

# Zeeveringen

Toetskader voor steenbekledingen  
langs de Oosterschelde

Pilot

Auteur: F.M. Stroeve  
Datum: 6 maart 2000





## Toetskader voor steenbekledingen langs de Oosterschelde

### Pilot

Dit rapport is het resultaat van een opdracht van projectbureau Zeeweringen aan het Waterbouw Innovatie Steunpunt van de Bouwdienst Rijkswaterstaat. De uitvoering van deze opdracht lag in de periode april 1999 en april 2000 en is begeleid door de werkgroep Toetskader Oosterschelde. In deze werkgroep hadden zitting:

Henk van den Bosch (voorzitter)	Rijkswaterstaat Directie Zeeland
Anne Marie de Jong (secretaris)	Rijkswaterstaat Directie Zeeland
Simon Vereeke	Rijkswaterstaat Directie Zeeland
Roy Stroeve	Rijkswaterstaat Bouwdienst WIS
Hans Janssen	Rijkswaterstaat Bouwdienst WIS
Harry de Looff	Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Jan Willem Seijffert	Rijksinstituut voor Kust en Zee
Sadina Korman	Provincie Zeeland
Hans van der Sande	Waterschap Zeeuwse Eilanden

Pilot Toetskader voor steenbekledingen langs de Oosterschelde	
Auteur: F.M. Stroeve	Vastgesteld door de voorzitter
Versie: 4	Paraaf: 
Datum: 6 maart 2000	Datum: 29 maart 2000
Documentnummer: PZDT-R-00020 inv	

## Inhoudsopgave

<b>1. Inleiding.....</b>	<b>5</b>
1.1 Probleemstelling.....	5
1.2 Doelstelling en leeswijzer .....	5
1.3 Werkwijze en besluitvorming .....	6
<b>2. Uitgangspunten .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Veiligheidsfilosofie .....</b>	<b>9</b>
3.1 De Wet op de Waterkeringen interpreteren .....	9
3.2 Conventionele veiligheidsfilosofie .....	10
3.3 Barcon-veiligheidsfilosofie .....	10
3.4 Voorgestelde veiligheidsfilosofie .....	11
<b>4. Aanpak van de pilot.....</b>	<b>13</b>
4.1 Keuze pilotvakken .....	13
4.2 Opstellen scenario's voor het toetskader.....	14
4.3 Maatgevende golfbelasting per waterstand per pilotvak.....	15
4.4 Reductie van de benodigde steendikte t.o.v. basisscenario .....	15
4.4.1 Gemiddelde reductie van benodigde steendikte over de hoogte .....	16
4.4.2 Gemiddelde reductie van de benodigde steendikte over de Oosterschelde .....	17
4.5 Inschatting toetsresultaat voor de hele Oosterschelde .....	17
4.5.1 Kenmerkende steenbekleding.....	17
4.5.2 Inschatten dijk lengtes langs de Oosterschelde met dezelfde toetsscore.....	19
4.6 Vergelijking van de scenario's .....	19
<b>5. Scenario's voor de hydraulische belasting .....</b>	<b>21</b>
5.1 Hydraulische belasting van het basisscenario .....	21
5.2 Methode volgens Barcon .....	22
5.3 Probabilistische scenario's voor hydraulische belasting.....	23
5.3.1 Hydraulisch systeem .....	24
5.3.2 Gecombineerde wind-waterstandstatistiek .....	26
5.3.3 Overige kansverdelingen .....	27
5.3.4 Twee manieren voor de maatgevende golfbelasting .....	28
5.3.5 Probabilistische berekeningswijze .....	29
5.4 Ingrijpen met de kering .....	30
<b>6. Scenario's voor stabiliteitsrelaties.....</b>	<b>31</b>
6.1 Reststerkte .....	32
6.2 Inklemming .....	33
<b>7. Resultaten van de pilot .....</b>	<b>35</b>
7.1 Nauwkeurigheid van de pilot .....	35
7.1.1 Probabilistische scenario's.....	35
7.1.2 Inklemmingen.....	35
7.1.3 pilotresultaat.....	35
7.2 Maatgevende belastingen per pilotvak per waterstand .....	36
7.3 Reducties ten opzichte van het basisscenario .....	36
7.4 Toetsresultaat voor de hele Oosterschelde.....	37
7.5 Praktische toepasbaarheid.....	37
<b>8. Aanbevelingen voor het toetskader .....</b>	<b>39</b>
8.1 Voorstel toetskader .....	39
8.2 Overige aanbevelingen .....	40
<b>9. Referenties .....</b>	<b>41</b>

- Bijlage A** Kenmerkende stabiliteitsrelatie
- Bijlage B** Bepaling van waterstanden met IMPLIC
- Bijlage C** Bepaling golfparameters met SWAN
- Bijlage D** Wind-waterstandstatistiek volgens het Volkermodel
- Bijlage E** Verificatie
- Bijlage F** Resultaten per pilotvak
- Bijlage G** Gevoeligheidsanalyse
- Bijlage H** Overzichtskaarten

## 1. Inleiding

Elke 5 jaar dienen alle steenbekledingen van de primaire waterkeringen in Nederland te worden getoetst op veiligheid en aangepast, waar de veiligheid onvoldoende kan worden gewaarborgd. Als eerste stap is hiertoe in 1996 een globale inventarisatie [ 12 ] uitgevoerd<sup>1</sup>, gebaseerd op de vigerende golfrandvoorwaarden volgens het randvoorwaardenboek [ 13 ]. Bij de Westerschelde zijn de toetsingen van de steenbekledingen inmiddels in volle gang, gebaseerd op een toetskader, welke uitgaat van de Leidraad Toetsing op Veiligheid (LTV) [ 2 ].

Ook de steenbekledingen langs de Oosterschelde zullen getoetst moeten worden. De hydraulische situatie in de Oosterschelde wijkt sterk af van de Westerschelde, omdat extreem hoge waterstanden niet meer kunnen voorkomen als gevolg van de aanwezigheid van de stormvloedkering. Voor de Oosterschelde zijn nieuwe golfrandvoorwaarden [ 9 ] (in concept) beschikbaar gekomen, waarbij de invloed van de stormvloedkering zeer globaal in rekening is gebracht.

