekarakteriseerd door een significante golfhoogte  $H_s$ , een piekperiode  $T_p$  en een hoek van inval  $\beta$ . De duur van de storm  $t_{sm}$  wordt opgevat als stochast.

Met de gegeven waarden van de belastingparameters, en met gegeven opbouw van de bekleding, wordt vervolgens de kans  $P_{init}$  berekend op het optreden van initiële schade aan de toplaag (B).

Vervolgens wordt, gegeven het opgetreden zijn van initiële schade, en met de gegeven waarden van de belastingparameters  $H_s$ ,  $T_p$  en  $\beta$ , en met gegeven opbouw van de bekleding, de duur berekend dat achtereenvolgens de toplaag (C), het filter (D) en de onderliggende kleilaag (E) blijven functioneren. Ook deze duren (veelal reststerkten genoemd),  $t_{rt}$  voor de toplaag,  $t_{rf}$  voor het filter en  $t_{rk}$  voor de kleilaag, worden opgevat als stochasten.

De kans op falen van de bekleding wordt dan tenslotte berekend als het product van de kans op initiële schade en de kans op een reststerkte gegeven initiële schade kleiner dan de stormduur, in formulevorm:

$$P_f = P_{init} \times P((t_{rb} | init) < t_{sm})$$

met

$P_f$  = kans op falen van de bekleding

$P_{init}$  = kans op initiële schade

$P((t_{rb} | init) < t_{sm})$  = kans op reststerkte van de bekleding (gegeven initiële schade) kleiner dan de stormduur (waarin  $t_{rb} = t_{rt} + t_{rf} + t_{rk}$ )

In de gebeurtenissenboom in figuur 1 is er onderscheid gemaakt tussen vijf verschillende manieren waarop de bekleding kan falen. De vijf daarmee samenhangende faalbijdragen ((p), (q), (r), (s) en (t)) dienen apart te worden berekend volgens het hiervoor beschreven principe, en tenslotte te worden opgeteld om tot de totale faalkansschatting van de bekleding te komen. In de volgende paragraaf is een nadere toelichting gegeven op het onderscheid tussen de verschillende faalpaden.

### 3.2.3 Nadere toelichting per hoofdgebeurtenis

Boven de gebeurtenissenboom zijn met de letters A t/m E een vijftal hoofdgebeurtenissen onderscheiden:

#### A: BELASTING

De optredende belasting (zie blokje (a)) wordt geleverd door een stormpiek (met zekere kans van voorkomen) met zekere duur. Binnen deze stormpiek is er sprake van een belasting bestaande uit golven met significante golfhoogte en piekperiode komende uit een zekere richting, in combinatie met een zeker verloop van de buitenwaterstand. Omdat bij gegeven waterstand de golfbelasting op slechts een deel van het buitentalud werkt, zal de belastingduur langs het talud variëren afhankelijk van het veronderstelde waterstandsverloop, en aan de bovenzijde begrenst zijn door de duur van de stormpiek. Noodzakelijk uitgangspunt daarvoor is uiteraard wel dat bij aanvang van de stormpiek de bekleding nog schadevrij is, en dus dat eventuele schade van een eerdere storm altijd volledig hersteld is.

#### B: INITIËLE SCHADE TOPLAAG

De initiële schade aan de toplaag kan meerdere verschijningsvormen hebben. Onderscheid wordt gemaakt tussen verplaatsing van blokken in de toplaag in de richting loodrecht op het talud zonder dat ze er geheel uit verdwijnen (in de boom: 'oplichten stenen in toplaag', zie blokje (c)), het verdwijnen van een individuele steen uit de toplaag (in de boom: 'steen ontbreekt', zie blokje (d)), het in één keer verdwijnen van een samenhangende groep stenen uit de toplaag (in de boom: 'steengroep ontbreekt', zie blokje (e)) en het optreden van een afschuiving (in de boom: 'afschuiving' zie blokje (f)). Verondersteld wordt dat de kans op de verschillende onderscheiden vormen van initiële schade sterk samenhangt met de geometrie en het type en de opbouw van de bekleding. In geval van bijvoorbeeld bekledingen met een toplaag waarbinnen aanzienlijke klemkrachten heersen, of in geval van

bijvoorbeeld met asfalt ingegoten steenbekledingen, is het niet onwaarschijnlijk dat direct een samenhangende groep stenen uit de toplaag verdwijnt, waarmee in één keer een groter gat (orde vierkante meters) ontstaat. In dit geval is er direct sprake van grootschaliger falen van de toplaag, en wordt deze verondersteld geen (rest)sterkte meer te hebben (in één keer door van blokje (e) naar (k)).

#### C: STERKTE TOPLAAG

Uit de toplaag waaruit een enkele steen is verdwenen zullen bij toenemende belastingduur geleidelijk aan steeds meer stenen verdwijnen (de kans op falen van de toplaag is naast grootte van de sterkte en de belasting immers ook afhankelijk van de duur van de belasting). Er kunnen nu binnen de duur van de stormpiek twee dingen gebeuren. De eerste mogelijkheid is dat gedurende de stormpiek de toplaag zijn samenhang behoudt. De toplaag komt in dat geval niet in een significant ernstiger faalmode terecht dan al door het falen van de eerste steen is ontstaan. Verergering van de toestand van de bekleding is dan alleen mogelijk door ondermijning van de toplaag door uitspoeling van filtermateriaal door de kleine gaten in de toplaag (vanaf blokje (d) direct door naar blokje (i)). De tweede mogelijkheid is dat de toplaag gedurende de stormpiek dermate veel stenen verliest dat de samenhang plaatselijk verloren gaat, en er grotere gaten (orde vierkante meters) ontstaan ((blokje (g)).

