

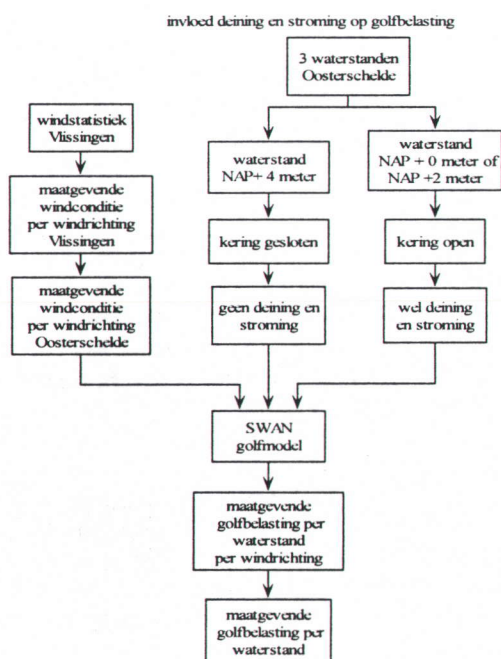
## 5. Scenario's voor de hydraulische belasting

Er zijn verschillende scenario's denkbaar om specifiek voor de Oosterschelde de belasting in rekening te brengen. Allereerst zijn in dit hoofdstuk de methodes beschreven waarmee de recent afgegeven golfrandvoorwaarden zijn bepaald in paragraaf 5.1. Deze methode is opgenomen in het basisscenario. Paragraaf 5.2 beschrijft de methode Barcon, die tijdens de bouw van de Oosterschelde is gebruikt als veiligheidstoets. Vanwege verouderde inzichten is deze methode niet één op één meegenomen als scenario. Wel zijn onderdelen hiervan meegenomen in de probabilistische scenario's die beschreven zijn in paragraaf 5.3. Tenslotte is in paragraaf 5.4 onderzocht of het ingrijpen met de kering na initiële schade aan de bekleding een uitgekendere toetsing mogelijk maakt.

### 5.1 Hydraulische belasting van het basisscenario

De recent afgegeven golfrandvoorwaarden voor de Oosterschelde [ 9 ] vormen de hydraulische belasting van het basisscenario. Voor de Oosterschelde is de maatgevende belasting afgeleid op een bijna identieke wijze als bij de Westerschelde. Er zijn voor drie waterstanden (NAP, NAP + 2.0 meter en NAP + 4.0 meter) bij verschillende windrichtingen golven berekend voor windsnelheden die eens in de 4000 jaar worden overschreden. De maatgevende golfbelasting is afgeleid uit resultaten van SWAN-berekeningen. Hierbij is aangenomen dat de windsnelheid op de Oosterschelde 1 m/s lager is dan de windsnelheid bij Vlissingen. Hieruit volgen golfbelastingen bij verschillende windrichtingen, waaruit vervolgens de maatgevende combinatie van de significante golfhoogte en piekperiode is afgeleid. Voor de toetsing van de steenbekledingen kan tussen de drie waterstanden worden geïnterpoleerd. Hierbij is telkens het toetspeil, dat gegeven is in het Randvoorwaardenboek [ 13 ] als maximale waterstand aangehouden, die geldig is voor de norm met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar.

De waterstandsstatistiek is hierbij niet in rekening gebracht. De invloed van de kering wordt alleen bij de golfberekeningen in rekening gebracht. In de golfberekeningen is bij een waterstand van NAP + 4 meter de kering gesloten verondersteld. Bij de andere waterstanden is de kering open. Dit houdt in dat de invloed van stroomsnelheden en het binnendringen van deining op de golfgroei is verwaarloosd bij NAP + 4.0 meter. De methodiek is in Figuur 5 schematisch weergegeven.



Figuur 5: Schematische weergave van de bepaling van de golfbelasting volgens het basisscenario

## 5.2 Methode volgens Barcon

In deze paragraaf worden globaal enige belangrijke kenmerken van de Barcon-methode beschreven. Naast enkele beperkingen biedt de methode bouwstenen, die zijn gebruikt in de probabilistische scenario's die zijn beschreven in paragraaf 5.3.

### Algemene kenmerken

Een belangrijk kenmerk van de Barcon-benadering is dat de hydraulische belasting zo goed mogelijk probabilistisch in rekening is gebracht, gezien de destijds beschikbare informatie.

Voor de stabiliteitsrelaties die destijds bij Barcon zijn gebruikt voor de steenbekleding is de duur van de belasting bij een gesloten kering van fundamenteel belang. Bij een gesloten stormvloedkering blijft de waterstand langdurig stagnant rond een bepaald peil. Daarom is deze methode sterk gericht op peil-duur-combinaties.

Er is alleen de situatie met een gesloten stormvloedkering beschouwd. Open situaties zijn niet maatgevend geacht. Hieruit volgde de vereenvoudiging dat alleen Noordwester stormen zijn beschouwd, omdat deze maatgevend werden geacht voor de sluitingen van de stormvloedkering.

### Kans op bezwijken van de bekleding

Barcon bepaalde de kans op bezwijken van de steenbekleding. Hiertoe is de kans op een bepaalde peil-duur combinatie vermenigvuldigd met de conditionele kans op bezwijken van de bekleding gegeven de peil-duur-combinatie.

Gegeven een peil-duur-combinatie is de conditionele kans op bezwijken bepaald op basis van de maatgevende golfbelasting en een probabilistisch bezwijkmodel.

De maatgevende golfbelasting per peil-duur-combinatie is bepaald op grond van één maatgevende windsnelheid: de windsnelheid op de Oosterschelde met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar. Hiervoor is onder andere het golfgroei-relatie volgens Bretschneider gebruikt.

### Kans van optreden van peil-duur-combinaties

Per dijkvak is een kansverdeling afgeleid van optredende peil-duur-combinaties bij de dijken langs de Oosterschelde. Hiervoor is eerst het hydraulische systeem beschreven, dat schematisch is weergegeven in Figuur 6. Dit hydraulische systeem beschrijft de interacties van de hydraulische parameters tijdens een storm.

In een storm is de optredende peil-duur-combinatie afhankelijk van het waterstandsverloop in de tijd aan de buitenzijde van de kering, het verloop van de windsnelheid in de tijd en het beheer van de kering. Op grond van deze gegevens is met het waterbewegingsmodel SIMPLIC de peil-duur-combinatie afgeleid.

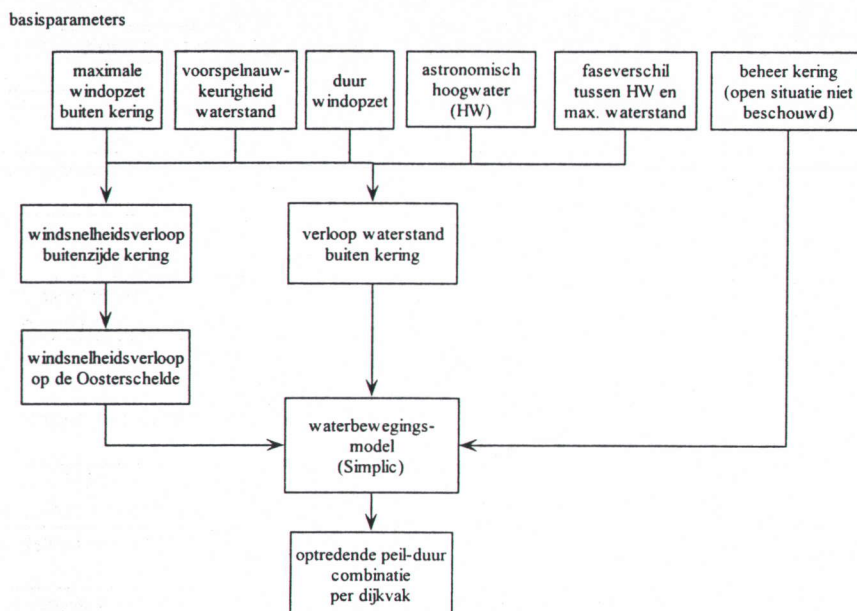
De kans op een peil-duur-combinatie is probabilistisch afgeleid. Voor de basisparameters zijn kansverdelingen opgesteld, die uiteindelijk leiden tot een kans op een peil-duur-combinatie. De basisparameters zijn in het schema van Figuur 6 aangegeven. Hiervoor is gebruik gemaakt van een probabilistische niveau III berekening volgens Riemann.

### Waterstandsverloop aan de buitenzijde van de kering

Het waterstandsverloop aan de buitenzijde van de kering bepaalt de duur dat de kering gesloten is, wat van belang is voor het waterstandsverloop op het bekken. De lek door en overslag over de kering zorgt namelijk voor een niet te verwaarlozen waterstandsstijging op het bekken. Het waterstandsverloop aan de buitenzijde van de kering wordt bepaald door de maximale windopzet die in een storm optreedt en de voorspelfout hiervan, het astronomisch getij, het faseverschil tussen het astronomisch hoog water en de maximaal optredende waterstand en de duur van de windopzet.