### 1.1 Probleemstelling

Indicatieve berekeningen geven aan dat eenzelfde toetsmethodiek als de Westerschelde gecombineerd met de recente golfrandvoorwaarden zal leiden tot het afkeuren van het merendeel van de bekledingen langs de Oosterschelde. Het afkeuringspercentage van de bekledingen langs de Oosterschelde lijkt hiermee aanmerkelijk hoger te zijn dan tijdens de inventarisatie in 1996 was ingeschat. Bovendien zijn alle dijken in de veiligheidsevaluatie van 1991 (het project "VEOS" [ 1 ]) voldoende veilig bevonden, na de gedeeltelijke versterking van de bekleding in de periode '75 tot '82<sup>2</sup>. De vraag is daarmee gerezen of de invloed van de stormvloedkering wordt onderschat in de huidige aanpak.

Sinds de start van de toetsingen langs de Westerschelde hebben zich voortdurend kennisontwikkelingen voorgedaan. Recent zijn er nieuwe onderzoeksresultaten (resultaten van onderzoek naar inklemming) beschikbaar gekomen, waarmee een naar verwachting minder conservatieve toetsing geconcretiseerd kan worden.

### 1.2 Doelstelling en leeswijzer

Het doel van de studie is om een toetsmethode te ontwikkelen, waarmee de gezette steenbekledingen langs de Oosterschelde zo uitgekiend mogelijk getoetst kunnen worden, mede gelet op de invloed van de stormvloedkering en recente kennisontwikkelingen.

De uitgangspunten zijn onderwerp van hoofdstuk 2.

#### Veiligheidsfilosofie

De uitwerking van deze toetsmethode vergt een aantal aannamen en benaderingen die moeten aansluiten bij de gehanteerde normstelling volgens de Wet op de Waterkering. Zo kan men spreken van een veiligheidsfilosofie voor de steenbekledingen. Deze is in hoofdstuk 3 gedefinieerd. De invulling van deze veiligheidsfilosofie vormt het toetskader, dat naast de te hanteren stabiliteitsrelaties bestaat uit een set hydraulische randvoorwaarden per dijkvak.

<sup>1</sup> Bij de inventarisatie van 1996, waarbij alleen de steenbekledingen boven gemiddeld hoog water zijn meegenomen (zie rapport GD CO-311780/23), is de volgende inschatting gemaakt op basis van de eenvoudige toetsing en uitgedrukt in een percentage van de oppervlakte van de steenbekleding:

	afgekeurd	nader onderzoek	goedgekeurd
Westerschelde	65 %	30 %	5 %
Oosterschelde	10 %	35 %	55 %

<sup>2</sup> Op een aantal plaatsen langs de Oosterschelde is de bekleding versterkt voornamelijk door asfalt overlaging in de geconcentreerde golfaanvalszone, geïntroduceerd door het sluitingsregiem van de kering. Bij de partiële dijkversterking voor de dijken langs de Oosterschelde, die is uitgevoerd in de periode 1975-1982, zijn de berm en de kruin op hoogte gebracht. Deze werken zijn gebaseerd op een ontwerpwaterstand met een kans van 1/500 per jaar, zonder rekening te houden met de aanwezigheid van de kering. Verder is de bekleding tot de nieuwe berm opgetrokken. Voor de dijken langs het kanaal van Zuid-Beveland is wel uitgegaan van de aanwezigheid van de kering (lagere ontwerpwaterstand).

**Pilot**

De invulling van het toetskader kan op verschillende manieren gebeuren. Deze methodes zijn in een pilot op bruikbaarheid onderzocht voor een beperkt aantal dijkvakken. De aanpak van de pilot is onderwerp van hoofdstuk 4.

In de hoofdstukken 5 en 6 volgen beschrijvingen van de te beschouwen alternatieve invullingen van het toetskader, scenario's genoemd. In hoofdstuk 5 worden de scenario's voor het in rekening brengen van de hydraulische belasting gegeven. Hoofdstuk 6 beschrijft de te onderzoeken scenario's voor de stabiliteitsrelaties.

**Voorstel toetskader**

Uiteindelijk is een voorstel voor een toetskader gedaan op basis van de resultaten van de pilot. Hierbij wordt het toetskader gekozen waarmee zo uitgekiend mogelijk wordt voldaan aan de veiligheidsfilosofie. Hierbij spelen de inzichtelijkheid en toepasbaarheid van het toetskader voor de gehele Oosterschelde een rol. Hoofdstuk 7 geeft een beschrijving en analyse van de resultaten van de pilot, waarna hoofdstuk 8 een aanbevelingen bevat voor het te hanteren toetskader voor de steenbekledingen langs de Oosterschelde.

**1.3 Werkwijze en besluitvorming**

De doelstelling is verwezenlijkt en in dit rapport verwoord door een werkgroep van deskundigen van de betrokken organisaties: Waterschap Zeeuwse Eilanden, Provincie Zeeland en Rijkswaterstaat.. Binnen Rijkswaterstaat zijn de DWW, RIKZ, de Bouwdienst en directie Zeeland betrokken, waarbij het projectbureau Zeeweringen zorg heeft gedragen voor de begeleiding van de werkgroep.

De leden van de werkgroep hebben de resultaten teruggekoppeld met de betrokken bestuurders binnen de betreffende organisaties.

de opdrachtgever van deze studie is ir. A. Hoekstra van Rijkswaterstaat directie Zeeland, die de afstemming met het Hoofdkantoor van Rijkswaterstaat heeft verzorgd.

Het voorstel voor het toetskader, zoals verwoord in dit rapport, zal ter goedkeuring worden voorgelegd aan:

- de opdrachtgever, ir. A. Hoekstra
- de Technische Adviescommissie voor Waterkeringen (TAW)
- de werkgroep TC-Rand

Tevens zal dit rapport ter toetsing worden voorgelegd aan de auditcommissie, die eerder de golfbrandvoorwaarden voor de Oosterschelde heeft geaudit.