#### D: STERKTE FILTER

De sterkte van de filterlaag is afhankelijk van de toestand van de toplaag. Indien er geen stenen uit de toplaag verdwijnen, maar er alleen stenen worden opgelicht, kan dit inleiding vormen tot het optreden van migratie van filtermateriaal. Dit kan leiden tot uiteindelijk alsnog verdergaand falen van de toplaag (blokje (h)). Indien er sprake is van het verdwijnen van stenen uit de toplaag, maar deze schade beperkt is gebleven tot gaten ter grootte van een individuele steen, dan zal het filter alleen kunnen falen als gevolg van doorgaande uitspoeling van filtermateriaal onder de toplaag vandaan en afvoer door deze gaten. Dit kan op den duur leiden tot een zodanige ondermijning van de toplaag dat deze lokaal zijn samenhang verliest en een groter gat (orde vierkante meters) hierin ontstaat (blokje (i)). Hierna zal dan met zeer grote waarschijnlijkheid heel snel de onderliggende kleilaag aan de golfbelasting wordt blootgesteld. In het geval reeds grotere gaten in de toplaag waren ontstaan zal het filter geen noemenswaardige reststerkte hebben (blokjes (j) en (k)). De golven hebben dan immers direct vat op het filtermateriaal, en dit kan heel gemakkelijk uit het grote gat worden weggespoeld. Daarna zal de onderliggende kleilaag aan de golfbelasting worden blootgesteld.

#### E: STERKTE KLEILAAG

Nadat een groter gat in de toplaag is ontstaan zal de onderliggende kleilaag veel zwaarder door de golven worden aangevallen. Voor wat betreft de reststerkte van de kleilaag wordt onderscheid gemaakt tussen de situatie dat de toplaag weliswaar zijn samenhang lokaal heeft verloren, maar de stenen er waarschijnlijk nog wel grotendeels liggen (blokjes (l) en (m)) en de situatie dat de toplaag plaatselijk geheel is weggespoeld (blokjes (n) en (o)).

Nadat ook de kleilaag lokaal zijn sterkte heeft verloren zal de kern van de dijk aan golfaanval bloot komen te staan. Verondersteld wordt dat in dat geval de dijk is gefaald (wat natuurlijk niet per definitie het geval hoeft te zijn, zeker niet indien deze geheel of gedeeltelijk uit klei bestaat). De topgebeurtenis, het falen van de dijk, kan in de boom op vijf manieren worden bereikt (blokjes (p), (q), (r), (s) en (t)).

### 3.2.4 Onderliggende probabilistische rekenmodellen

Met de probabilistische kapstok kan de gebeurtenissenboom op 'probabilistische wijze' worden doorgerekend tot een kans op falen van de bekleding. Hiertoe zijn alle onderscheiden gebeurtenissen samenhangend met toplaaginstabiliteit (de takken via de blokjes (d) en (e)) voorzien van een probabilistisch rekenmodel, waarbij meteen wordt opgemerkt dat deze probabilistische rekenmodellen op dit moment alle nog zeer eenvoudig van opzet zijn en niet geverifieerd zijn. Dit is echter ook niet de bedoeling geweest van dit onderzoek, dat er met name op gericht is om een hoofdstructuur voor probabilistische aanpak op te zetten.

Een eerste ruwe beschrijving van de onderliggende probabilistische rekenmodellen van de probabilistische kapstok maakt deel uit van de toelichting in bijlage 2, waarbij wordt opgemerkt dat deze rekenmodellen dus vooral tot doel hebben gehad de berekeningsaanpak uit te proberen.

### 3.2.5 Probabilistisch toetscriterium

Het probabilistische toetscriterium kan worden geformuleerd als een toelaatbare kans op falen van de waterkering door instabiliteit van de steenzetting. Voor de waarde van deze toelaatbare kans moet gedacht worden aan 0,01 à 0,1 x norm. In bijvoorbeeld [Rijkswaterstaat 2001] is 0,01 x norm als criterium gehanteerd.

Deze wijze waarop dit toetscriterium geformuleerd is houdt in dat de frequentieverdeling van extreme belastingen erin verdisconteerd is gedacht. Om echter de probabilistische benadering niet op voorhand al te gecompliceerd te maken, wordt er van uitgegaan dat aan dit criterium wordt voldaan indien bij de 'normbelasting' een kans op falen wordt bepaald die kleiner is dan 0,01 à 0,1. Deze vereenvoudiging kan in een later stadium altijd nog worden geverifieerd en desnoods herzien.

### 3.3 Relatie met overige deelonderzoeken

In de probabilistische kapstok kunnen de resultaten van veel van de in [Fugro 2003] beschreven deelonderzoeken worden geïmplementeerd. In tabel 1 is een overzicht gegeven van de onderscheiden deelonderzoeken. Daarna is per deelonderzoek kort aangegeven welke mogelijkheden een probabilistische aanpak biedt voor het benutten van de resultaten van deze deelonderzoeken.

Tabel 1: Overzicht van deelonderzoeken steenbekledingen

deelonderzoek
1. Herbeschouwing huidige toetscriteria
2. Bureaustudie afschuiving
3. Bureaustudie scheve golfval
4. Onderzoek reststerkte
5. Toepassing probabilistische rekenmethode
6. Studie naar bewezen sterkte
7.1 Invloed van lange golfperiode op stabiliteit
7.2 Stabiliteit van basalt
7.3 Invloed van klemkracht op stabiliteit
7.4 Invloed van golfklappen op stabiliteit
7.5 Invloed van dichtslibbing
8.1 Ontwikkeling Zsteen
8.2 Golfdrukken bepalen met Skylla
9. Onderzoek naar met asfalt ingegoten steenbekledingen
10. Onderzoek naar Noorse stenen

In bijlage 2, waarin de probabilistische kapstok is weergegeven, is schematisch aangegeven met welk deel van de kapstok de diverse deelonderzoeken een relatie hebben.