### Windsnelheidsverloop

De maximale windsnelheid in een storm is afgeleid uit de maximale windopzet aan de buitenzijde van de kering. De wind aan de buitenzijde op open zee is vertaald naar de Oosterschelde om de windopzet op het bekken te kunnen bepalen, door een reductie van 20% toe te passen. Deze reductie is het gevolg van wrijvingseffecten die de wind boven het Zeeuwse land ondervindt. Bij Barcon is voor de waterstandsberekening op de Oosterschelde aangenomen dat de windsnelheid in de tijd varieert.



Figuur 6: Schematische weergave van de afleiding van belasting-statistiek volgens Barcon

De Barcon-methodiek wordt niet onderzocht als scenario. Door nieuwe inzichten wordt namelijk het probabilistische bezwijkmodel niet voldoende betrouwbaar geacht. Wel zijn onderdelen van de Barcon-methode overgenomen in het probabilistische scenario die in paragraaf 5.3 zijn beschreven.

### 5.3 Probabilistische scenario's voor hydraulische belasting

In deze paragraaf is een scenario opgesteld, waarbij de hydraulische belasting probabilistisch in rekening is gebracht. Hierbij is gebruik gemaakt van elementen van het basisscenario en Barcon.

#### Verschil met het basisscenario

In het probabilistische scenario worden de hydraulische randvoorwaarden uitgekinder bepaald dan het basisscenario. In tegenstelling tot het basisscenario is in het probabilistische scenario naast de wind ook de statistiek van de waterstand op de Oosterschelde in rekening gebracht.

In de recent afgegeven golfrandvoorwaarden van RIKZ was aangenomen dat alle waterstanden bij windsnelheden met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar kunnen voorkomen met een conditionele kans van 1.

In werkelijkheid zorgt de stormvloedkering ervoor dat de waterstanden op de Oosterschelde niet boven een bepaald peil kunnen uitkomen. De waterstandsstatistiek is dus van belang voor de maatgevende golfbelasting op de steenbekleding. Een situatie met een windsnelheid met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar, gecombineerd met een bepaalde waterstand kan een golfbelasting opleveren met een kleinere kans van overschrijden dan 1/4000 per jaar.

#### Verschil met Barcon

Het probabilistische scenario berust op een aanpassing van de Barcon-methodiek op basis van recente kennis. De belangrijkste verschilpunten zijn aangegeven in tabel 3. Hieruit blijkt dat het probabilistische scenario op vele punten een stuk nauwkeuriger is dan de methode Barcon.

Barcon	Probabilistische scenario's
alleen Noordwester stormen	alle windrichtingen
windstatistiek gerelateerd aan de opzet aan de buitenzijde van de kering	windstatistiek afgeleid van Vlissingen
windsnelheid op de Oosterschelde is 80% van de windsnelheid aan de buitenzijde	windsnelheid op de Oosterschelde is 1 m/s lager dan bij Vlissingen
wind en waterstand volledig gecorreleerd	correlatie tussen windsnelheid en waterstand is afgeleid van het Volker-model
1 windsnelheid maatgevend voor golfbelasting	golfbelasting afgeleid op basis van gehele windstatistiek
alleen dichte situatie	open en dichte situatie van de kering
bepaling van de waterstanden op het bekken met het waterbewegingsmodel SIMPLIC	waterbewegingsmodel IMPLIC (dit is een nauwkeurigere modellering dan SIMPLIC)
peil-duur-combinaties berekend	optredende waterstanden berekend (geen duur)
golfmodel op basis van Bretschneider	golfmodel SWAN (volledig spectraal)
windsnelheid in een storm varieert in de tijd	windsnelheid is in een storm constant verondersteld met maximale windsnelheid

Tabel 3: Verschillen tussen Barcon en het probabilistische scenario.

### Hydraulisch systeem

Er zijn niet voldoende metingen van de golfparameters beschikbaar om de maatgevende golfbelasting bij de dijkvakken langs de Oosterschelde af te leiden. Via fysische relaties worden de golfbelastingen bij het dijkvak gerelateerd aan basisparameters aan de buitenzijde van de kering, waarvan wel een gedegen statistiek beschikbaar is. Daartoe wordt analoog aan de Barcon-methodiek van paragraaf 5.2 eerst het hydraulische systeem met de relevante fysische relaties beschreven in paragraaf 5.3.1.

### Probabilistische berekening

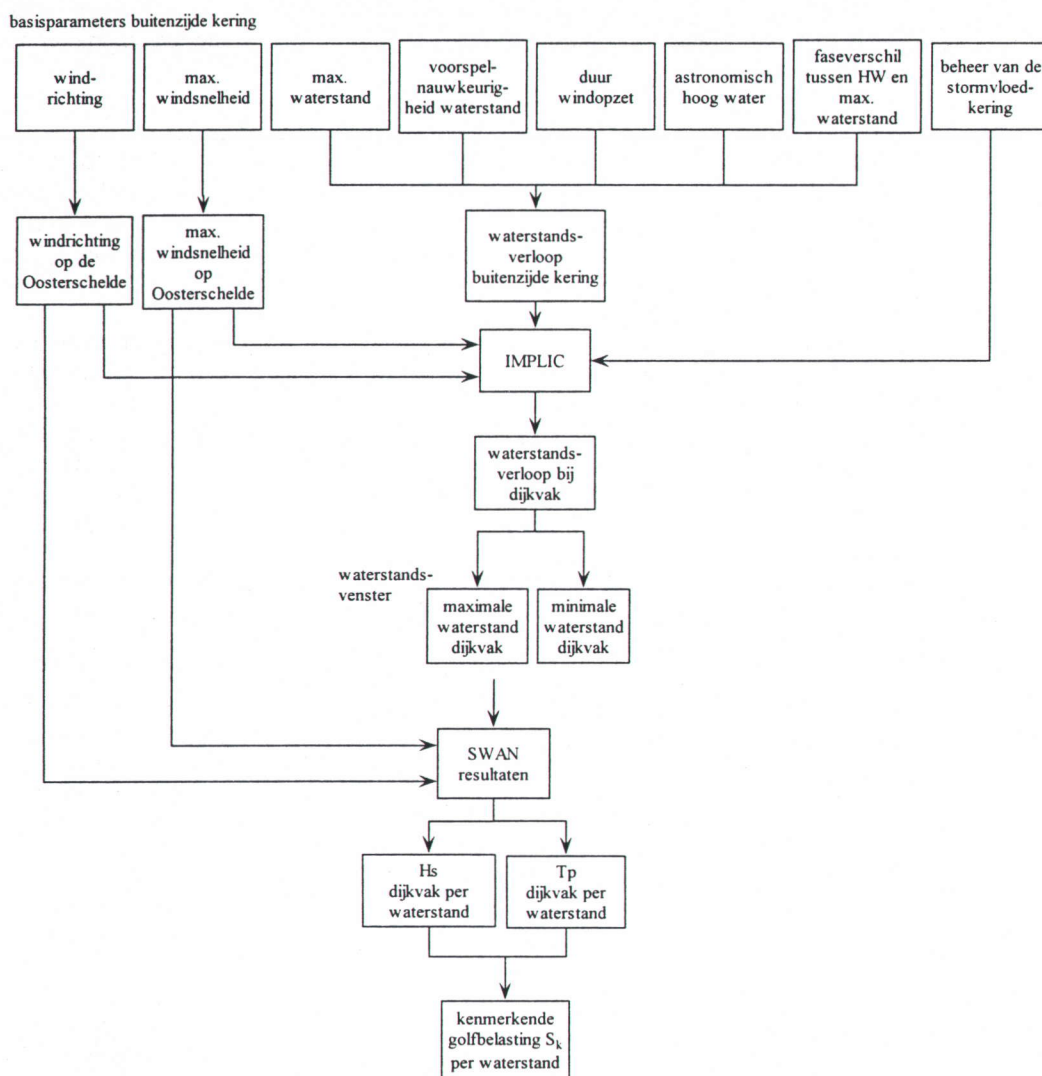
Uiteindelijk leiden beschikbare kansverdelingen van de basisparameters via de fysische relaties tot kansverdelingen van de golfbelasting op het talud bij verschillende waterstanden. De kansverdelingen van de basisparameters zijn onderwerp van paragraaf 5.3.2 en 5.3.3. Paragraaf 5.3.4 beschrijft de gehanteerde probabilistische rekenmethode die benodigd is om de kansverdelingen van de golfbelasting af te leiden.

### Gevoeligheidsanalyse

In de probabilistische methode moeten evenals het basisscenario schematisaties van de werkelijkheid worden gemaakt. Deze schematisaties veroorzaken onnauwkeurigheden in het eindresultaat. Hiertoe is in Bijlage G een gevoeligheidsanalyse opgezet. Hierin zijn één voor één de onzekere factoren gevarieerd om te onderzoeken hoe gevoelig het eindresultaat hiervoor is. De gevoeligheidsanalyse geeft antwoord op de vraag hoe nauwkeurig de berekeningsresultaten van het probabilistische scenario zijn.

