

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Rijkswaterstaat

De Veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland

**Achtergrondrapport HR2006 voor de Zee en
Estuaria**

Rapport RIKZ/2006.029

December 2006



Ministry of Transport, Public Works and Water Management
Directorate-General of Public Works and Water Management
National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ

De Veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland

**Achtergrondrapport HR2006 voor de Zee en
Estuaria**

Rapport RIKZ/2006.029

December 2006

De Veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland

**Achtergrondrapport HR2006 voor de Zee en
Estuaria**

Rapport RIKZ/2006.029

December 2006

.....

Colofon

**Uitgegeven
door:** Rijkswaterstaat-Rijksinstituut voor Kust en Zee

Informatie:
Telefoon: 070-3114232
E-mail: frank.den.heijer@rws.nl

**Uitgevoerd
door:** F. den Heijer, R.J. Vos, F.L.M. Diermanse, J.
Groeneweg, R. Tönis

Opmaak:

Datum: 19 december 2006

Status: Concept

Versienummer: 2006-vs043

Verklarende woordenlijst

Aanvullend Beheersoordeel: in 2003 is door de staatssecretaris gevraagd aan beheerders van een kering om na de toepassing van een toetsing van de kering volgens de VTV (Voorschrift Toetsen op Veiligheid) in 2001 te komen met een aanvullende toetsing.

Afhankelijkheid (in statistische zin): voor 2 variabelen die statistisch afhankelijk zijn, geldt dat de waarde van de één iets zegt over de kansverdeling van de uitkomst van de ander. Bijvoorbeeld wind en golfhoogte zijn afhankelijk omdat bij hoge windsnelheden de kans groot is dat ook hoge golven gemeten worden.

Asymptotische afhankelijkheid: specifieke vorm van afhankelijkheid tussen twee of meer variabelen waarbij met name in het extreme bereik de afhankelijkheid tussen de stochasten sterk is.

Basispeil: waterstand gerelateerd aan een normfrequentie van 1:10.000 aan de kering en gerelateerd aan de situatie in 1985.

Betrouwbaarheidsfunctie (zie ook grenstoestandsfunctie): wiskundige beschrijving van het verschil tussen de sterkte van de kering en de heersende hydraulische belasting. Als de betrouwbaarheidsfunctie negatief is (belasting > sterkte) dan faalt de kering.

Decimeringshoogte: de decimeringshoogte is het verschil tussen het *basispeil* ~~een waterstand~~ en een waterstand, met een overschrijdingsfrequentie die 10 keer hoger of lager is.

Deterministisch: tegenovergesteld van probabilistisch. Een deterministische rekensom bevat geen enkele rekenterm waarin een kanswaarde verwerkt zit.

Faalfrequentie: het gemiddeld aantal keer dat een waterkering faalt in een bepaalde tijdseenheid (doorgaans een jaar).

Faalkans: de kans dat een waterkering faalt in een bepaalde tijdseenheid (doorgaans een jaar). Indien de jaarlijkse faalkans klein is, is deze vrijwel gelijk aan de jaarlijkse faalfrequentie.

Faalgebeurtenis: stormgebeurtenis waarbij de waterkering "faalt". Dit kan betekenen dat er teveel water over de kering stroomt, dat de toplaag van de bekleding instabiel of aangetast wordt of zelfs afschuift.

Faalgebied: wiskundige beschrijving van de verzameling van combinaties van hydraulische randvoorwaarden (waterstand, golfhoogte, -periode en -richting) en sterkteparameters die tot falen van de kering leiden.

Falen van een kering: optreden van de faalgebeurtenis. Dit is een strikt mathematische definitie aangezien de kering in de werkelijkheid niet direct hoeft te bezwijken gezien a) onzekerheden in de natuur en de gebruikte methodieken en b) gegeven eventuele reststerkte van de kering.

Grenstoestand: hydraulische toestand aan de kering (combinatie van hydraulische parameters als waterstand, golfhoogte e.d.) waarvoor de belasting op de kering precies gelijk is aan de sterkte van de kering.