## 2. Uitgangspunten

Belangrijke uitgangspunten van de studie zijn achtereenvolgens:

- In de studie worden de effecten van de verschillende alternatieve toetskaders met elkaar vergeleken. Hiertoe zijn de effecten slechts met oriënterende berekeningen ingeschat. Er kan dan ook geen absolute waarde aan deze effecten worden gegeven. De toetsing van de bekledingen zelf wordt niet binnen deze studie uitgevoerd.
- De studie wordt gebaseerd op meest recente kennis
- De studie beperkt zich tot de gezette steenbekleding.
- Het beheer van de stormvloedkering wordt niet aangepast. Verderop in dit hoofdstuk volgt een beschrijving van het beheer van de kering.
- Er wordt zoveel mogelijk vastgehouden aan de Leidraad Toetsing op Veiligheid (LTV) [ 2 ].
- Het toetskader sluit zoveel mogelijk aan op bestaande toetskaders en ontwikkelingen in het kader van landelijke toetsingen van waterkeringen, zoals:
  - De vernieuwing van het randvoorwaardenboek, dat in opdracht van de DWW wordt opgesteld.
  - Westerschelde-toetsmethode  
Dit toetskader is toegepast voor de steenzettingen langs de Westerschelde. Hiervoor zijn stabiliteitsrelaties gedefinieerd in het "handboek toetsing van steenzettingen langs de Westerschelde" [ 3 ].
  - Barcon-methode  
De Barcon-methode, beschreven in "Veilig getij" [ 1 ] is destijds gebruikt bij de bouw van de stormvloedkering in de Oosterschelde. Hierop is het beheer van de kering en de veiligheid van de dijken rondom de Oosterschelde gebaseerd.
  - Hydra-Q-methode  
Deze toetsmethodiek, beschreven in [ 4 ] is opgesteld in het kader van het toetsen van de steenbekledingen voor de dijken langs het IJsselmeer. De methodiek is analoog aan Hydra-M voor kruinhoogten.

### Beheer van de kering

Het belangrijkste verschil met de Westerschelde is de aanwezigheid van de stormvloedkering. Hierdoor treden extreem hoge waterstanden niet meer in de Oosterschelde op. Op grond van de Barcon studie is gekozen om de kering te sluiten bij een voorspelde waterstand van NAP + 3.00 meter gecombineerd met een wisselstrategie (1 - 2 - 1) voor het peil op het bekken.

Basisgedachte achter de wisselstrategie is dat op deze wijze de geconcentreerde golfaanval op de glooiingen over verschillende niveau's kan worden verspreid. De wisselstrategie is gebaseerd op het feit dat de kering tijdens een storm bij laag water tijdelijk open gaat, waarna de kering bij het naderende hoogwater weer gesloten wordt. Als de normale sluitstrategie faalt wordt de kering automatisch gesloten bij een gemeten waterstand van NAP +3.00 m. Dit gebeurt naar verwachting eens in de 100 sluitingen.

### 3. Veiligheidsfilosofie

In dit hoofdstuk wordt de veiligheidsfilosofie gedefinieerd. Deze is gebaseerd op de Wet op de Waterkering, die ruimte tot interpretatie overlaat. In Nederland zijn er in de loop der tijd verschillende veiligheidsfilosofieën ontwikkeld, die gebaseerd zijn op verschillende interpretaties van de wet.

Om een eenduidige veiligheidsfilosofie te verkrijgen moet een aantal belangrijke beslispunten worden ingevuld. Deze beslispunten, die gegeven zijn in paragraaf 3.1, bepalen de interpretatie van de wet en vormen de veiligheidsfilosofie.

Bestaande toetsmethodes voor steenbekledingen kunnen voor wat betreft de veiligheidsfilosofie grofweg worden ingedeeld in twee typen. De eerste is een conventionele interpretatie, zoals gehanteerd bij het toetsen van de bekleding langs de Westerschelde [ 3 ] en bij de studie Hydra-Q [ 4 ]. De tweede is gehanteerd bij Barcon [ 1 ]. In de paragrafen 3.2 en 3.3 zijn beide methodes globaal beschreven, waarbij telkens wordt gerefereerd aan de beslispunten van paragraaf 3.1.

Tenslotte is in paragraaf 3.4 de veiligheidsfilosofie gedefinieerd die wordt voorgesteld voor de toetsing van de steenbekledingen langs de Oosterschelde.

#### 3.1 De Wet op de Waterkeringen interpreteren

Volgens deze wet wordt de veiligheidsnorm uitgedrukt in:

"een gemiddelde overschrijdingskans<sup>3</sup> per jaar van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen beperkende factoren". Bij deze maatgevende belasting moet de constructie nog voldoende standzeker zijn. Voor de waterkeringen langs de Oosterschelde geldt een veiligheidsnorm van  $2.5 \cdot 10^{-4}$  per jaar.

Bij de interpretatie van de wet gelden de volgende beslispunten:

1. De vertaling van veiligheidsnorm naar bekledingsnorm  
De wettelijke normstelling is voornamelijk gebaseerd op het bepalen van de kruinhoogte, gezien de beschouwing van de "hoogste hoogwaterstand". Voor bekledingen kunnen ook lagere waterstanden leiden tot bezwijken.
2. Dijkvakbenadering of dijkkringbenadering  
De vraag is of de norm van toepassing is op een dijkvak of op de gehele dijkkring. Bij een dijkkringbenadering wordt de norm gelijkgesteld aan de kans dat ergens in de dijkkring de dijk wordt overbelast, terwijl bij een dijkvakbenadering meer de overbelasting van een dwarsprofiel wordt beschouwd. Een dijkkringbenadering wordt in het kader van de "Marsroute" onderzocht. In de mogelijkheid van een dijkkringbenadering is in de huidige Wet reeds voorzien (artikel 3.2). Een besluit om over te gaan op dit artikel moet door de minister van Verkeer en Waterstaat worden genomen.
3. Overbelastingskans of inundatiekans  
De Wet op de Waterkering schrijft een overbelastingskans voor. Vooruitlopend op nieuwe wetgeving kan ook een inundatiekans worden beschouwd. In deze kans is naast de kans op een te grote belasting ook de kans op een te geringe sterkte in rekening gebracht. De toepasbaarheid van de inundatiekans is tevens onderwerp van de "Marsroute".
4. Manier waarop reserveveiligheid wordt toegepast  
Volgens de norm moet bij een bepaalde maatgevende belasting de constructie nog voldoende standzeker zijn. Deze standzekerheid onder maatgevende omstandigheden wordt aangegeven met reserveveiligheid. In de waterbouwkundige praktijk is de kans op inundatie een orde 10% van de kans op overbelasting van een dijk. Deze reserveveiligheid kan impliciet of expliciet in rekening worden gebracht.

<sup>3</sup> Een kleine gemiddelde overschrijdingskans per jaar is bij benadering gelijk aan de gemiddelde overschrijdingsfrequentie per jaar.