## 5.3.1 Hydraulisch systeem

Het hydraulische systeem beschrijft de interacties van de hydraulische parameters tijdens een storm. Voor de uiteindelijke belasting op de dijken zijn de optredende waterstanden in combinatie met de golfbelasting van belang. Dit systeem is schematisch weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7: Relaties tussen de basisparameters aan de buitenzijde van de kering en de golfbelasting bij het dijkvak.

#### Bepaling waterstandsverloop op de Oosterschelde met IMPLIC

De optredende waterstanden langs de dijken op de Oosterschelde zijn afhankelijk van het waterstandsverloop aan de buitenzijde van de stormvloedkering, de windsnelheid, de windrichting en het beheer van de kering.

De bepaling van de waterstand op de Oosterschelde is zowel bij gesloten als bij geopende kering complex. Daarom wordt gebruik gemaakt van een bestaand hydraulisch model: IMPLIC. Dit model is geijkt voor de Oosterschelde en wordt binnen de bestaande beheersstrategie van de kering gebruikt als basis.

Alle basisparameters, die het waterstandsverloop op de Oosterschelde bepalen, kunnen sterk variëren. Om alle variaties probabilistisch te kunnen doorrekenen is een overdrachtsfunctie nodig die gegeven de waarde van de basisparameters het bijbehorende waterstandsverloop op de Oosterschelde oplevert.

Hiertoe is met IMPLIC voor ieder pilotvak een transformatiematrix gevuld. Hiermee kunnen de waterstanden op de Oosterschelde worden gevonden, die optreden bij bepaalde combinaties van de basisparameters.

Dit model is een stuk nauwkeuriger dan het model SIMPLIC, waar Barcon op gebaseerd was. De beschrijving hoe IMPLIC is toegepast is gegeven in Bijlage B. Bovendien is in deze bijlage een verificatie gegeven van IMPLIC.

### **Invloed van de wind**

Op de Oosterschelde is de wind de aandrijvende motor voor zowel de windopzet als de golfgroei. De windsnelheid varieert in de tijd, net als de waterstand en de golfkarakteristieken op het bekken.

Vanwege dieptebeperking en de beperkte strijklengte wordt verwacht dat tijdens een storm het golfveld binnen 1 à 2 uur volgroeid is. Dit betekent dat de maatgevende golfbelasting langs de Oosterschelde optreedt ten tijde van de maximale windsnelheid in een storm. Het is onzeker hoe lang de windsnelheid maximaal is en bij welke waterstand dit het geval is. Voor de bepaling van de maatgevende golfbelasting is daarom aangenomen dat de windsnelheid maximaal is voor een range van waterstanden. Dit is het zogenaamde waterstandsvenster, waarvoor de bovengrens gelijk is aan de maximale waterstand en de ondergrens aan het laag water eraan voorafgaand.

Bij windopzet op de Oosterschelde kan er sprake zijn van traagheidseffecten. De waterstand reageert hierdoor minder snel op veranderende windsnelheden dan de golven. Hierdoor hoeft de maximale waterstand op het bekken niet samen te vallen met de maximale windsnelheid. In het probabilistische scenario is in tegenstelling tot Barcon de windsnelheid constant verondersteld op zijn maximale waarde. Deze schematisatie is toegepast omwille van de eenvoud en om programmeer-problemen te omzeilen.

### **Windreductie**

De windsnelheid op de Oosterschelde ondervindt ten opzichte van de windsnelheid aan de buitenzijde van de kering een reductie als gevolg van wrijving door het Zeeuwse land.

De recent afgegeven golfrandvoorwaarden gingen uit van de windstatistiek van Vlissingen. De windsnelheid op de Oosterschelde is hierbij 1 m/s lager verondersteld dan Vlissingen.

Bij Barcon werd de maximale windsnelheid op de Noordzee bepaald op basis de maximale opzet in een storm. Een reductie van 20% leverde de windsnelheid op de Oosterschelde.

Uit de kansverdeling van de maximale opzet, die gegeven is in [ 14 ], is de windstatistiek afgeleid met een probabilistische berekening. Hieruit blijkt dat de windsnelheid op de Oosterschelde met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar voor het basisscenario ongeveer overeenkomt met Barcon.

In het probabilistische scenario is aangenomen dat de windsnelheid op de Oosterschelde 1 m/s lager is dan bij Vlissingen. De windrichting is op de Oosterschelde ongeveer gelijk aan de windrichting buiten de kering.

### **Bepaling golfbelasting met SWAN**

De golfbelasting op de dijken is afhankelijk van de gelijktijdig optredende waterstanden en wind op de Oosterschelde en de stand van de kering (open of dicht). De stand van de kering bepaalt de invloed van binnenkomende deining en stroming op de golfgroei op de Oosterschelde.

Deze vertaling is gemaakt aan de hand van beschikbare berekeningen met het golfmodel SWAN [ 10 ], die de basis vormen van de golfrandvoorwaarden die recent zijn afgegeven door RIKZ [ 9 ].

Dit golfmodel is volledig spectraal en daardoor nauwkeuriger dan de berekening met Bretschneider, zoals uitgevoerd bij Barcon. SWAN is een programma dat op basis van een model van de bodemligging van de Oosterschelde met een twee dimensionaal rekenrooster golfparameters berekent.

Voor de probabilistische berekening is een overdrachtsfunctie benodigd waarmee de waterstand, de windsnelheid, windrichting per locatie kan worden vertaald naar de golfbelasting ( $H_s$  en  $T_p$ ) op de dijk. Identiek aan de IMPLIC-berekeningen is hiertoe een transformatiematrix opgesteld op basis van reeds beschikbare SWAN-resultaten. Bijlage C geeft een beschrijving hoe de resultaten van SWAN zijn toegepast.

### **5.3.2 Gecombineerde wind-waterstandstatistiek**

De kansverdelingen van de windsnelheid, windrichting en waterstand zijn aan elkaar gerelateerd, in tegenstelling tot de overige basisparameters. Gesproken wordt van wind-waterstandsstatistiek. Het is bijvoorbeeld waarschijnlijk dat er bij een extreem zware westerstorm hoge waterstanden optreden. De benodigde gecombineerde statistiek kan op twee manieren worden afgeleid bij de Oosterschelde: volgens het Volkermodel en volgens de methode "de Haan". Hierop wordt in het volgende op ingegaan.

### Methode "De Haan"

De methode "de Haan" is gebaseerd op afzonderlijke kansverdelingen van de windsnelheid en de waterstand voor verschillende windrichtingen. De correlaties tussen deze kansverdelingen worden afgeleid op basis van de correlatie van de waarnemingen. De waargenomen correlatiestructuur tussen de windsnelheid en de waterstand wordt vervolgens getransformeerd naar extreme omstandigheden met een probabilistische rekenmethode (de Haan).

De uiteindelijke gecombineerde statistiek wordt afgeleid met een specifiek computerprogramma, dat op dit moment niet generiek toepasbaar is. Van de gecombineerde statistiek kan niet direct een parametrische beschrijving worden gemaakt. Dit maakt de methode minder aantrekkelijk voor de pilot. Voor de correlaties tussen beide parameters is bij RIKZ een studie gestart, waarvan binnen de duur van de pilot echter geen resultaten te verwachten zijn.

### Het Volkermodel

De gecombineerde statistiek volgens het Volkermodel is afgeleid van waargenomen waterstanden bij Hoek van Holland, gekoppeld aan waarnemingen van de windsnelheid vanaf het jaar 1921. Het Volker-model is opgesteld ten behoeve van de bepaling van de kruinhoogtes en is beschikbaar in parametrische vorm (dat wil zeggen in formulevorm). Dit maakt dat deze methode, in tegenstelling tot de Haan, algemeen toepasbaar is met alle reguliere probabilistische rekentechnieken.

### Keuze van de gecombineerde wind-waterstandstatistiek voor de Pilot

Omdat de correlatie met de methode "de Haan" nog niet beschikbaar is, en omdat het te bewerkelijk is om de correlatie binnen de pilot af te leiden, is besloten om de correlaties van de methode Volker te gebruiken. Deze correlaties zijn voor verschillende windrichtingen gecombineerd met de marginale statistiek van waterstanden en windsnelheden voor verschillende windrichtingen, die door RIKZ is aanbevolen. Dit is de statistiek van Vlissingen voor de wind en waterstandsstatistiek bij meetpaal OS11.

### Toepassing Volkermodel voor steenbekledingen

Het Volkermodel is in principe bedoeld voor kruinhoogtebepaling en gaat uit van de windsnelheid die optreedt op het tijdstip dat de waterstand een maximum bereikt. Deze windsnelheid hoeft niet de maximale windsnelheid in die storm te zijn. De waterstand is de belangrijkste parameter voor kruinhoogtebepaling.