AD 1. De **herbeschouwing van de toetscriteria** zit eigenlijk al verwerkt in het idee van het maken van een probabilistische kapstok. In de probabilistische kapstok wordt expliciet gerekend met onzekerheden, en wordt het resultaat van een beoordeling uitgedrukt in kansstermen. Herbeschouwing van de toetscriteria biedt de opening voor mogelijk gebruik van een op dergelijke wijze geformuleerd toetsresultaat. Overigens kan een eventueel probabilistisch toetscriterium ook altijd nog weer worden terugvertaald naar een deterministisch geformuleerd criterium.

AD 2. De **bureaustudie naar afschuiving** heeft geen relatie met de probabilistische kapstok, want dit faalmechanisme wordt in de probabilistische kapstok niet beschouwd.

AD 3. De **bureaustudie naar scheve golfval** beoogt een beter inzicht op de stabiliteit van de topplaag onder scheve golfval. Het verkleint dus de onzekerheden op dit punt en kan dus goed binnen de probabilistische kapstok worden verwerkt.

AD 4. De resultaten van een **onderzoek naar reststerkte** kunnen waarschijnlijk met een probabilistische aanpak optimaal worden benut, omdat daarbij expliciet wordt gerekend met onzekerheden. Dit in tegenstelling tot de huidige deterministische toetsmethode waarin de afzonderlijke onzekerheden verondersteld worden voldoende te zijn afgedekt door een samenstel van veilige benaderingen, zonder dat inzicht wordt verkregen op de daarmee uiteindelijk gerealiseerde totale veiligheid. De probabilistische aanpak levert dit inzicht dus wel. Ook dan blijft het echter nog wel de vraag of het toekennen van reststerkte aan onderliggende lagen daadwerkelijk wat oplevert.

AD 5. Onderzoek naar **toepassing van probabilistische rekenmethoden** omvat de ontwikkeling van de probabilistische kapstok.

AD 6. De resultaten van een **studie naar bewezen sterkte** kunnen waarschijnlijk vooral met een probabilistische aanpak worden benut, omdat het gebruik van bewezen sterkte alles te maken heeft met het verkleinen van onzekerheden op grond van het overleven van een vergelijkbare of zelfs zwaardere belastingsituatie, en het introduceren van nieuwe onzekerheden in verband met vergelijkbaarheid van een overleefde situatie met de toetsituatie.

AD 7.1 en 7.2 Voor de **invloed van lange golfperiode** en de **stabiliteit van basalt** geldt hetzelfde als is aangegeven in de toelichting bij scheve golfval: de deelonderzoeken verbeteren het inzicht in de topplaagstabiliteit, en verkleinen zodoende onzekerheden, maar kunnen nog wel tot andere en mogelijk ongunstiger inzichten leiden.

AD 7.3 De **invloed van de klemkracht op de stabiliteit** kan in de huidige toetsmethode moeilijk worden meegenomen, omdat de aanwezigheid van een enkele losse steen niet kan worden uitgesloten. Wanneer de kansverdeling van de klemkracht, en daarmee de kans op het op een zeker moment ontbreken van één of meerdere stenen, in samenhang met de in dat geval nog aanwezige reststerkte in de toetsing kan worden meegenomen, dan kan de toetsing mogelijk aanzienlijk worden geoptimaliseerd.

AD 7.4 Onderzoek naar de **invloed van golfklappen op de stabiliteit** leidt mogelijk tot een benodigde aanscherping van de toetsregels op dit punt. Dit is onafhankelijk van de keuze of de huidige deterministische toetsmethode of een probabilistische aanpak wordt gevolgd.

AD 7.5 De **invloed van dichtslibbing** kan zowel positief zijn vanwege het vergrotende effect op de klemkracht, als negatief zijn doordat er hogere drukverschillen worden ontwikkeld over de topplaag. In de huidige deterministische toetsmethode wordt het effect van dichtslibbing niet meegenomen, onder meer vanwege een nog te gebrekkig fysisch inzicht in het effect hiervan op de stabiliteit van de bekleding, alsmede omdat in de praktijk de mate van dichtslibbing moeilijk is vast te stellen, deze over de hoogte van het talud nogal kan variëren, en mogelijk onder maatgevende omstandigheden niet meer aanwezig is omdat de bekleding dan weer wordt schoongespoeld. Gemakshalve wordt derhalve aangenomen dat als er sprake is van dichtslibbing, dat dan de positieve en negatieve effecten ongeveer tegen elkaar opwegen. Nader onderzoek naar de fysica zal zicht moeten geven op het netto effect van dichtslibbing. Met de probabilistische kapstok kan wellicht efficiënter met de grote onzekerheden die met deze problematiek samenhangen worden omgegaan dan bij de deterministische benadering het geval is.

AD 8.1 De **ontwikkeling van ZSteen** heeft een algemene meerwaarde in de vorm van het beter inzichtelijk maken van de golf-toplaaginteractie. Specifiek voor de probabilistische kapstok kan het numerieke model worden ingezet om meer zicht te krijgen op de kans op een schade van een zekere omvang.

AD 8.2 Het **bepalen van golfdrukken met Skylla** kan onder meer een nuttige basis vormen voor de doorontwikkeling van ZSteen, en kan mogelijk leiden tot zowel optimalisatie binnen de huidige deterministische toetsmethode als binnen de probabilistische kapstok.

AD 9. en 10. Onderzoek naar **met asfalt ingegoten steenbekledingen** en **Noorse stenen** kan nog veel opleveren, omdat de toetsmethodiek hiervoor nog niet ver ontwikkeld is. De mogelijke winst valt echter voorlopig nog even buiten het kader van de probabilistische kapstok. Het ligt echter in de verwachting dat op termijn ook voor deze bekledingstypen de probabilistische kapstok zonder al te grote ingrepen kan worden toegesneden.