5. Wat is de definitie van "bezwijken"

Een belangrijke vraag is wat de definitie van bezwijken is. Wordt bijvoorbeeld als criterium gesteld bij beginnende beweging van de blokken van de bekleding of pas bij voortgaande erosie van de onderliggende grondlagen? Hierbij kan in meer of mindere mate schade worden geaccepteerd.

### 3.2 Conventionele veiligheidsfilosofie

Een conventionele veiligheidsfilosofie is onder andere toegepast bij de toetsing van de steenbekledingen langs de Westerschelde en volgens Hydra-Q en is analoog aan de LTV.

De steenbekleding moet bij een belasting op de bekleding met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de veiligheidsnorm nog voldoende reserveveiligheid hebben tegen bezwijken. De veiligheidsnorm is voor Zeeland 1/4000 per jaar.

Hierbij wordt de veiligheidsnorm voor de bekleding gelijkgesteld aan de veiligheidsnorm voor de gehele dijk. Er is sprake van een dijkvakbenadering uitgaande van een overbelastingskans. De sterkte is deterministisch meegenomen, waarbij de mate van reserveveiligheid impliciet in stabiliteitsrelaties en hydraulische randvoorwaarden is opgenomen, door telkens een benadering toe te passen die aan de veilige kant is. Het criterium wanneer sprake is van bezwijken of overbelasten is minder duidelijk. Hier laat ook de LTV mogelijkheden open om al dan niet schade toe te staan. Bij de steenbekledingen langs de Westerschelde wordt ervan uitgegaan dat de totale dijk bezwijkt zodra er beginnende schade aan de top laag optreedt. Er wordt dan al gesproken van beginnende schade als een individueel blok enige centimeters uit de bekleding wordt gelicht.

### 3.3 Barcon-veiligheidsfilosofie

De Barcon-veiligheidsfilosofie luidt:

De infrastructuur rond het bekken, bestaande uit de stormvloedkering plus de dijken en het beheer daarvan dienen zodanig te zijn dat de kans op inundatie van de gebieden rondom het bekken per gebied kleiner is dan  $2.5 \cdot 10^{-5}$  per jaar.

De compartimenteringsdammen vormen hierop een uitzondering. Hiervoor geldt een inundatiekans van  $2.5 \cdot 10^{-4}$  per jaar.

Barcon gaat uit van een dijkvakbenadering met een inundatiekans in plaats van een overbelastingskans. Hierbij is de sterkte van de bekleding probabilistisch in rekening gebracht. Met een probabilistische benadering is de vertaling van de norm voor de gehele dijk naar de bekleding uitgevoerd. Waar de norm uitgaat van een inundatiekans van  $2.5 \cdot 10^{-5}$  per jaar, is voor de bekleding een "orde"  $10^{-5}$  gehanteerd.

Bij de sterkte is zowel de weerstand van de top laag als de reststerkte in rekening gebracht. De bekleding is als bezwijken beschouwd wanneer de bekleding op een locatie geheel is geërodeerd. Er werd onder maatgevende hydraulische omstandigheden dus enige beginschade aan de bekleding toegestaan, waarbij gebruik is gemaakt van een probabilistisch bezwijkmodel. In dit bezwijkmodel is verondersteld dat naast de golfhoogte ook de duur van golfbelasting van belang is, die wordt bepaald door de stagnantieduur van de waterstand op het afgesloten bekken. Om de belastingduur te verkorten en dus de faalkans te beperken is destijds gekozen om het beheer van de kering in te richten met een "wisselstrategie", waarbij de stagnantiepeilen bij achtereenvolgende sluitingen steeds verschillen.

De reserveveiligheid is bij Barcon expliciet beschouwd. Dit was mogelijk omdat naast de belasting ook de sterkte probabilistisch in rekening is gebracht. Deze bedraagt orde 10%. In de maatgevende storm is de bezwijkkans kleiner dan orde 10%.

De veiligheidsfilosofie voor de steenbekledingen is volgens Barcon gebaseerd zijn op een probabilistisch bezwijkmodel. Als gevolg van nieuwe inzichten wordt dit bezwijkmodel in de huidige praktijk niet gebruikt en wordt als onvoldoende betrouwbaar gezien. Daarom wordt de veiligheidsfilosofie volgens Barcon in de pilot niet toegepast.

### 3.4 Voorgestelde veiligheidsfilosofie

De voorgestelde veiligheidsfilosofie voor de steenbekledingen langs de Oosterschelde luidt:

De steenbekledingen rond de Oosterschelde dienen zodanig sterk te zijn dat bij een maatgevende hydraulische belasting van een dijkvak met een overschrijdingskans van  $2.5 \cdot 10^{-4}$  per jaar er impliciet een voldoende reserveveiligheid bestaat tegen bezwijken van de waterkering. Hierbij wordt zoveel mogelijk rekening gehouden met de invloed van de aanwezigheid en het beheer van de stormvloedkering.