Bij steenzettingen is de windsnelheid een belangrijkere parameter dan de waterstand. Hier is eigenlijk een andere redenering van toepassing, waarbij de waterstand wordt bepaald op het moment dat de windsnelheid maximaal is. Bij het hanteren van de Volkerstatistiek wordt de maatgevende windsnelheid voor steenzettingen dus enigszins onderschat. Daarom is bij de vertaling van de Volkerstatistiek naar de Oosterschelde de windstatistiek bij maximale waterstanden van Volker vertaald naar statistiek van maximale windsnelheden per storm. Aangenomen is dat de maximale windsnelheid tijdens een storm samenvalt met de maximale waterstand. In werkelijkheid kan hier een tijdsverschil tussen zitten. Daardoor kan het voorkomen dat bij een maximale windsnelheid tijdens de storm de waterstand niet maximaal is. De berekende golfbelasting bij de maximale waterstand is dus aan de veilige kant. De correcties op het Volkermodel zijn beschreven in Bijlage D.

### 5.3.3 Overige kansverdelingen

Naast de wind en de waterstand aan de buitenzijde van de stormvloedkering zijn ook de overige basisparameters ook onderhevig aan onzekerheden. De kansverdelingen van de overige basisparameters zijn in deze paragraaf beschreven.

- **Onnauwkeurigheid waterstandsvoorspellingen**

Belangrijk is voor de berekening dat de stormvloedkering wordt gesloten op basis van voorspellingen. De optredende waterstand kan hiervan afwijken. Deze onnauwkeurigheid wordt in de berekening meegenomen door rondom de waterstand een band te zetten. In overeenstemming met Barcon is deze onnauwkeurigheid normaal verdeeld met een standaardafwijking van 0.25 meter.

- **Kansverdeling duur van de windopzet**  
Beschikbaar is de kansverdeling van de duur van de windopzet (=stormduur) volgens Barcon. Deze is echter alleen geldig voor NW-stormen. Aangenomen is dat de statistiek van de stormduur volgens Barcon toepasbaar is voor alle windrichtingen. In werkelijkheid zal de stormduur voor andere windrichtingen dan NW lager zijn. Bovendien is voor andere windrichtingen het minder waarschijnlijk dat de kering sluit, waardoor de stormduur minder belangrijk is.  
De stormduur voor Noordwesterstormen is lognormaal verdeeld met een gemiddelde van 54.3 uur en een standaardafwijking van 18.8 uur.
- **Kansverdeling astronomisch hoogwater**  
In de berekening is het astronomische hoogwater constant gehouden, gelijk aan het gemiddeld hoogwater. Er is hierop dus geen kansverdeling toegepast.
- **Kansverdeling faseverschil**  
Het faseverschil is uniform verdeeld tussen -6.208 en 6.208 uur.
- **Kans op noodsluiter**  
Er is een kans van 1% per sluiting van de stormvloedkering dat de gewenste beheersstrategie faalt. De kering wordt dan automatisch gesloten bij een gemeten waterstand bij de kering van NAP + 3.00 meter. De waterstand in het bekken kan dan niet meer laag gehouden worden (NAP + 1.00 meter).

### 5.3.4 Twee manieren voor de maatgevende golfbelasting

De maatgevende golfbelasting kan op twee manieren probabilistisch worden bepaald: volgens een eenvoudig probabilistisch scenario en volgens een integraal scenario. Hierbij wordt telkens voor verschillende waterstanden de maatgevende golfbelasting bepaald. Beide scenario's zijn in de pilot onderzocht.

#### Eenvoudige probabilistische scenario

De maatgevende golfbelasting bestaat in het eenvoudige probabilistische scenario uit:

- de significante golfhoogte die gecombineerd met de waterstand eens in de 4000 jaar worden overschreden.
- de piekperiode die gecombineerd met de waterstand eens in de 4000 jaar worden overschreden.

Gezamenlijk vormen deze maatgevende golfparameters. De maatgevende kenmerkende belasting (volgens de formulering van paragraaf 4.3).

Het eenvoudige probabilistische scenario is een bovengrensbenadering. De situatie met een 1/4000 piekperiode hoeft niet gelijktijdig op te treden met een 1/4000 golfhoogte. Beide kunnen bij een andere windrichting optreden.

#### Integrale probabilistische scenario

De maatgevende golfbelasting bestaat in het integrale probabilistische scenario uit de kenmerkende belasting,  $S_k$  die gecombineerd met de waterstand een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar heeft.

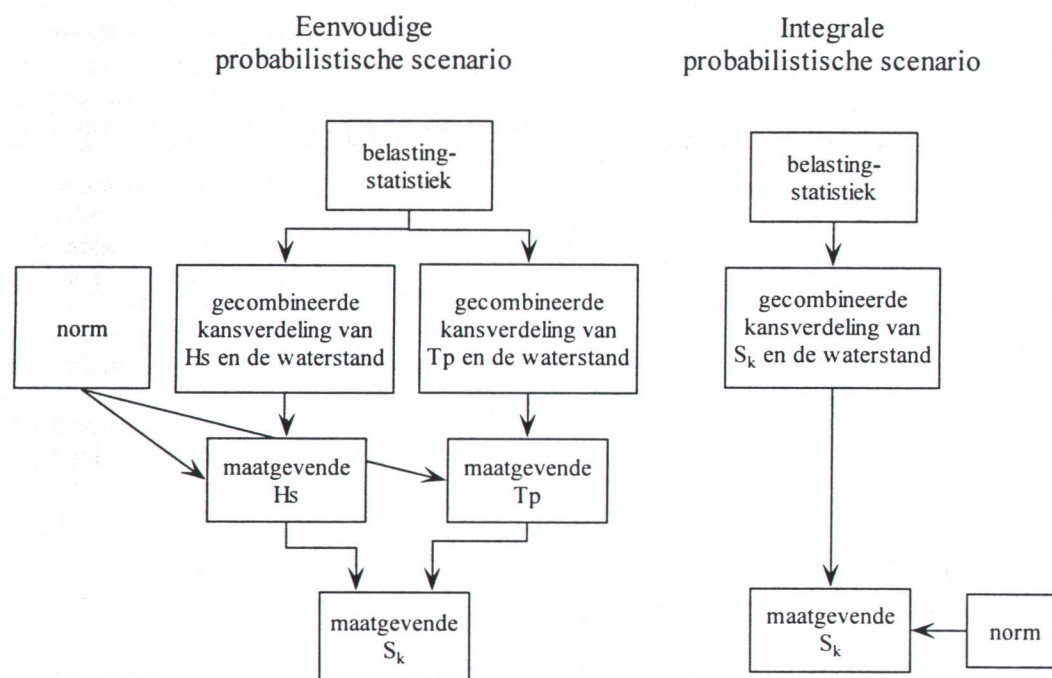
Het integrale scenario maakt een uitgekiendere toetsing mogelijk dan het eenvoudige probabilistische scenario. De integrale bepaling van de kenmerkende golfbelasting sluit beter bij de werkelijkheid aan dan het eenvoudige probabilistische scenario. De maatgevende combinatie van  $H_s$  en  $T_p$  wordt hierbij bepaald door de eigenschappen van de bekleding en derhalve door de formulering van de stabiliteitsrelatie.

Deze methodiek is analoog aan Hydra-Q [4]. Dit is een probabilistische methode van RIZA om voor het IJsselmeer de steenbekledingen te toetsen.

Bij de integrale methode is het moeilijk is om de maatgevende  $H_s$  en  $T_p$  terug te vinden. In principe zijn er oneindig veel combinaties denkbaar die de maatgevende  $S_k$  opleveren. Gezocht moet dan worden naar een zogenaamd ontwerp punt van beide parameters per waterstand. Dit is de combinatie van de golfparameters, die resulteren in de maatgevende  $S_k$  met de grootste kansdichtheid.

Een integrale benadering zal in het toetskader programmatuur nodig maken waarin de bekleding, en dus de stabiliteitsrelatie, integraal is opgenomen in de probabilistische rekenmethode. Bij het integrale scenario is in de pilot een globale stabiliteitsrelatie gebruikt, gebaseerd op de kenmerkende belasting  $S_k$ . In de gedetailleerde toetsing wordt het programma Anamos gebruikt, waarbij de stabiliteitsrelatie veel ingewikkelder is.

In de schema's van Figuur 8 is het verschil tussen het integrale en het eenvoudige probabilistische scenario verduidelijkt.



Figuur 8: Schematische weergave van de scenario's met en zonder integrale bepaling van de kenmerkende belasting.

### 5.3.5 Probabilistische berekeningswijze

De probabilistische rekensom wordt uitgevoerd met een niveau III-berekening volgens Monte Carlo. De reden waarom geen Riemann is gebruikt, zoals dat wel bij de Barcon-studie is gedaan, is dat de rekentijd onhandelbaar groot wordt om een voldoende nauwkeurig resultaat te verkrijgen, gezien het grotere aantal stochasten.