#### 4. AANBEVELINGEN MET BETREKKING TOT DE VERVOLGSTAP

In dit rapport is een eerste opzet van een probabilistische kapstok voor de beoordeling van steenbekledingen beschreven. In een vervolg hierop zal eerst moeten worden beoordeeld of deze opzet qua benadering van de problematiek inhoudelijk juist is en een bruikbare structuur kan bieden voor inpassing van de resultaten van de diverse deelonderzoeken. Daarbij zou ook beoordeeld moeten worden of deze eerste opzet voldoende aanknopingspunten biedt voor eventuele doorontwikkeling tot geavanceerd probabilistisch toetsinstrument. Deze beoordelingen zullen in nauw overleg met de onderzoekers moeten worden gemaakt.

Indien voorgaande een positief resultaat oplevert dan kan de vervolgstap worden gezet. Deze stap zal in de loop van het onderzoek enkele malen moeten worden doorlopen. De elementen die hierin steeds zullen terugkeren zijn:

- a) Overleg / interactie met deskundigen over onder andere:
  - inpasbaarheid deelonderzoeken m.b.t. uitgangspunten en mogelijke resultaten;
  - selectie referentiecases;
  - bruikbaarheid voor discussie m.b.t. normstelling;
  - eventuele verfijning van de rekenmethode.
  
- b) Aanpassing en uitbreiding van de methode  
Op grond van het onder a) gevoerde overleg zal de methode (indien nodig) worden aangepast, en worden geactualiseerd met de resultaten van de deelonderzoeken. Hierbij wordt ook gedacht aan uitbreiding richting toepassing op Noorse stenen en gepenetreerde steen.
  
- c) Toepassing op referentiecases  
In eerste instantie wordt gedacht aan gevoeligheidsanalyses, vooruitlopend op mogelijke resultaten van deelonderzoeken. Hiermee ontstaat meer zicht op het relatieve belang van deelonderzoeken, en op de overwegingen die een doorslaggevende rol kunnen spelen in de discussie over normstelling. Daarnaast wordt ook gedacht aan ijking van de probabilistische benadering op de deterministische benadering (de aansluiting van het 'kanscriterium' op het 'deterministisch criterium').

## LITERATUUR

[Fugro 2003]

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

[Haskoning 2003]

Technisch Rapport Steenzettingen, Haskoning, 2003.

[Rijkswaterstaat 2001]

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

[GoeDelft 2002]

Dijkdoorbraakprocessen, 720201/39, GeoDelft, maart 2002.

[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.

[Rijkswaterstaat 2003]

Dichtgeslibde Bekledingen (Memo van de werkgroep Kennis van het Projectbureau Zeeweringen), Y.M. Provoost en J.C.P. Johanson, augustus 2003

[TNO 2003]

Theoriehandleiding PC-RING (versie 3.0), Deel A: Mechanismebeschrijvingen, TNO-rapport 2003-CI-R0020, februari 2003

**BIJLAGE 1**

**ONDERZOEKSPROGRAMMA  
KENNISLEEMTEN STEENBEKLEDINGEN**

## **BIJLAGE 2**

### **PROBABILISTISCHE KAPSTOK**

## TOELICHTING BIJ DE PROBABILISTISCHE KAPSTOK

Hieronder is een toelichting gegeven behorende bij het getallenvoorbeeld. Met nadruk wordt nogmaals de waarschuwing gegeven dat dit getallenvoorbeeld met bijbehorende toelichting als doel heeft het principe van het probabilistische rekenmodel te verduidelijken, en daarmee dient te worden gezien als startpunt voor overleg met de terzake deskundigen/onderzoekers. Het gepresenteerde rekenmodel (inclusief de hierna gepresenteerde onderliggende formules) vormt dus nog geen instrument dat al geschikt is voor algemeen gebruik!

Ten aanzien van de formules die in deze toelichting zijn gepresenteerd wordt voorts opgemerkt dat een deel is ontleend aan de literatuur, maar dat een ander deel speciaal voor deze studie is bedacht om het voorbeeld volledig te kunnen uitwerken. Het moge duidelijk zijn dat deze laatste formules geen of slechts een zeer gebrekkige onderbouwing hebben, en dus niet zondermeer voor andere toepassingen kunnen worden gebruikt. De bedoelde formules zijn in de toelichting met een sterretje (\*) gemarkeerd.

- (a) In blokje (a) zijn de verwachtingswaarde en de karakteristieke onder- en bovengrens van de belastingduur weergegeven. De belastingduur is de totale duur dat het beschouwde deel van de bekleding aan de golfbelasting onderhevig is. Deze duur is maximaal gelijk aan de duur van de storm. Bij weinig variërende waterstand is de belastingduur op een deel van de bekleding gelijk aan de duur van de storm.

Indien het uitgangspunt dat de bekleding bij aanvang van een storm schadevrij is niet gegarandeerd kan worden, dan kan dit eventueel worden opgelost door met gesommeerde stormduren te werken.

De stormduur  $t_{sm}$  wordt gekarakteriseerd door op te geven waarden voor de verwachting  $\mu$ , en en de variatiecoëfficiënt  $V$ . In het getallenvoorbeeld is uitgegaan van  $\mu_{sm} = 8$  uur en  $V = 0,2$ . Daarmee zijn in blokje (a) de karakteristieke onder- en bovengrens van de belastingduur berekend als respectievelijk:

$$\begin{aligned} t_{sm}(5\%) &= \mu_{sm}(1 - uV) = 5,4 \text{ uur} \\ t_{sm}(95\%) &= \mu_{sm}(1 + uV) = 10,6 \text{ uur} \end{aligned}$$

Hierbij is uitgegaan van een normaal verdeelde belastingduur, en de bij de 5%-grens en 95%-grens behorende  $u$ -waarde van 1,64.