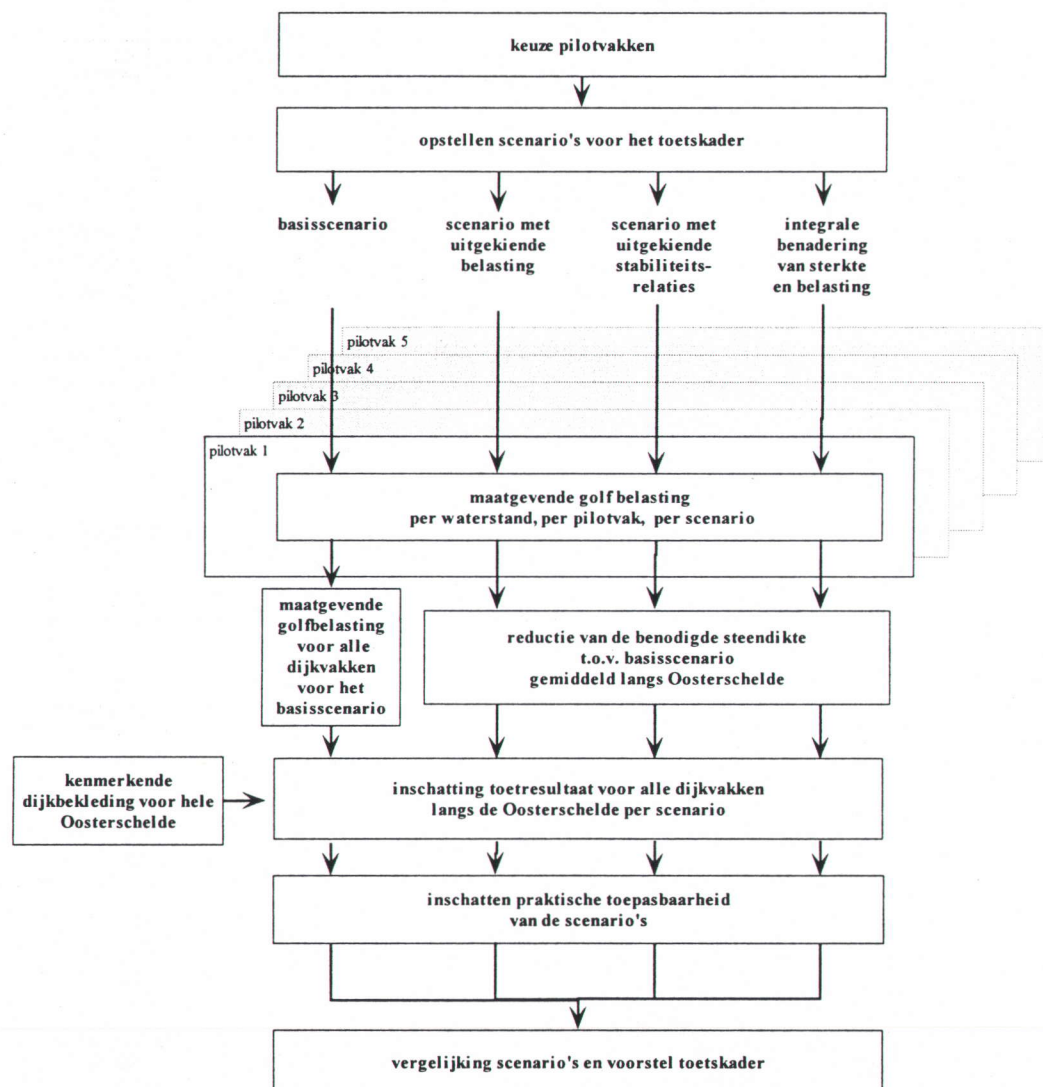
Belangrijk uitgangspunt was dat wordt aangesloten bij de conventionele veiligheidsfilosofie. Er wordt dus niet vooruitgelopen op een eventueel toekomstige beslissing op over te stappen op artikel 3.2 van de Wet op de Waterkering (onderzocht in de Marsroute). Er wordt geen dijkkringbenadering gehanteerd en er wordt niet uitgegaan van een norm in de vorm van een inundatiekans. Een aanvullende reden hiervoor is dat de kennis ontbreekt om de sterkte van een steenbekleding op een goede manier probabilistisch in rekening te brengen.

Een belangrijke aanvulling op de conventionele veiligheidsfilosofie die hier wordt toegepast betreft de basisgedachte van de VEOS-studie [ 1 ]. Deze gedachte is dat het beheer van de kering volgens de wisselstrategie een extra veiligheid vormt (impliciet), waardoor zowel de belastingen als de sterkte zo uitgekiend mogelijk in rekening kunnen worden gebracht, door niet te veel veiligheid op veiligheid te stapelen.

## 4. Aanpak van de pilot

Besloten is om de keuze van het toetskader te baseren op de resultaten van een pilot. Het doel van de pilot is om een toetsmethode te vinden, waarmee zo uitgekiend mogelijk getoetst kan worden en waarbij wordt voldaan aan de veiligheidsfilosofie. Vanwege inzichtelijkheid en eenvoud is deze pilot globaal van aard en wordt uitgevoerd voor een beperkt aantal dijkvakken.

In dit hoofdstuk is stap voor stap aangegeven hoe de pilot is uitgevoerd. Dit is schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 1: Schematische weergave van de aanpak van de pilot

### 4.1 Keuze pilotvakken

Om het effect voor de gehele Oosterschelde te kunnen kwantificeren zijn verspreid over de Oosterschelde 5 pilotvakken gekozen. De keuze van de pilotvakken is min of meer arbitrair. Wel zijn vakken gekozen waarbij geldt dat de hydraulische belasting op het talud relatief groot is, weergegeven door het product van  $H_s$  en  $T_p$  (zie paragraaf 4.3). De ligging van de pilotvakken is weergegeven in Bijlage H. Hierin is ook het product van  $H_s$  en  $T_p$  bij de waterstand NAP + 2.00 meter gegeven volgens de recent afgegeven golfbrandvoorwaarden van RIKZ [9].

In Tabel 1 is een nadere omschrijving van de pilotvakken gegeven. Bovendien zijn hierin ook de vigerende toetspeilen gegeven volgens het Randvoorwaardenboek [ 11 ].

pilot-vak	gebied	naam dijkvak	naburig dorp/stad	dijkvak-nummer <sup>4</sup>	kilometering <sup>5</sup>	Toetspeil [m + NAP]
1	Schouwen Duivenland	ingang havenkanaal	Zierikzee	157, west	18.8	3.45
2	Noord Beveland	inlaag	Wissekerke	14	186	3.45
3	Zuid Beveland	polder Brede Watering	Kattendijke	46	162	3.45
4	Tholen	Schakerloopolder	Strijenham	88	107	3.85
5	St. Philipsland	Willempolder	Sluis	130, zuid	64	3.70

Tabel 1: Beschrijving pilotvakken

## 4.2 Opstellen scenario's voor het toetskader

Om te komen tot een voorstel voor een te hanteren toetskader zijn een aantal alternatieve toetskaders, scenario's genoemd, geanalyseerd. De effecten van de scenario's worden ingeschat ten opzichte van het zogenaamde basisscenario. Op deze manier kan een goede afweging worden gemaakt.

Het basisscenario bestaat uit stabiliteitsrelaties zoals gehanteerd bij de toetsing van steenzettingen langs de Westerschelde en recent afgegeven randvoorwaarden voor de Oosterschelde [ 9 ].

Naast het basisscenario is een tweetal typen scenario's opgesteld die betrekking hebben op de volgende vragen:

- Op welke manier kan de maatgevende golfbelasting uitgekiender worden bepaald ? Deze vraag is onderzocht in hoofdstuk 5.
- Zijn er aanpassingen van de stabiliteitsrelaties mogelijk, waarmee uitgekiender kan worden getoetst ? In hoofdstuk 6 is deze vraag onderzocht. Hierbij wordt zoveel mogelijk geanticipeerd op te verwachten onderzoeksresultaten.