Uit de verschillende basisparameters worden trekkingen gedaan volgens de genoemde kansverdelingen. Per trekking levert dit een golfhoogte en -periode op. Na voldoende trekkingen resulteert dit in een kansverdeling van de golfparameters, gecombineerd met verschillende waterstanden. Bij verschillende waterstanden wordt de significante golfhoogte en de piekperiode bepaald die gecombineerd met de waterstand met een kans van 1/4000 per jaar wordt overschreden.

Het hydraulische systeem is geprogrammeerd binnen EXCEL, waarbij de Monte Carlo simulatie wordt verricht met @RISK. Om een voldoende nauwkeurig resultaat te verkrijgen moet het aantal simulaties voldoende groot zijn. Gekozen is voor 400.000 simulaties. Daarmee wordt met een betrouwbaarheid van 95% bereikt dat de overschrijdingskans van 1/4000 volgens de Monte Carlo-simulatie in werkelijkheid varieert tussen 1/3200 en 1/4800 per jaar.

Naast Monte Carlo zou ook kunnen worden overwogen om een Niveau II berekening (volgens de methode FORM) toe te passen. Deze methode heeft het voordeel dat ontwerp-punten kunnen worden afgeleid. Het afleiden van ontwerp-punten zou bijvoorbeeld nodig kunnen zijn om bij het integrale probabilistische scenario de maatgevende significante golfhoogte en piekperiode af te leiden. Nadelen zijn echter dat de methode onnauwkeuriger is en minder inzichtelijk.

## 5.4 Ingrijpen met de kering

Een alternatieve manier om uitgekinder te toetsen is om rekening te houden met het feit dat met de stormvloedkering de waterstand kan worden gewijzigd na initiële schade van de toplaag van de steenbekleding. De gedachte hierbij is dat na een waterstandswijziging de golven de bekleding op een ander niveau belasten, zodat voortschrijdende schade kan worden vertraagd. Door gebruik te maken van het principe van de reststerkte zou dan de veiligheidsnorm van de toplaag kunnen worden verlaagd. Deze gedachte is wel eerder genoemd in de Barcon-methode, maar nooit uitgewerkt.

Na initiële schade is het niet acceptabel om de waterstand te verhogen. Bij een verhoging van de waterstand kan de schade zich uitbreiden naar boven, waar de dijk steeds minder breed wordt. De kans op doorbraak en de bijbehorende gevolgen nemen dan toe, vanwege de kleinere dijkbreedte en de hoge waterstand. Na initiële schade is het dus alleen acceptabel om de waterstand te verlagen.

Een waterstandsverlaging wordt bereikt door bij het eerstvolgende laagwater de kering te openen. Een waterstandsverlaging is alleen mogelijk in het geval van een noodsluiting. Bij een normale sluiting (met een wisselstrategie) is de waterstand op de Oosterschelde bijna altijd lager dan NAP + 3.00 meter, in tegenstelling tot een noodsluiting, waarbij de waterstand hoger zal zijn dan NAP + 3.00 meter.

De volgende redenen zorgen ervoor dat het ingrijpen van de kering geen nut heeft:

- in 99% van de sluitingen treedt de wisselstrategie in werking en kan de waterstand na initiële schade niet worden verlaagd.
- niet altijd kan de waterstand worden verlaagd in het geval van een noodsluiting, omdat in sommige gevallen het opvolgende laagwater te hoog is om de kering te openen
- er bestaat een kans dat de schade niet op tijd wordt gesignaleerd, waardoor te laat wordt ingegrepen met de kering. De kans hierop is zeker niet verwaarloosbaar, omdat de maximale golfbelasting onder de waterstand aangrijpt.
- er bestaat een kans dat de initiële schade zich naar andere niveau's uitbreidt. Hierover ontbreekt op dit moment voldoende kennis

Het ingrijpen met de kering wordt niet als scenario voor het toetskader in de pilot meegenomen.

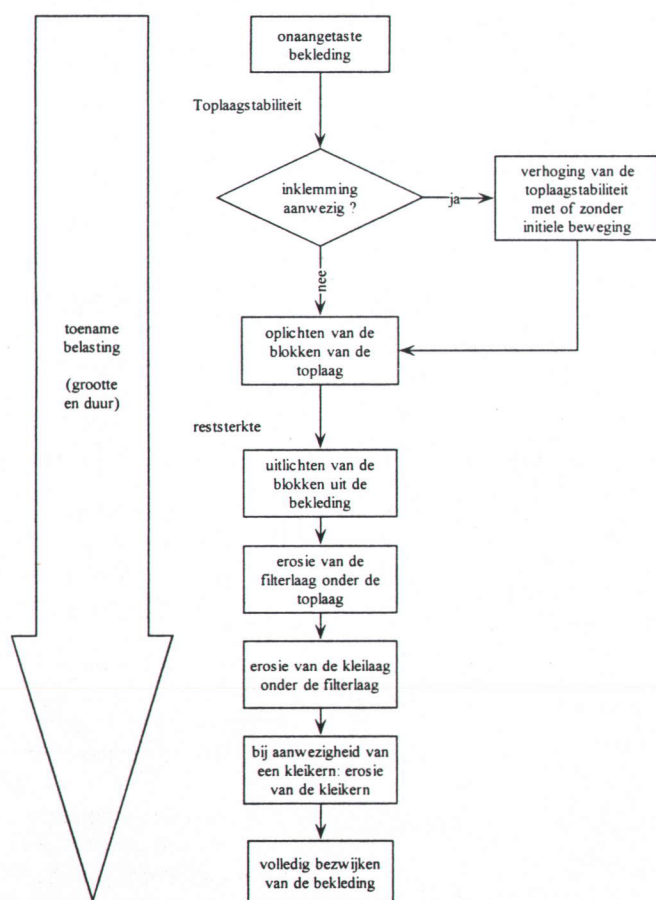
## 6. Scenario's voor stabiliteitsrelaties

Het toetskader bestaat naast de maatgevende hydraulische randvoorwaarden uit een set stabiliteitsrelaties. Bij de uiteindelijke keuze van het toetskader worden primair de stabiliteitsrelaties voor de toplaag betrokken. In het basisscenario worden dezelfde stabiliteitsrelaties gebruikt als voor de Westerschelde. Deze relaties zijn nader beschreven in het handboek toetsen [3]. In dit hoofdstuk wordt onderzocht welke stabiliteitsverhogende factoren zouden kunnen worden toegepast.

### Schademechanismen

De te hanteren stabiliteitrelatie van de bekleding is afhankelijk van de geaccepteerde mate van schade van de bekleding. In de stabiliteitsrelaties, die zijn gebruikt voor de steenbekledingen langs de Westerschelde (basisscenario), is het begin van oplichten van de blokken van de toplaag als stabiliteitscriterium toegepast.

Tussen begin van bewegen van de toplaag en het uiteindelijke bezwijken van de bekleding kunnen een aantal stadia onderscheiden worden bij toenemende belasting, die zijn gegeven in Figuur 9. Hierbij zijn twee aspecten van belang: Inklemming en reststerkte. Beide aspecten zijn niet meegenomen in het basisscenario. In paragraaf 6.1 is aangegeven of reststerkte kan leiden tot een verbetering van de stabiliteitsrelatie. Tenslotte is in paragraaf 6.2 beschreven of inklemmingen kunnen bijdragen tot een uitgekiendere toetsing.



Figuur 9: Schematische weergave van stadia van schade aan de bekleding bij toenemende belasting

## 6.1 Reststerkte

Na overschrijding van de toplaagstabiliteit en het uitlichten van stenen belasten de golven de onbeschermde filterlaag en daaronder gelegen kleilaag. Na verloop van tijd "eten" de golven de bekleding op. De reststerkte neemt af naarmate de belastingduur toeneemt. De reststerkte wordt uitgedrukt in een kritieke belastingduur die door de filterlaag en kleilaag kan worden doorstaan.

Wanneer onder maatgevende omstandigheden (bij golfcondities met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar) aantoonbaar voldoende reststerkte aanwezig is, zou de veiligheidsnorm voor de toplaag minder streng kunnen zijn, waardoor uitgekiender kan worden getoetst.

### Reststerkte kleikern

Zowel de aanwezigheid als de kwaliteit van de kleikern moet worden aangetoond. Dit is voor een dieper gelegen kleikern moeilijk. Reststerkte door aanwezigheid van kleikernen kan daarom niet goed worden onderbouwd en wordt daarom niet in het toetskader betrokken.

### Reststerkte filterlaag en kleilaag

Voor de filterlaag en een kleilaag onder de gezette steenbekleding kan de aanwezigheid en de kwaliteit beter aangetoond worden dan voor een kleikern. Bij gebleken aanwezigheid kan de reststerkte met de Leidraad Toetsen op Veiligheid [ 2 ] worden geschat. Deze leidraad biedt de laatste kennisontwikkelingen op dit punt.