De hoogte van de belasting gedurende de stormpiek wordt constant verondersteld en wordt gekarakteriseerd door de significante golfhoogte  $H_s$ , de piekperiode  $T_p$  en hoek van inval  $\beta$ . In het getallenvoorbeeld is uitgegaan van  $H_s = 1,5$  meter,  $T_p = 6$  seconden en  $\beta = 0$  graden.

- (b) Bij gegeven belasting en gegeven bekleding wordt vervolgens berekend welke kans er is op het ontstaan van initiële schade aan de toplaag. Dit gebeurt in de blokjes (c), (d), (e) en (f). De kans op het niet ontstaan van initiële schade wordt simpelweg berekend als 1 verminderd met de kans op initiële schade. In het getallenvoorbeeld zijn de takken via de initiële gebeurtenissen (c) (uitspoelen/migratie filter door oplichten toplaag) en (f) (afschuiven) buiten beschouwing zijn gelaten (de kansen hierop zijn op voorhand 0 gesteld). In dat geval bedraagt de (vereenvoudigde) schatting van de kans op initiële schade:

$$P_{init} = P_{init2} + P_{init3} - P_{init2 \cap init3} \approx 0,634 + 0,010 - 0,006 = 0,638$$

De berekende kans op geen initiële schade bedraagt dan  $1 - 0,638 = 0,362$ .

- (c) De kans op initiële schade aan de bekleding door migratie van filtermateriaal als gevolg van het oplichten van stenen wordt buiten beschouwing gelaten, en om die reden op voorhand 0 gesteld. Voor de kans  $P_{init1}$  wordt derhalve de waarde 0,000 aangehouden.
- (d) Voor de berekening van de kans op initiële schade door het uit de toplaag gedrukt worden van een individuele steen in het vak is een zeer eenvoudig model opgesteld, dat vooral dient om de grote lijn op een praktische wijze weer te kunnen geven. Voor verdere uitwerking van dit model zal input van domeinkennis nodig zijn.

De benodigde invoer betreft in de eerste plaats de volgende parameters:

- $N$  = aantal beschouwde stenen in het vak (hoe groter het aantal stenen, hoe groter de kans dat er ergens in het vak een steen uit de toplaag verdwijnt)
- $\rho_f$  = correlatiefactor voor stabiliteit van stenen in de toplaag (er zal sprake zijn van sterke mate van correlatie, en dit kan met deze factor op zeer eenvoudige wijze in rekening worden gebracht doordat hiermee een equivalent aantal 'onafhankelijke' stenen wordt berekend)

Met deze twee parameters wordt een equivalent aantal onafhankelijke stenen in de toplaag berekend volgens:

$$N_{equiv.} = N^{\rho_f}. (*)$$

In het getallenvoorbeeld is uitgegaan van  $N = 100.000$  en  $\rho_f = 0,4$ . Daarmee volgt dat  $N_{equiv} = 100.000^{0,4} = 100$ .

Vervolgens dienen nog waarden voor de volgende parameters worden opgegeven:

- $P_{init\_min}$  = faalkans van een willekeurige steen wanneer deze precies voldoet aan het deterministisch geformuleerde stabiliteitscriterium
- $\gamma\Delta$  = het overschot of tekort aan veiligheid bij deterministische beoordeling van de stabiliteit van een steen, te interpreteren als  $(D_{aanwezig} / D_{vereist})$ , ofwel aanwezige steendikte gedeeld door minimaal vereiste steendikte
- $d(P)/d(\gamma\Delta)$  = verband tussen verandering van de faalkans van de steen bij verandering van de veiligheidsmarge

Met deze drie parameters wordt de faalkans van een enkele steen in de toplaag berekend volgens:

$$P_{init} = P_{init\_min} \times 10^{(\gamma\Delta-1) \times d(P)/d(\gamma\Delta)} (*)$$

Deze kans wordt aan de bovenzijde begrenst door de waarde 1.

In het getallenvoorbeeld is uitgegaan van  $P_{init\_min} = 0,01$ ,  $\gamma\Delta = 1,0$  en  $d(P)/d(\gamma\Delta) = -10$ . Daarmee volgt dat  $P_{init} = 0,01 \times 10^0 = 0,01$ .

De kans op één of meer falende stenen in de toplaag  $P_{init2}$  is nu tenslotte te berekenen volgens:

$$P_{init2} = 1 - (1 - P_{init})^{N_{equiv.}}$$

Met de bekende gegevens volgt hiervoor  $P_{init2} = 1 - (1 - 0,01)^{100} = 0,634$ .

Tot slot wordt opgemerkt dat de kans op falen van een steen in een gegeven toplaag in de eerste plaats afhankelijk is van de golfbelasting. In een bepaald gebied van golfbelastingen blijkt daarnaast echter ook de duur van de golfbelasting een belangrijke rol te kunnen spelen. In het hier beschreven eenvoudige model voor de berekening van de kans op initiële schade is met dit

laatste niet expliciet rekening gehouden. Er wordt dus geen tijdsafhankelijke kans op initiële schade bepaald. Dit betekent dat de berekende kans op initiële schade veiligheidshalve geïnterpreteerd moet worden als de kans op initiële schade direct aan het begin van de stormpiek.

- (e) Voor de berekening van de kans op initiële schade door het uitgedrukt worden van in één keer uitgedrukt worden van een groep stenen van de toplaag wordt uitgegaan van eenzelfde soort rekenmodel als voor uitdrukken van een enkele steen.