Grenstoestandsfunctie: wiskundige beschrijving van alle combinaties van hydraulische randvoorwaarden waarvoor de bestaande waterkering juist stand zal houden. Onder extremere condities zal de waterkering falen. Dergelijke gebeurtenissen vormen het faalgebied.

Herhalingstijd (van falen): gemiddelde duur tussen twee faalgebeurtenissen. De herhalingstijd, T , is de reciproke van de faalfrequentie, f , ofwel: $T = 1/f$.

Hydraulische randvoorwaarde: hydraulische belasting op de kering (een gecombineerde toestand van waterstand en golfbelasting) die bij de wettelijk vastgelegde normfrequentie voor de veiligheid optreedt. De minister van verkeer en Waterstaat moet volgens de Wet op de Waterkering (WOW) deze elke 5 jaar afgeven.

Illustratiepunt (zie ook *ontwerppunt en toetspunt*): maatgevende combinatie van hydraulische randvoorwaarden (waterstand, golfhoogte, -periode en -richting) die opgenomen wordt in het Hydraulische Randvoorwaardenboek. Wiskundig gezien is dit een punt op de grenstoestandsfunctie.

Kansverdelingsfunctie: wiskundige relatie tussen de mogelijke waarde van een meetbare grootte (de zgn. stochast) en de kans dat die waarde optreedt en/of overschreden wordt (de waarde van de stochast).

Kwantiel: bijvoorbeeld het 10^{-4} -kwantiel van de golfhoogte. Dit is de golfhoogte met een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} per jaar.

Maatgevende Hoogwaterstand (MHW): Karakteristieke waarde voor de waterstand, gelijk aan die met een overschrijdingsfrequentie bij de normfrequentie. Deze wordt met name voor de rivieren gebruikt. Voor de kust wordt in de hydraulische belasting van de grenstoestandsfunctie ook de golfbelasting meegenomen.

Marginale statistiek: De marginale statistiek beschrijft voor elke mogelijke uitkomst van de stochast hoe groot de kans van voorkomen of overschrijden is.

Multivariate statistiek: De gezamenlijke statistiek van 2 of meer stochastische variabelen. Deze beschrijft de kans op

voorkomen of overschrijden van gecombineerde uitkomsten van de betrokken variabelen.

9
0

Normfrequentie: wettelijk vastgelegde frequentie van voorkomen dat een kering mag “falen” (zie definitie van falen), in Nederland gedefinieerd per dijkkringgebied.

Omni-directionele statistiek: gecombineerde statistiek voor alle windrichtingen bij elkaar. De omni-directionele overschrijdingsfrequentie van een bepaalde waterstand (bijvoorbeeld een waterstand van NAP+3m) is gelijk aan de som van alle overschrijdingsfrequenties per windrichtingssector.

Ontwerppeil: het ontwerppeil is de waterstand, behorende bij de normfrequentie van de betreffende waterkering (1/10.000 voor de Hollandse kust, 1/4.000 voor de Westerschelde, etc).

Ontwerppunt: zie illustratiepunt.

Ontwerpwaarde: waarde voor een robuust ontwerp van de kering die de eerst komende decennia (50-75 jaar) voldoet bij de toetsing.

Probabilistiek: vakgebied van de kansrekening (“probability” is het Engelse woord voor kans).

Rekenpeil: De waterstand die wordt gevonden door bij het toetspeil tweederde van de decimeringshoogte op te tellen. Het rekenpeil wordt toegepast voor de hydraulische randvoorwaarden voor duinen.

Rekenregel (uit VTV): formule vastgelegd in de VTV waarmee de waterkering door de beheerder op een bepaald faalmechanisme moet worden getoetst.

Reststerkte: denkbeeldig deel van de hydraulische belasting die de kering bij falen nog kan zou kunnen keren.

Stochast of Stochastische variabele: wiskundige variabele waarvan de uitkomst onzeker is en beschreven wordt in termen van kansen en kansverdelingen.

Toetsen: proces waarbij de beheerders nagaan of de sterkte van de waterkering voldoet aan de wettelijk vastgestelde norm. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de hydraulische belasting zoals gegeven in de hydraulische randvoorwaarde enerzijds, en de rekenregels uit de VTV anderzijds.

Toetspunt: zie illustratiepunt.