Voor de reststerkte van de filterlaag geldt de volgende formulering:

$$t_{rf} = 570000 \cdot T_p \cdot e^{-0.51 \sqrt{\frac{9.81 H_s T_p^2}{2\pi}}}$$

Waarin:

$t_{rf}$  = reststerkte van de filterlaag [ s ]

$T_p$  = piekperiode [ s ]

$H_s$  = significante golfhoogte [ m ]

### Oriënterende berekening

Om inzicht te krijgen in de mogelijke invloed van de reststerkte is een oriënterende berekening gemaakt halverwege de Oosterschelde ter hoogte van pilotvak 3.

Onder maatgevende omstandigheden geldt bij pilotvak 3 volgens bovenstaande formulering dat de reststerkte van het filterlaag 5½ uur bedraagt, bij een waterstand van NAP + 3.0 meter. De reststerkte van de klei is minimaal 1.5 uur (bij matige klei), mits aantoonbaar. In totaal bedraagt de reststerkte halverwege de Oosterschelde dus 7 uur, mits de kwaliteit en de aanwezigheid van de klei en filterlaag aantoonbaar is.

De belastingduur is in deze oriënterende berekening ingeschat op basis van resultaten van Barcon-berekeningen. Hierin zijn voor verschillende peil-duur combinaties voor verschillende locaties op de Oosterschelde kansen van voorkomen opgesteld. Voor een waterstand van NAP + 3.00 meter is hieruit afgeleid dat de belastingduur met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar ongeveer 6 uur bedraagt.

In deze oriënterende berekening blijkt dat halverwege de Oosterschelde de reststerkte onder maatgevende omstandigheden voldoende is, mits de kwaliteit en de aanwezigheid van de klei en filterlaag aantoonbaar is. Omdat de reststerkte toeneemt naarmate de golfbelasting (naar de oostzijde toe) afneemt, wordt verwacht dat dit in de gehele oostelijke helft van de Oosterschelde het geval is.

Bij aantoonbare reststerkte zou dit zou aanleiding kunnen zijn om de veiligheidsnorm voor de toetsing van de toplaag te verlagen naar bijvoorbeeld 1/400 per jaar, omdat de klei- en filterlaag voor een deel van de veiligheid zorg kunnen dragen. In de gevoeligheidsanalyse (Bijlage G) is berekend dat dit voor Zierikzee een reductie van de minimaal benodigde steendikte van de toplaag van ongeveer 13% oplevert.

Op dit moment is kennis over de aantoonbaarheid en betrouwbaarheid van de aanwezige klei en filterlagen nog niet volledig ontwikkeld. De huidige criteria voor het toepassen van reststerkte uit de Leidraad [ 2 ] zijn tamelijk streng. Bij het opstellen van het toetskader wordt daarom geen scenario in rekening gebracht met reststerkte.

## 6.2 Inklemming

Allereerst wordt tijdens een extreme storm de toplaagstabiliteit aangesproken. Hierbij kan sprake zijn van inklemming tussen naburige blokken. Deze inklemming kan optreden na initiële (kleine) beweging of zonder beweging. Inklemming draagt bij aan een verhoogde toplaagstabiliteit. De stabiliteitsverhogende factor,  $F$ , wordt in dit geval de inklemmingsfactor genoemd. Deze factor vormt een onderdeel van de kenmerkende belasting, zoals geformuleerd in paragraaf 4.3. Als de blokken niet zijn ingeklemd wordt de stabiliteit ontleend aan het gewicht van een enkel blok. Voor de stabiliteitsverhogende factor,  $F$ , is dan de waarde 1.0.

Om zo uitgekiend mogelijk te toetsen is voor de te hanteren inklemmingsfactoren onderzoek in gang gezet. Hoewel dit onderzoek nog niet is afgerond, kan wel een inschatting van de inklemmingsfactoren worden gegeven als er sprake is van inklemming. In de praktijk moet onder andere met trekproeven worden aangetoond of inklemming aanwezig is.

Bij gebleken inklemming zijn de inklemfactoren ingeschat op basis van tussenresultaten van lopend onderzoek, afhankelijk van het type bekleding. Hieronder volgt een inschatting van de inklemmingsfactoren.

In afwachting van acceptatie bij de TAW wordt binnen de pilot toch een scenario berekend, waarbij inklemming in rekening wordt gebracht. Als er in situ gebleken is dat er sprake is van inklemming zijn voor de voorkomende bekledingen langs de Oosterschelde de volgende inklemmingsfactoren ingeschat in overleg met de Dienst Weg- en Waterbouwkunde:

- polygoon betonblokken (basalton, pit, hydroblok etc.)  
inklemmingsfactor = 1.5 à 3.0
- basalt  
inklemmingsfactor = 1.5
- graniet:  
inklemmingsfactor = 2
- koperslak  
inklemmingsfactor = 2.5
- overige bekledingen  
inklemmingsfactor = 1.0 (geen inklemming)

Uiteindelijk is in de pilot een reëel scenario beschouwd met een inklemmingsfactoren van 1.5 ongeacht het bekledingstype. Hierbij is ingeschat dat 50% van de oppervlakte van de bekleding is ingeklemd. Voor de andere 50% geldt een inklemmingsfactor van 1.0.

## 7. Resultaten van de pilot

In dit hoofdstuk worden de pilotresultaten beschreven. Allereerst geeft paragraaf 7.1 weer wat de nauwkeurigheden van de resultaten zijn. Paragraaf 7.2 geeft de maatgevende belastingen per pilotvak, die in paragraaf 7.3 vertaald zijn naar reducties van de belasting ten opzichte van het basisscenario. Paragraaf 7.4 levert het verwachte toetsresultaat volgens de beschouwde scenario's. Tenslotte beschrijft paragraaf 7.5 de praktische toepasbaarheid van de verschillende scenario's.

### 7.1 Nauwkeurigheid van de pilot

#### 7.1.1 Probabilistische scenario's

Het probabilistische scenario is voldoende nauwkeurig gebleken. Dit blijkt uit de volgende punten:

- Voor de gehele Oosterschelde wordt aanbevolen om eenzelfde probabilistische berekening toe te passen op basis van Monte Carlo.
- In de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de probabilistische rekenmethode volgens Monte Carlo voldoende nauwkeurig is. Bovendien zijn de rekentijden acceptabel.
- De IMPLIC-berekeningen zijn in combinatie met de probabilistische werkwijze geverifieerd (zie Bijlage B). De vigerende toets- en ontwerppeilen volgens de nota Basispeilen [ 8 ] en het Randvoorwaardenboek [11 ] kunnen worden gereproduceerd.  
Voor de waterstandsberekening moet het verloop van de windsnelheid in de tijd wel in rekening gebracht worden, bijvoorbeeld door de maximale windsnelheid te reduceren met 20% (zie Bijlage E).
- De berekening is nauwelijks gevoelig voor de minimale waterstand bij het dijkvak, waarbij de maximale windsnelheid optreedt. De gevolgde methode (met het waterstandsvenster) is dus acceptabel.
- De marginale basisstatistiek van de wind en de waterstand is nauwkeurig in rekening gebracht. Dit is gebleken in de gevoeligheidsanalyse.
- De correlaties die met Volker worden ingeschat zijn een goede basis voor de wind-waterstandstatistiek. Voor zowel de golfbelasting als de berekening van de overschrijdingsverdeling van de waterstanden. Een andere manier om de correlaties in rekening te brengen is acceptabel. De gevoeligheid voor de correlaties is niet groot gebleken in de gevoeligheidsanalyse.

#### 7.1.2 Inklemmingen

Inklemfactoren worden in rekening gebracht als in situ in de bekleding is aangetoond dat de bekleding is ingeklemd. Hiervoor geldt het principe van de representatieve steekproef. Langs de Oosterschelde is de inventarisatie van de steenbekleding nog in volle gang. Bovendien is niet goed bekend wat de mate van inklemming is. In de pilot is aangenomen dat 50% van de bekledingen is ingeklemd. Deze waarde is zeer onzeker, en is in de pilot louter meegenomen als indicatie.

#### 7.1.3 pilotresultaat

De resultaten van paragraaf 7.2 en 7.3 leiden uiteindelijk in paragraaf 7.4 tot een inschatting hoeveel dijk lengte welk toetsresultaat zal scoren langs de Oosterschelde. Deze bepaling is zeer globaal geschiedt. Ze zijn gebaseerd op een zeer globale inventarisatie van de bekledingen in 1996 [ 12 ]. Bovendien is het onzeker of de pilotvakken 100% representatief zijn voor de hele Oosterschelde. Daarom mag zeker geen absolute waarde aan de berekende dijk lengtes worden gegeven. De getallen zijn alleen gebruikt om een procentuele inschatting te kunnen maken van de reducties van de dijkvakken die onvoldoende scoren. Aan deze percentages, die zijn gebruikt in de afweging van de verschillende scenario's, mag meer waarde worden toegekend.