Als er van uit kan worden gegaan dat de veiligheid tegen uitgedrukt worden van een samenhangende groep stenen in dit geval 1,2 bedraagt (dus  $\gamma\Delta = 1,2$ ), maar verder voor alle parameters gelijke waarden gelden als gegeven in de beschrijving onder (d), dan volgt:

$$P_{\text{init}} = P_{\text{init\_min}} \times 10^{(\gamma\Delta-1) \times d(P)/d(\gamma\Delta)} = 0,01 \times 10^{0,2 \times -10} = 0,0001 (*)$$

en daarmee

$$P_{\text{init}3} = 1 - (1 - P_{\text{init}})^{N_{\text{equiv.}}} = 0,010$$

In geval van deze wijze van initieel falen van de toplaag wordt verondersteld dat vervolgens de aangrenzende stenen in de toplaag een verminderde weerstand tegen falen zullen hebben. Gemakshalve wordt aangenomen dat in dat geval er geen sprake meer is van reststerkte van de toplaag, en dat deze dus per definitie 0 uur bedraagt.

- (f) De kans op initiële schade aan de bekleding door afschuiving van een kleiner of groter deel van de bekleding wordt buiten beschouwing gelaten, en om die reden op voorhand 0 gesteld. Voor de kans  $P_{\text{init}4}$  wordt derhalve de waarde 0,000 aangehouden.
- (g) Na het ontstaan van initiële schade aan toplaag in de vorm van het ontbreken van een enkele steen, kan het faalproces van de bekleding een vervolg krijgen doordat met toenemende duur van de belasting er steeds meer stenen uit de toplaag worden weggespoeld. Verondersteld wordt dat dit op een gegeven moment tot de situatie kan leiden dat de samenhang in de toplaag plaatselijk verloren is gegaan.

Voor de berekening van de duur van de storm, benodigd voor het uitspoelen van zoveel toplaagelementen dat de samenhang verloren gaat, is wederom een zeer eenvoudig model opgesteld. Ook dit model is in de eerste plaats bedoeld om de grote lijn op een praktische wijze weer te kunnen geven.

De ondergrensschatting voor de vereiste duur van de storm om tot verlies van samenhang in de toplaag te komen, ook wel te beschouwen als de ondergrensschatting van de 'reststerkte' van de toplaag, wordt berekend volgens:

$$t_{\text{rt(min)}} = f_{\text{p}} / v_{\text{f}} (*)$$

met

$f_{\text{p}}$  = faalcriterium, gedefinieerd als percentage stenen dat lokaal uit de toplaag verdwenen moet zijn om te kunnen spreken van verlies van samenhang van de toplaag [-]

$v_{\text{f}}$  = faalsnelheid van de stenen, gedefinieerd als kans per uur op losraken van een willekeurige steen [1/uur]

Voor de faalsnelheid van de stenen in de toplaag,  $v_{\text{f}}$ , is de volgende uitdrukking bedacht:

$$v_{\text{f}} = 10^{(\gamma\Delta-1) \times d(v_{\text{f}})/d(\gamma\Delta) + \log(v_{\text{f}0})} (*)$$

met

$\gamma\Delta$	= het overschot of tekort aan veiligheid bij deterministische beoordeling van de stabiliteit van een steen, te interpreteren als $(D_{aanwezig} / D_{vereist})$ , ofwel aanwezige steendikte gedeeld door minimaal vereiste steendikte
$d(v_f)/d(\gamma\Delta)$	= verband tussen verandering van de faalsnelheid van de stenen bij verandering van de veiligheidsmarge
$v_{f0}$	= faalsnelheid van de stenen wanneer precies wordt voldaan aan het deterministisch geformuleerde stabiliteitscriterium

In het getallenvoorbeeld is uitgegaan van  $\gamma\Delta = 1,0$  en  $d(v_f)/d(\gamma\Delta) = -10$  en  $v_{f0} = 10^{-4}$ . Daarmee volgt dat  $v_f = 10^{-4}$ .

Wanneer er dan van uit wordt gegaan dat bij het ontbreken van 1 op de 100 stenen er sprake is van verlies van samenhang van de toplaag, dan wordt de ondergrensschatting van de reststerkte van de toplaag berekend als  $t_{rt}(\min) = f_p / v_f = 0,01 / 10^{-4} = 100$  uur.

Indien nu deze ondergrensschatting te beschouwen is als een waarde die met een kans van niet meer dan 1% wordt onderschreden, dan kan een verwachtingswaarde van de reststerkte van de toplaag worden berekend volgens:

$$\mu_{rt1} = t_{rt}(1\%) / (1 - uV) = 100 / (1 - 2,33 \times 0,2) = 187 \text{ uur } (*)$$

Hierbij is uitgegaan van een normaal verdeelde reststerkte, een bij de 1%-grens behorende u-waarde van 2,33, en een variatiecoëfficiënt van de reststerkte van de toplaag van 0,2.

Met de aangegeven waarde van de variatiecoëfficiënt zijn vervolgens de in het getallenvoorbeeld gepresenteerde waarde van 5%-grens en 95%-grens van de reststerkte van de toplaag te berekenen als respectievelijk 126 uur en 248 uur.

- (h) De reststerkte van het filter in geval stenen in de toplaag worden opgelicht maar niet uit de toplaag verdwijnen is in dit voorbeeld niet nader beschouwd.
- (i) Na het verdwijnen van een element uit de toplaag kan door het daardoor ontstane gat filtermateriaal uitspoelen. Het doorgaand uitspoelen van filtermateriaal onder de toplaag vandaan kan op den duur leiden tot een zodanige ondermijning van de toplaag nabij het gat dat deze bezwijkt, waarmee een veel groter gat in de toplaag is ontstaan. Op dat moment worden de toplaag en filterlaag verondersteld te hebben gefaald.