Hoofdstukken 5 en 6 leiden tot een keuze welke scenario's worden onderzocht in de pilot.

### Effecten van de scenario's

Het effect van de verschillende scenario's is in de pilot op vier manieren aangegeven:

1. Maatgevende golfbelasting per waterstand per pilotvak.  
De aanpak is beschreven in paragraaf 4.3, en de resultaten zijn gegeven in paragraaf 8.1.
2. Reductie van benodigde steendiktes  
Gemiddelde reductie over de Oosterschelde van de minimaal benodigde steendikte ten opzichte van het basisscenario. De aanpak is beschreven in paragraaf 4.4, en de resultaten zijn gegeven in paragraaf 8.2.
3. Toetsresultaat voor de hele Oosterschelde  
De aanpak is beschreven in paragraaf 4.5, en de resultaten zijn gegeven in paragraaf 8.3.
4. Praktische toepasbaarheid van de scenario's.  
De aanpak is beschreven in paragraaf 4.6, en de resultaten zijn gegeven in paragraaf 8.4.

N.B.: Benadrukt wordt dat de effecten van de scenario's met oriënterende berekeningen zijn ingeschat om onderlinge vergelijking mogelijk te maken. Er mag geen absolute waarde aan de berekende effecten worden gegeven.

<sup>4</sup> De dijkvaknummering komt overeen met de nummering volgens het Randvoorwaardenboek [ 13 ].

<sup>5</sup> De kilometering is gebaseerd op het door het Waterschap Zeeuwse Eilanden opgestelde referentiestelsel. De nummering begint bij de aansluiting van de stormvloedkering op Schouwen Duivenland en volgt over de kruinlijn van de waterkering langs de Oosterschelde tot aan de aansluiting op de stormvloedkering op Noord Beveland.

### 4.3 Maatgevende golfbelasting per waterstand per pilotvak

Per scenario is de maatgevende golfbelasting bepaald voor de verschillende beschouwde pilotvakken voor verschillende waterstanden. Deze golfbelasting bestaat naast een significante golfhoogte  $H_s$  uit een piekperiode  $T_p$ . Bovendien is een parameter afgeleid, waarmee de invloed van  $H_s$  en  $T_p$  en stabiliteitsverhogende effecten op de sterkte gecombineerd kan worden ingeschat. Hiertoe is in de pilot de zogenaamde kenmerkende belasting gedefinieerd.

#### Kenmerkende belasting

Met de kenmerkende belasting kunnen belastingverlagende als stabiliteitsverhogende effecten van de verschillende scenario's in beeld worden gebracht. Dit biedt de mogelijkheid om binnen de pilot de scenario's onderling te vergelijken, zonder dat alle eigenschappen van de bekledingen langs de Oosterschelde in rekening hoeven te worden gebracht. Bovendien is het aanwezige type bekleding voor ieder gekozen scenario gelijk en leidt dus niet tot verschillen tussen de scenario's. Dit leidt in de pilot tot een aanzienlijke tijdsbesparing.

De kenmerkende belasting is zodanig gedefinieerd dat hij lineair gerelateerd is aan de minimaal benodigde steendikte en is afhankelijk van de golfbelasting en stabiliteitsverhogende factoren. De afleiding van de volgende formulering voor de kenmerkende belasting is gegeven in Bijlage A.

$$S_k = \frac{1}{F} (H_s T_p)^{2/3}$$

waarin:

- $S_k$  = kenmerkende belasting [ (ms)<sup>2/3</sup> ]
- $H_s$  = significante golfhoogte [ m ]
- $T_p$  = piekperiode [ s ]
- $F$  = stabiliteitsverhogende factor voor oriënterende berekening als gevolg van inklemming, etc. (zie hoofdstuk 6).

Per scenario en voor alle pilotvakken is voor verschillende waterstanden de kenmerkende belasting bepaald met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar. Dit is de maatgevende kenmerkende belasting.

De beschouwde waterstanden zijn: NAP, NAP + 1.0 meter, NAP + 2.0 meter, NAP + 3.0 meter en NAP + 3.5 meter. De waterstand NAP + 3.50 meter is gekozen in plaats van NAP + 4.0 meter, omdat het toetspeil overal onder NAP + 4.0 meter ligt. Het toetspeil is immers de maximale waterstand die kan optreden bij een situatie met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar.

De resultaten van zowel de maatgevende  $H_s$  en  $T_p$  als de maatgevende kenmerkende belasting zijn beschreven in Bijlage F.

### 4.4 Reductie van de benodigde steendikte t.o.v. basisscenario

De reductie van de minimaal benodigde steendikte ten opzichte van het basisscenario wordt gemiddeld over alle steenbekledingen langs de Oosterschelde aangegeven. De bepaling van deze gemiddelde reductie gebeurt per scenario in twee stappen:

1. bepaling van de reductie van de benodigde steendikte gemiddeld over de hoogte langs het talud van de pilotvakken
2. bepaling van de reductie van de benodigde steendikte gemiddeld over de lengte langs de Oosterschelde.

De reductie van de benodigde steendiktes van een bepaald scenario ten opzichte van het basisscenario is gelijk aan de reductie van de maatgevende kenmerkende belasting, omdat de kenmerkende belasting recht evenredig is met de minimaal benodigde steendikte.

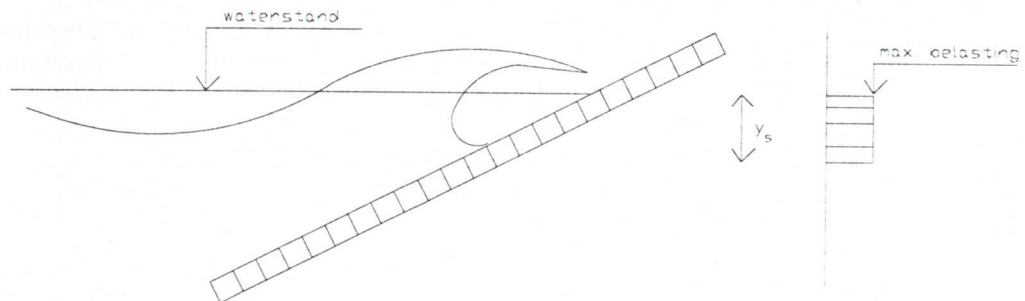
De gemiddelde reductie over de hoogte en over de lengte is respectievelijk beschreven in paragraaf 4.4.1 en 4.4.2.