## 7.2 Maatgevende belastingen per pilotvak per waterstand

De maatgevende belastingen per waterstand zijn per scenario voor de verschillende pilotvakken gegeven in Bijlage F.

Deze resultaten geven onder andere verschillen aan tussen de probabilistische scenario en het basisscenario. Terwijl de maximale golfbelasting bij het basisscenario optreedt bij het toetspeil (zie tabel 1), rond NAP + 3.50 en daarboven, treedt de maximale golfbelasting volgens het probabilistische scenario afhankelijk van het pilotvak 0 tot 1.0 meter lager op. De kans van voorkomen van het toetspeil is zo klein, dat de windsnelheid die gecombineerd met het toetspeil gemiddeld eens per 4000 jaar wordt overschreden relatief klein is.

De maatgevende golfbelasting bij lage waterstanden (NAP en NAP +1.0) is bij het probabilistische scenario over het algemeen kleiner dan bij het basisscenario (behalve bij het pilotvak Sluis). Dit wordt veroorzaakt doordat de combinatie van een lage waterstand en een extreem hoge windsnelheid minder waarschijnlijk is. De windsnelheid die gecombineerd met de lage waterstanden een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar oplevert is kleiner dan de windsnelheid met een marginale kans van overschrijden van 1/4000 per jaar.

Er treden geen grote verschillen op tussen het probabilistische scenario en de integrale aanpak.

## 7.3 Reducties ten opzichte van het basisscenario

Uit de maatgevende belastingen per waterstand van Bijlage F zijn de reductiepercentages van de kenmerkende belasting gemiddeld over de hoogte van het talud per pilotvak afgeleid ten opzichte van het basisscenario. Vervolgens zijn de percentages gemiddeld over de Oosterschelde berekend per scenario. Deze percentages zijn berekend op de manier die beschreven is in paragraaf 4.4 en zijn gegeven in tabel 4. Tevens geven deze percentages aan hoeveel de minimaal benodigde steendikte kleiner is dan het basisscenario.

	pilotvak	basisscenario	eenvoudige probabilistische scenario	integrale probabilistische scenario	scenario met inklemming
reductiepercentage van $S_k$ gemiddeld over de hoogte t.o.v. basisscenario [%]	1 Zierikzee	0	4	4	33
	2 Wissekerke	0	0	2	33
	3 Kattendijke	0	6	6	33
	4 Strijenham	0	10	10	33
	5 Sluis	0	-1	0	33
	hele Oosterschelde	0	4	4	17

Tabel 4: Reductiepercentages van de kenmerkende belasting gemiddeld over de hoogte van het talud ten opzichte van het basisscenario

Gemiddeld over de hele Oosterschelde wordt de maatgevende kenmerkende belasting bij het probabilistische scenario gereduceerd met 4 %. De reductie is het grootst in de zuidoosthoek van de Oosterschelde, waarvoor pilotvak 4 Strijenham kenmerkend is gesteld.

Bij Sluis is er bij de probabilistische belasting sprake van een negatieve reductie. Ten opzichte van het basisscenario wordt hier de maatgevende golfbelasting overschat. De oorzaak hiervan is dat de maatgevende golfhoogte en golfperiode apart worden bepaald. Bij Sluis komt de maximale golfhoogte bij een windrichting voor die nogal afwijkt van de windrichting met de maximale piekperiode. Hier levert de integrale berekening dan ook een ietwat positiever resultaat.

Uit de gevoeligheidsanalyse, die voor het probabilistische scenario is uitgevoerd bij Zierikzee, blijkt dat een extra reductie van de maatgevende kenmerkende belasting mogelijk is. Wanneer de waterstanden op de Oosterschelde zijn bepaald met een gedetailleerde discretisatie van de waterstanden bij OS11 rondom sluiteil, nemen de golfbelastingen verder af met 2 %. Als dit kenmerkend is voor de overige dijkvakken, zijn de belastingen over de hele Oosterschelde gemiddeld 6% lager dan bij het basisscenario.

Gemiddeld over de Oosterschelde levert de integrale benadering geen noemenswaardige extra reductie van de maatgevende belasting op. Alleen bij dijkvakken waarbij de windrichting van de maximale golfhoogte sterk afwijkt van de maximale golfperiode (Wissekerke en Sluis) zou de methode tot extra, zij het verwaarloosbare, reductie van de golfbelasting kunnen leiden.

Het scenario met inklemming levert gemiddeld over de Oosterschelde 17% lagere maatgevende belasting op. (geen 33 %, omdat aangenomen is dat 50% van de bekleding is ingeklemd).

## 7.4 Toetsresultaat voor de hele Oosterschelde

De reductiepercentages zijn vertaald naar het toetsresultaat per dijkvak zoals beschreven is in paragraaf 4.5. Vervolgens is de dijk lengte per toetsscore gesommeerd over de hele Oosterschelde. De resulterende dijk lengtes zijn gegeven in Tabel 5.

toetsresultaat		basisscenario	eenvoudige probabilistische scenario	integrale probabilistische scenario	scenario met inklemming
dijk lengtes met verschillende toetsresultaten [ km ]	goed	5	11	11	16
	twijfel	41	41	41	53
	geavanceerd	34	37	37	45
	onvoldoende	116	106	106	81
	totaal	195	195	195	195
afname onvoldoende dijkvakken ten opzichte van basisscenario [ % ]		0 %	9%	9%	30%

Tabel 5: Gesommeerde dijk lengtes per toetsscore voor de hele Oosterschelde

N.B.: Nogmaals wordt benadrukt dat de gepresenteerde dijk lengtes indicatief zijn. Hier mag geen absolute waarde aan worden ontleend.  
De bepaling van de dijk lengtes met de verschillende toetsresultaten is globaal geschiedt. Ze zijn gebaseerd op een zeer globale inventarisatie van de bekledingen in 1996 [ 12 ]. Bovendien is het onzeker of de pilotvakken 100% representatief zijn voor de hele Oosterschelde.

Toepassing van het probabilistische scenario betekent dat het aantal kilometers dijk bekleding langs de Oosterschelde dat onvoldoende scoort reduceert met ongeveer 10 kilometer, ten opzichte van het basisscenario. Dit is orde 9% minder dan het basisscenario.

Over het algemeen heeft een integrale bepaling van de golfbelasting weinig effect.

Een extra reductie kan worden bereikt, wanneer een detaillering wordt toegepast bij de waterstandsberekening. Als aangenomen wordt dat deze extra reductie van de maatgevende golfbelasting over de hele Oosterschelde gelijk is aan Zieikzee (2%), levert dit naar schatting 99 kilometer bekledingslengte op die onvoldoende is. Dit is orde 15% minder dan het basisscenario.

Inklemmingen hebben veel effect op de minimaal benodigde steendikte. Als over 50% van de bekledingen langs de Oosterschelde inklemming aanwezig is met een inklemfactor van 1.5, reduceert de bekledingslengte met score onvoldoende met 35 kilometer ten opzichte van het basisscenario. Dit is orde 30% minder.

## 7.5 Praktische toepasbaarheid

Naast de reducties van de te verbeteren bekledingen, speelt ook de praktische toepasbaarheid van het toetskader een rol bij de afweging van de scenario's om te komen tot een voorstel voor het toetskader. De praktische toepasbaarheid is een kwalitatieve waardering van de hoeveelheid inspanning en tijd die gemoeid gaat met de toepassing van de verschillende scenario's.

**Basisscenario**

De toepassing van het basisscenario levert weinig extra inspanning op dan bij de Westerschelde het geval was.

**Probabilistisch scenario**

Voor de toepassing van het probabilistisch scenario moeten eerst de maatgevende golfbelastingen per waterstand worden bepaald voor alle dijkvakken, op een identieke wijze als voor de pilotvakken. Als dit eenmaal gebeurd is, is de praktische toepasbaarheid gelijk aan het basisscenario. Het probabilistische scenario hoeft niet veel extra tijd te kosten (enkele maanden), omdat de bepaling van de maatgevende randvoorwaarden bijna parallel kan lopen aan de toetsing.

**Scenario met integrale aanpak**

Toepassing van het scenario met integrale aanpak betekent een grotere inspanning. Hierbij moet bij alle dijkvakken de stabiliteitsberekening worden opgenomen in de probabilistische som. Voor de gedetailleerde toetsing betekent dit dat Anamos in de probabilistische berekening gehangen moet worden. De methode levert niet direct de maatgevende golfhoogte en golfperiode, vanwege ontwerppunt-problematiek (zie hoofdstuk 6). Voor eventueel opvolgende ontwerpberekeningen kan dus niet direct gebruik worden gemaakt van maatgevende golfrandvoorwaarden.