Voor het maken van een veilige inschatting van de reststerkte van filter en toplaag, na verdwijnen van een element uit de toplaag, wordt gebruik gemaakt van de formulering gegeven in het Technisch Rapport Steenzettingen [Haskoning 2003]. Deze luidt:

$$t_{rf}(\min) = c1_{rf} \times T_p \times \exp(-c2_{rf} \times \sqrt{(H_s \times L_{op})}) / 3.600$$

met

$t_{rf}(\min)$	= reststerkte toplaag en filter bij uitspoelen van filter door gat in toplaag [uur]
$c1_{rf}$	= empirische factor met waarde 163.000 [-]
$T_p$	= piekperiode golfspectrum [s]
$c2_{rf}$	= empirische factor met waarde 0,74 [1/m]
$H_s$	= significante golfhoogte [m]
$L_{op}$	= golflengte op diep water behorend bij piekperiode [m]

In het getallenvoorbeeld is uitgegaan van een piekperiode  $T_p$  van 6 seconden, een significante golfhoogte  $H_s$  van 1,5 meter, en een golflengte van 50 meter. Daarmee wordt een ondergrensschatting van de reststerkte berekend van 0,45 uur. Indien deze ondergrens wordt opgevat als een veilige waarde met een onderschrijdingskans van 1%, dan kan bij aangenomen variatiecoëfficiënt van 0,2 de volgende verwachtingswaarde worden berekend:



$$\mu_{rf1} = t_{rf}(1\%) / (1 - uV) = 0,45 / (1 - 2,33 \times 0,2) = 0,8 \text{ uur (*)}$$

De karakteristieke ondergrens en bovengrens bedraagt dan:

$$\begin{aligned} t_{rf}(5\%) &= \mu_{rf1} (1 - 1,64 \times V) = 0,6 \text{ uur} \\ t_{rf}(95\%) &= \mu_{rf1} (1 + 1,64 \times V) = 1,1 \text{ uur} \end{aligned}$$

- (j) Wanneer er zoveel elementen uit de toplaag zijn verdwenen dat deze zijn samenhang heeft verloren, dan mag er van uit worden gegaan dat het filter weinig weerstand meer kan bieden. De reststerkte van het filter wordt in dat geval veiligheidshalve nul verondersteld.
- (k) Indien er in de toplaag in één keer een 'groot' gat is ontstaan, met een oppervlakte van enkele vierkante meters, dan mag er van uit worden gegaan dat het filter weinig weerstand meer kan bieden. De reststerkte van het filter wordt in dat geval veiligheidshalve nul verondersteld.
- (l) De reststerkte van de kleilaag in geval stenen in de toplaag zijn opgelicht en vervolgens het onderliggende filter dusdanig is gemigreerd dat de toplaag plaatselijk ondermijnd, is in dit voorbeeld niet nader beschouwd.
- (m) Na het falen van de toplaag en filterlaag zal de onderliggende kleilaag aan directe golfaanval bloot komen te staan. Afhankelijk van de erosiesnelheid van de kleilaag en de dikte van de kleilaag zal er zekere tijd overheen gaan voordat gesproken kan worden van falen van de kleilaag.

Voor de schatting van de reststerkte van de kleilaag wordt gebruik gemaakt van de formulering zoals ook gegeven in de theoriehandleiding van PC-ring [TNO 2003]. Deze formulering luidt:

$$t_{rk}(\text{min}) = 0,4 \times (D_{\text{klei}} / \sin(\alpha)) \times c_{rk} / H_s^2 / 3.600$$

met

$$\begin{aligned} t_{rk}(\text{min}) &= \text{veilige schatting van de reststerkte kleilaag [uur]} \\ D_{\text{klei}} &= \text{dikte van de kleilaag [m]} \\ \alpha &= \text{taludhelling [gr.]} \\ c_{rk} &= \text{erosiebestendigheidscoefficiënt [ms]} \end{aligned}$$

Voor de erosiebestendigheidscoefficiënt worden waarden aanbevolen variërend van 7.000 ms voor slechte klei, tot 54.000 ms voor zeer goede klei.

In het getallenvoorbeeld is uitgegaan van een dikte van de kleilaag van 0,8 meter, een taludhelling van 18,4 graden (helling 1:3), en een erosiebestendigheidscoefficiënt 42.000 ms (goede tot zeer goede klei).

Met deze waarde wordt een reststerkte van de kleilaag gevonden van 5,3 uur. Zoals hiervoor al aangegeven wordt deze schatting geïnterpreteerd als ondergrenswaarde, meer concreet als 1% ondergrenswaarde. Met de procedure als beschreven in de toelichting bij bijvoorbeeld blokje (h), kunnen dan verwachtingswaarde en 5%-grens en 95%-grens worden berekend bij gegeven schatting van de variatiecoëfficiënt van  $V = 0,2$ :

$$\mu_{rk} = t_{rk}(1\%) / (1 - uV) = 5,3 / (1 - 2,33 \times 0,2) = 9,8 \text{ uur (*)}$$

De karakteristieke ondergrens en bovengrens bedraagt dan:

$$\begin{aligned} t_{rf}(5\%) &= \mu (1 - 1,64 \times V) = 6,6 \text{ uur} \\ t_{rf}(95\%) &= \mu (1 + 1,64 \times V) = 13,1 \text{ uur} \end{aligned}$$

Tot slot wordt verondersteld dat na het falen van de toplaag door ondermijning de reststerkte van de kleilaag groter is dan na het falen van de toplaag als gevolg van teveel hieruit weggespoelde stenen (tak via de blokjes (d), (g en (j), danwel na falen van de toplaag doordat hier in één keer een groep stenen uit weg is gedrukt (tak via de blokjes (e) en (k). In het eerste geval zijn immers de toplaagelementen nog niet per definitie 'verdwenen'. Dit aspect wordt gehonoreerd met een vergrotingsfactor,  $m_f$ , welke in het getallenvoorbeeld geheel arbitrair is vastgesteld op 1,2. Hierbij wordt opgemerkt dat het nog aanwezig zijn van toplaagelementen niet noodzakelijk een positief effect hoeft te hebben op de reststerkte van de kleilaag.