#### 4.4.1 Gemiddelde reductie van benodigde steendikte over de hoogte

Om de gemiddelde reductie van de benodigde steendikte over de hoogte te bepalen worden allereerst de maatgevende kenmerkende belastingen bepaald voor verschillende niveau's voor de beschouwde scenario's en pilotvakken. Op een bepaald niveau kan de bekleding worden belast door golven die optreden bij verschillende waterstanden. Bij een bepaalde waterstand grijpt de golfbelasting namelijk verspreid over verschillende niveau's van de bekleding aan. De maatgevende kenmerkende golfbelasting per niveau is daarom afgeleid van de maatgevende golfbelasting per waterstand, die is beschreven in paragraaf 4.3.

##### Maatgevende kenmerkende belasting per niveau

Om de maatgevende kenmerkende belasting te bepalen per niveau is gebruik gemaakt van het volgende belastingmodel. Binnen deze pilot is aangenomen dat de belasting plaatsvindt over de niveau's tussen de waterstand en  $y_s$  onder de waterstand.



Figuur 2: Schematische weergave van de aangrijpingspunten van de belasting op de steenbekleding

$$y_s = H_s \tan \alpha \left( 0.5 + 0.22 \frac{\xi}{(\tan \alpha)^{1.5}} \right)$$

$$\text{met als maximum: } y_s \leq 1.8 H_s$$

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}}, \quad L_0 = \frac{g T_p^2}{2\pi}$$

waarin:

- $H_s$  = significante golfhoogte [ m ]
- $\alpha$  = taludhelling [ ° ]
- $\xi$  = brekerparameter [ - ]
- $g$  = zwaartekrachtversnelling [ m/s<sup>2</sup> ]
- $T_p$  = piekperiode [ s ]

##### Reductiepercentage per niveau

De reductie van de minimaal benodigde steendikte is aangegeven in de vorm van een reductiepercentage ten opzichte van het basisscenario en is voor een bepaald niveau gelijk aan:

$$r_D = 1 - \frac{S_k}{S_{k,basis}}$$

waarin:

- $r_D$  = reductiepercentage voor de benodigde steendikte ten opzichte van het basisscenario
- $S_k$  = kenmerkende belasting
- $S_{k,basis}$  = kenmerkende belasting van het basisscenario

De gemiddelde reductie van de benodigde steendikte over de hoogte van het talud is gelijk aan de gemiddelde reductie van de maatgevende kenmerkende belasting per niveau over de

hoogte van het talud. Per pilotvak zijn de gemiddelde reducties over de hoogte van het talud bepaald ten opzichte van het basisscenario en zijn gegeven in paragraaf 8.2. Evenals bij de maatgevende belasting is hierbij het niveau van NAP + 4.0 meter niet meegenomen, omdat het toetspeil overal lager ligt dan NAP + 4.00 meter.

#### 4.4.2 Gemiddelde reductie van de benodigde steendikte over de Oosterschelde

De gemiddelde reductie over de hoogte van het talud per pilotvak is vertaald naar de hele Oosterschelde. Eerst is hiertoe globaal ingeschat voor welk deel van de Oosterschelde het dijkvak kenmerkend is, qua golfbelasting. Deze kenmerkende dijkdelen zijn aangegeven in Bijlage H. De lengtes van de kenmerkende dijkdelen zijn ingeschat en vertaald naar een percentage van de dijk lengte langs de Oosterschelde. Deze percentages zijn gegeven in onderstaande tabel.

Pilotvak	naburig dorp/stad	dijkvaknummer	kenmerkend lengte %
1	Zierikzee	157, west	20%
2	Wissekerke	14	14%
3	Kattendijke	46	17%
4	Strijenham	88	20%
5	Sluis	130, zuid	29%

Tabel 2: Kenmerkende lengtepercentages per pilotvak

Deze lengtepercentages vormen wegingsfactoren. Vermenigvuldiging van de lengtepercentages met de gemiddelde reducties van de benodigde steendiktes over de hoogte per pilotvak en sommatie over alle pilotvakken leidt tot het gemiddelde reductiepercentage voor de hele Oosterschelde. Deze reductiepercentages zijn gegeven in paragraaf 8.2.

### 4.5 Inschatting toetsresultaat voor de hele Oosterschelde

#### 4.5.1 Kenmerkende steenbekleding

Om een goede inschatting te kunnen maken van het toetsresultaat van de verschillende scenario's voor de hele Oosterschelde, moeten in principe de eigenschappen van de steenbekledingen van alle dijkvakken langs de Oosterschelde bekend zijn.

Om veel tijd te besparen en omdat er nog geen resultaten van een nadere inventarisatie bekend zijn, is een kenmerkende bekleding voor de Oosterschelde bepaald, die over de hele Oosterschelde gelijk is verondersteld. Een gedetailleerdere bepaling van alle bekledingseigenschappen zal naar verwachting weinig invloed hebben op de onderlinge vergelijking van de verschillende scenario's.

Hierbij is uitgegaan van de inventarisatie van de steenbekledingen van GD [ 12 ]. Deze inventarisatie resulteerde in een globaal inzicht van de bekledingseigenschappen langs de Oosterschelde. Bovendien leverde dit een inschatting op van het te verwachten toetsresultaat langs de Oosterschelde, uitgaande van een set golfrandvoorwaarden volgens het Randvoorwaardenboek [ 13 ].

#### Kenmerkende bekledingseigenschappen

De kenmerkende steenbekleding bestaat uit zuilen, met een dichtheid van 2300 kg/m<sup>3</sup> (beton) en een taludhelling van 1 : 3.5, die kenmerkend is voor de Oosterschelde.

#### Kenmerkende stabiliteitsrelatie

De stabiliteit wordt hierbij aangegeven door een kenmerkende stabiliteitsrelatie. Hiervoor is het black-Box model type 1 genomen, die doorgaans wordt gebruikt bij de globale toetsing van zuilen op een filter volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid [ 2 ].

Hierbij kan de toetsing resulteren in een viertal mogelijke scores: goed, twijfel, geavanceerd en onvoldoende. Op de gevolgen van deze toetsscores wordt hier niet ingegaan. Voor meer informatie wordt verwezen naar de leidraad.