**Scenario met inklemmingen**

Het scenario waarbij inklemmingen worden meegenomen verloopt identiek aan het basis-scenario, met als uitzondering, dat er trekproeven moeten worden uitgevoerd voor de dijkvakken waar inklemming wordt vermoed.

## 8. Aanbevelingen voor het toetskader

### 8.1 Voorstel toetskader

Aanbevolen wordt om de stabiliteit niet probabilistisch in rekening te brengen. We gaan er van uit dat de veiligheden impliciet in de (deterministische) stabiliteitsformuleringen zijn opgenomen.

Verder wordt aanbevolen om de maatgevende golfbelastingen langs de Oosterschelde probabilistisch af te leiden op analoge wijze als beschreven in dit rapport. Deze extra inspanning is zeker de moeite waard gezien de verwachte reducties van de af te keuren bekledingen en de grote geldbedragen die hiermee gemoeid zijn. De probabilistische berekeningswijze van de golfbrandvoorwaarden levert 9 à 15% reductie van de onvoldoende scorende bekledingen op ten opzichte van het basisscenario.

De inventarisatie van inklemskrachten zou dan ook in het toetskader opgenomen moeten worden. Het in rekening brengen van stabiliteitsverhogende inklemfactoren kan de werkelijke sterkte van de bekleding beter benaderen. Bovendien heeft dit grote besparingen ten opzichte van het basisscenario tot gevolg.

Omdat een integrale benadering van belasting en sterkte geen substantiële invloed heeft op de minimaal benodigde steendikte, is de integrale benadering voor de toetsing van steenzettingen niet aantrekkelijk. Bovendien is de praktische toepasbaarheid van dit scenario een stuk minder gunstig.

#### **Te verwachten reducties**

Het is onzeker hoeveel dijkvakken ingeklemd zullen zijn. Als nergens inklemming in rekening zou worden gebracht, zal het voorgestelde toetskader de lengte met onvoldoende scorende dijkvakken minimaal doen afnemen met 9% (tot 106 kilometer) ten opzichte van het basisscenario. Een reële inschatting dat 50% van de bekleding ingeklemd is levert volgens de grove inschatting op dat in totaal 74 kilometer dijkvak onvoldoende is (106 kilometer minus 30%). Dit is 36% minder dan het basisscenario.

#### **Benodigd onderzoek**

Aanbevolen wordt om een studie te starten waarbij de golfbrandvoorwaarden opnieuw op een probabilistische manier worden berekend voor alle dijkvakken langs de Oosterschelde, op identieke wijze als beschreven in dit rapport. Hierbij zouden de waterstanden op de Oosterschelde rondom het sluitpeil met een gedetailleerde berekening moeten worden bepaald, vanwege de extra reductie van de golfbelasting.

Bovendien is het raadzaam om het in gang gezette onderzoek naar inklemmingen voort te zetten.

#### **Toetsing kruinhoogtes**

Aanbevolen wordt om ook de uit te voeren toetsing van de kruinhoogtes langs de Oosterschelde uit te voeren met dezelfde probabilistische berekening als voor de steenzettingen. Dit komt de uniformiteit van de toetsingsmethode langs de Oosterschelde ten goede. De meest praktische manier is om dit tegelijk met de berekening van de golfbrandvoorwaarden voor de steenzettingen te doen, omdat dit relatief weinig extra moeite kost.

#### **Methode de Haan**

De stormvloedkering introduceert een groter aantal basisstochasten dan bij de Westerschelde die allen probabilistisch moeten worden doorgerekend. De methode de Haan is hiertoe nog niet geschikt. Als toch besloten zou worden om de methode "de Haan" te gebruiken voor de Oosterschelde, wordt aanbevolen om de methode parametrisch te ontsluiten. Op die manier wordt de methode inzichtelijk en bruikbaar voor probabilistische berekeningen. De methode moet dan wel rekenen met dezelfde basisstochasten en volgens eenzelfde hydraulisch systeem (paragraaf 5.3.1).

Overigens leveren de correlaties tussen de wind en waterstand volgens de Haan waarschijnlijk geen andere randvoorwaarden op. Het eindresultaat bleek niet erg gevoelig te zijn voor de mate van correlatie

## 8.2 Overige aanbevelingen

### Reststerkte

Reststerkte is niet opgenomen in het toetskader. Een oriënterende berekening laat echter zien dat voor de gestelde veiligheidsnorm de reststerkte in de oostelijke helft van de Oosterschelde voldoende is voor bekledingen met een klei- en filterlaag !! In dat geval zou voorgesteld kunnen worden om de topklaag met een norm van 1/400 per jaar te toetsen. Deze versoepelde norm heeft tot gevolg dat de minimaal benodigde steendikte ongeveer 15% lager is. Het enige probleem is om aan te tonen dat de filter- en kleilaag voldoen aan de gestelde kwaliteitscriteria volgens de formuleringen van de Leidraad [ 3 ]. Gezien de mogelijke besparingen wordt aanbevolen om op dit punt nader onderzoek te starten.

### Modellering van wind

Het is onduidelijk wanneer met wind boven land en wind boven water moet worden gerekend. Boven land reduceert de windsnelheid drastisch als gevolg van wrijving. Gebleken is dat dit een groot effect heeft op de golfrandvoorwaarden. De gehanteerde windstatistiek is gebaseerd op het meetstation Vlissingen. Hier worden voornamelijk windsnelheden boven land gemeten, die zijn gereduceerd ten opzichte van de windsnelheden boven open zee. Op de Oosterschelde worden westelijke windsnelheden niet gereduceerd door land. In dat geval is er sprake van wind boven water en dus een hogere windsnelheid dan in de statistiek is opgenomen.

### Onzekerheid waterdiepte

De gevoeligheidsanalyse heeft aangegeven dat de invloed van de waterdiepte op de golfbelasting niet verwaarloosbaar is ( 4% bij Zierikzee ). De onzekerheden van de waterdiepte worden onder andere beïnvloed door de bodemdaling en erosie tijdens extreme stormen en de scheefstand van de waterspiegel in het bekken. De golfberekening gaat uit van een horizontale waterstand. Een nadere studie naar deze effecten is gewenst, omdat de gevoeligheidsanalyse (Bijlage G) heeft aangegeven dat hiermee een verdere reductie van de benodigde steendiktes mogelijk is. Deze onzekerheden zouden ook probabilistisch in rekening kunnen worden gebracht.

### Modelonzekerheden

De modelonzekerheden van de golf- en waterstandsberekening zijn in de waterbouwkundige geschiedenis nooit meegenomen aan de belastingkant. In de gevoeligheidsanalyse is een berekening gemaakt, waarbij ook deze onzekerheden probabilistisch in rekening zijn gebracht. Dit levert een aanzienlijke verhoging van de maatgevende golfbelasting op ( 9% bij Zierikzee ). Aanbevolen wordt om te onderzoeken of deze onzekerheden al in de deterministische sterkteberekening als een impliciete veiligheidsfactor zijn meegenomen, of dat de modelonzekerheden in het verleden nergens zijn meegenomen. De modelonzekerheden worden op dit moment onderzocht door TAW.

## 9. Referenties

- [ 1 ] Veilig getij, Beheer en gebruik van de stormvloedkering Oosterschelde, ervaring en bijstelling, onderbouwende nota evaluatie Oosterschelde, Nota nr. AX 91.090, Rijkswaterstaat, directie Zeeland, november 1991
- [ 2 ] Leidraad Toetsen op Veiligheid, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, augustus 1999.
- [ 3 ] Toets- en ontwerpregels, Projectburo Zeeweringen, februari 1999.
- [ 4 ] Rekenmodel Dijkbekleding, Hydra-Q, Documentatie, HKV lijn in water, augustus 1999
- [ 5 ] Case study Noord Schuddeland, TNO, 97-CON-R0752, oktober 1997
- [ 6 ] Audit Golfrandvoorwaarden Oosterschelde, J.A. Battjes, J.K. Vrijling, TU Delft, oktober 1999
- [ 8 ] De basispeilen langs de Nederlandse kust, ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen, RIKZ, mei 1995
- [ 9 ] Golfrandvoorwaarden Oosterschelde voor dijkbekledingen, concept, RIKZ A.T. Kamsteeg en J.H. Andorka Gál, 1 februari 1999.
- [ 10 ] Golfberekeningen Oosterschelde, rapport A246, Alkyon, juli 1998
- [ 11 ] Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen, Dienst Weg- en Waterbouwkunde Rijkswaterstaat, september 1996.
- [ 12 ] Inventarisatie sterkte gezette taludbekledingen in Nederland, samenvattend rapport CO-371780/23, Grondmechanica Delft, januari 1997
- [ 13 ] Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen, Rijkswaterstaat, TCRAND, september 1996
- [ 14 ] Faalkansanalyse veiligheidssysteem Oosterschelde, het Riemann/SIMPLIC-model, nota AX 93.003, Rijkswaterstaat Directie Zeeland, januari 1993