De weergegeven getallen in blokje (m) worden daarmee respectievelijk:

$$\mu_{rk1} = 9,8 \times 1,2 = 11,8 \text{ uur}$$

$$t_{rf}(5\%) = 6,6 \times 1,2 = 7,9 \text{ uur}$$

$$t_{rf}(95\%) = 13,1 \times 1,2 = 15,7 \text{ uur}$$

- (n) Voor de berekening van de reststerkte van de kleilaag na verlies van samenhang van de toplaag wordt verwezen naar de toelichting bij blokje (m). Omdat nu echter geen vergrotingsfactor in rekening wordt gebracht bedraagt de schatting van de verwachtingswaarde van deze reststerkte (genoteerd als  $\mu_{rk3}$ ) in het getallenvoorbeeld 9,8 uur.
- (o) Voor de berekening van de reststerkte van de kleilaag nadat er in één keer een samenhangende groep stenen is uitgedrukt wordt verwezen naar de toelichting bij blokje (n). De schatting van de verwachtingswaarde van deze reststerkte  $\mu_{rk4}$  bedraagt 9,8 uur.
- (p) De kans op falen van de bekleding (erosie tot op de kern van de dijk) via de bovenste van de vijf faaltakken bedraagt per definitie nul, omdat de kans op initiële schade van deze tak op nul is geschat.
- (q) De kans op falen van de bekleding (erosie tot op de kern van de dijk) via de op een na bovenste van de vijf faaltakken kan worden berekend als:

$$P_{f\_2} = P_{init2} \times (1 - P_{tvs}) \times P(t_{rf2} + t_{rk2} < t_{sm})$$

met

$P_{f\_2}$  = kans op falen bekleding via verdwijnen steen uit toplaag, ondermijning toplaag, en erosie van de onderliggende kleilaag

$P_{init2}$  = kans initiële schade aan door verdwijnen van een steen uit de toplaag

$P_{tvs}$  = kans dat de toplaag zijn samenhang verliest doordat er teveel toplaagelementen uit spoelen

$P(t_{rf2} + t_{rk2} < t_{sm})$  = kans dat de gezamenlijke reststerkte van filter+toplaag en kleilaag kleiner is dan de stormduur

Voor de drie deelfaalkansen in deze uitdrukking volgt:

$$P_{init2} = 0,634 \text{ (zie toelichting bij (d))}$$

$$P_{tvs} = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_{rt} - \mu_{sm}}{\sqrt{(\mu_{rt} V_{rt})^2 + (\mu_{sm} V_{sm})^2}}\right) = 9 \cdot 10^{-7}$$

$$P(t_{rf2} + t_{rk2} < t_{sm}) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_{rf2} + \mu_{rk2} - \mu_{sm}}{\sqrt{(\mu_{rf2} V_{rf2})^2 + (\mu_{rk2} V_{rk2})^2 + (\mu_{sm} V_{sm})^2}}\right) = 5,2 \cdot 10^{-2}$$

Met deze gegevens volgt  $Pf_2 = 0,634 \times (1 - 9 \cdot 10^{-7}) \times 5,2 \cdot 10^{-2} = 3,3 \cdot 10^{-2}$ .

- (r) De kans op falen van de bekleding (erosie tot op de kern van de dijk) via de middelste van de vijf faaltakken kan worden berekend als:

$$Pf_3 = P_{init2} \times (P_{tvs}) \times P(t_{rf3} + t_{rk3} < t_{sm})$$

De bepaling van  $P_{init2}$  en  $P_{tvs}$  is in de toelichting bij (m) reeds behandeld. Daarmee resteert de bepaling van  $P(t_{rf3} + t_{rk3} < t_{sm})$  voor deze tak:

$$P(t_{rf3} + t_{rk3} < t_{sm}) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_{rf3} + \mu_{rk3} - \mu_{sm}}{\sqrt{(\mu_{rf3} V_{rf3})^2 + (\mu_{rk3} V_{rk3})^2 + (\mu_{sm} V_{sm})^2}}\right) = 0,235$$

Met deze gegevens volgt  $Pf_3 = 0,634 \times 9 \cdot 10^{-7} \times 0,235 = 1,3 \cdot 10^{-7}$

- (s) De kans op falen van de bekleding (erosie tot op de kern van de dijk) via de op een na onderste van de vijf faaltakken kan nu worden berekend als:

$$Pf_4 = P_{init3} \times P(t_{rf4} + t_{rk4} < t_{sm})$$

Voor de berekening van  $P(t_{rf} + t_{rk} < t_{sm})$  in deze tak geldt dezelfde uitdrukking als gegeven in de toelichting bij (q), waarmee volgt  $Pf_3 = 0,010 \times 0,235 = 2,34 \cdot 10^{-3}$ .

- (t) De kans op falen van de bekleding (erosie tot op de kern van de dijk) via de onderste van de vijf faaltakken bedraagt per definitie nul, omdat de kans op initiële schade van deze tak op nul is geschat.

De berekende totale kans op falen van de bekleding bedraagt derhalve:

$$\begin{aligned} Pf &= Pf_1 + Pf_2 + Pf_3 + Pf_4 + Pf_5 \\ &= 0,0 + 3,3 \cdot 10^{-2} + 1,3 \cdot 10^{-7} + 2,34 \cdot 10^{-3} + 0,0 = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ per (ontwerp)storm.} \end{aligned}$$