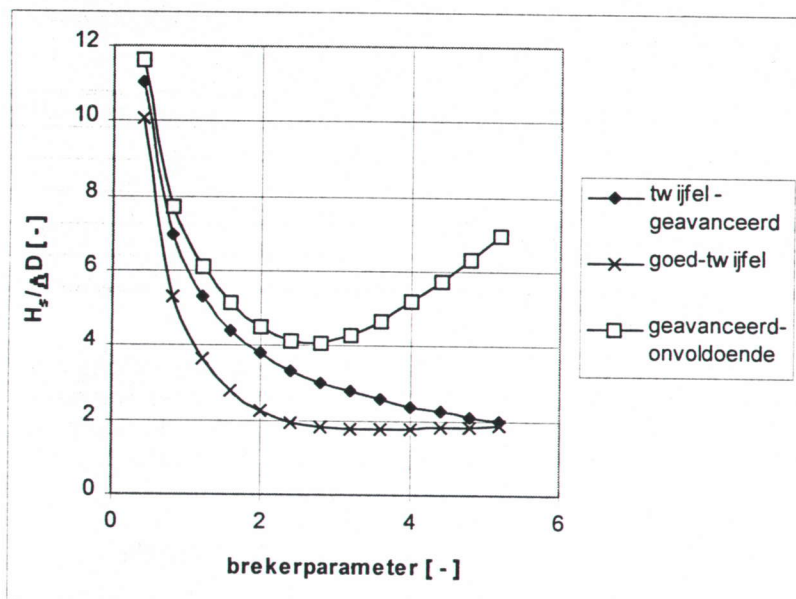
Om de toetsscore per dijkvak in te schatten zijn per bekleding de brekerparameter  $\xi$  en de sterkteparameter  $\frac{H_s}{\Delta D}$  bepaald.

waarin:

$\Delta$  = relatieve dichtheid van de bekleding [ - ]

$D$  = steendikte [ m ]

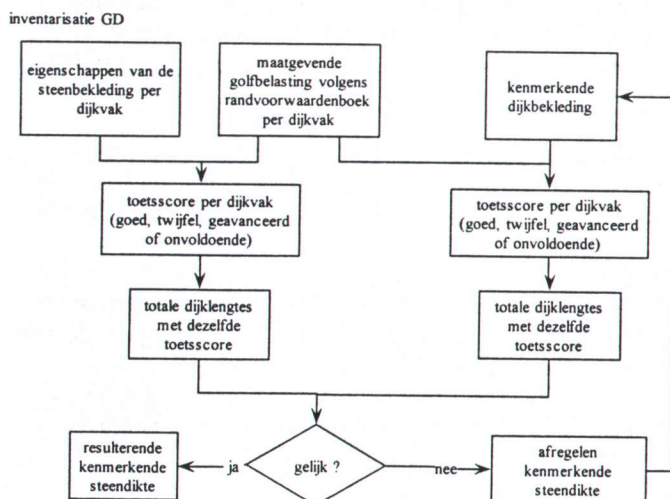
Vervolgens is voor de combinatie van de sterkte- en breedteparameter in de figuur van het black-box-model afgelezen wat de toetsscore is. Het black-box-model type 1 is weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: Kenmerkende stabiliteitsrelatie volgens black-box-model 1 volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid [ 2 ].

### Kenmerkende steendikte

De kenmerkende steendikte is iteratief bepaald op basis van de studie van GD. De afgeregelde kenmerkende steenbekleding levert hierbij met de golfbrandvoorwaarden volgens het randvoorwaardenboek ongeveer hetzelfde toetsresultaat op als in de studie van GD. Dit resulteert in een kenmerkende steendikte van 0.30 meter. De bepaling van de kenmerkende steendikte is schematisch weergegeven in figuur 4.



*Figuur 4: Schematische weergave van de bepaling van de kenmerkende steendikte*

#### **4.5.2 Inschatten dijk lengtes langs de Oosterschelde met dezelfde toetsscore**

Bij het inschatten van de toetsscores voor de hele Oosterschelde is gebruik gemaakt van de recent afgegeven golfrandvoorwaarden volgens RIKZ [ 9 ], die voor elk dijkvak bekend zijn. Deze golfrandvoorwaarden zijn gelijk aan de maatgevende golfbelasting volgens het basisscenario.

Voor het basisscenario is op basis van deze golfrandvoorwaarden de kenmerkende belasting voor alle dijkvakken langs de Oosterschelde bepaald. Deze kenmerkende belasting leidt met de kenmerkende steenbekleding via de kenmerkende stabiliteitsrelatie leidt tot een toetsscore per dijkvak.

Voor de overige scenario's is het reductiepercentage van de benodigde steendikte in rekening gebracht door de kenmerkende belasting van het basisscenario per dijkvak te reduceren met het reductiepercentage van de benodigde steendikte gemiddeld over de hele Oosterschelde. Zo is ook voor de overige scenario's de toetsscore per dijkvak bepaald op grond van de kenmerkende steenbekleding. Tenslotte zijn de dijk lengtes met dezelfde toetsscore gesommeerd over de hele Oosterschelde.

De resultaten zijn gegeven in paragraaf 8.3.

#### **4.6 Vergelijking van de scenario's**

Zoals beschreven in paragraaf 4.3, 4.4 en 4.5 is per scenario bekend welke reducties van de benodigde steendiktes kunnen worden verwacht en welke invloed dit heeft op de dijk lengtes die moeten worden aangepakt. Dit leidt tot een kostenbesparing ten opzichte van het basisscenario.

Omdat alle scenario's voldoen aan de gestelde veiligheidsfilosofie zoals verwoord in hoofdstuk 3, voldoen alle scenario's aan de vereiste veiligheid.

In principe kan dan het scenario worden gekozen die het meest uitgekiend is, ofwel die de grootste reducties van de aan te pakken dijkvakken oplevert.

De verschillende scenario's zijn echter niet allemaal even praktisch toepasbaar. Hiertoe wordt per scenario de reducties van te verbeteren dijkbekledingen vergeleken met de praktische toepasbaarheid, die in paragraaf 4.6 is beschreven. De praktische toepasbaarheid is een kwalitatieve waardering van de hoeveelheid inspanning en tijd die gemoeid gaat met de toepassing van de verschillende scenario's.