Toetspeil: Het toetspeil is de hoogwaterstand die nog veilig gekeerd moet worden. Het is de waterstand, behorende bij de normfrequentie van de betreffende waterkering (eg. het basispeil van bij frequenties 1/10.000 voor de Hollandse kust,

1/4.000 voor de Westerschelde, etc.) met daaraan toegevoegd de verwachte hoogwaterstijging over de komende toetsperiode. Het ontwerppeil daarentegen heeft een verhoging die berekend is voor een veel langere periode (de planperiode).

VTV: Voorschrift Toetsen op Veiligheid. Met deze rekenregels die afgegeven worden door de minster van Verkeer en Waterstaat kan de beheerder de kering toetsen.

Zichtduur: tijdsduur tussen twee opeenvolgende stormmaxima.

Deel I: Inleidende hoofdstukken 13

1. Inleiding 14

- 1.1 Hydraulische randvoorwaarden in het kader van de WOW14
- 1.2 Doelstelling van dit rapport 15
- 1.3 Normen voor het Hydraulische Randvoorwaardenboek 15
- 1.4 Opzet van dit rapport 16
- 1.5 Auteurs en organisatie 17

2. Aanpak en uitgangspunten 18

- 2.1 Inleiding 18
- 2.2 De rol van de hydraulische randvoorwaarden bij toetsen 19
- 2.3 Harde waterkeringen (dijken en kunstwerken) 20
 - 2.3.1. Belangrijkste uitgangspunten 20
 - 2.3.2. De probabilistische aanpak 20
 - 2.3.3. Vertaling van diep naar ondiep water 23
 - 2.3.4. Uitwerking voor de harde keringen per gebied 24
- 2.4 Uitwerking voor duinwaterkeringen 27
 - 2.4.1. Algemene aanpak 27
 - 2.4.2. Uitgangspunten 27
 - 2.4.3. Uitwerking per gebied 28
- 2.5 Consequenties voor de nieuwe randvoorwaarden 28
- 2.6 kwaliteitsborging tijdens de uitvoering 29

Deel II: Methode ter bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Hollandse kust en Zeeland 30

3. Probabilistische rekenmethode harde waterkeringen Hollandse kust en Zeeland 31

- 3.1 Inleiding 31
- 3.2 Basisbegrippen beoordeling betrouwbaarheid 31
- 3.3 Berekenen van de faalkans 34
 - 3.3.1. De Haan als een variant op de standaard Monte Carlo analyse 34
 - 3.3.2. Faalkansberekening volgens De Haan 34
 - 3.3.3. Benodigde gegevens voor het berekenen van de faalkans 39
- 3.4 Toets op asymptotische afhankelijkheid 40
- 3.5 Bepalen van hydraulische randvoorwaarden 42
- 3.6 Meerwaarde methode De Haan 44

4.	Meetgegevens langs de kust en op diep water; de basis voor HR200647	
4.1	Inleiding	47
4.2	Metingen van wind	47
4.2.1.	Windmetingen KNMI	47
4.2.2.	Vergelijking met wind uit de periode 1979-2002	48
4.3	Metingen van waterstanden	49
4.4	Meetstations voor golven op diep water	49
4.5	Golfmetingen en golfparameters	50
4.5.1.	Spectrum en golfkarakteristieken	50
4.5.2.	Nauwkeurigheid van de metingen	54
4.6	Samenstellen van golfstatistiek op diep water	54
4.6.1.	Inleiding	54
4.6.2.	Selectiecriteria voor stormmaxima	55
4.6.3.	Verbeterde schattingen met behulp van filters	57
4.6.4.	Identificeren van hoge golfperioden bij deining	59
4.7	Metingen voor gecombineerde statistiek	60
4.7.1.	Inleiding	60
4.7.2.	Procedure voor aanmaken van MV-bestanden	60
5.	Van meetgegevens naar extremewaardenstatistiek	61
5.1	Inleiding	61
5.2	Omni-directionele en windrichtingsafhankelijke statistiek	61
5.3	Verdelingsfunctie voor wind, golven en waterstanden	62
5.4	Windstatistiek	63
5.5	Waterstandstatistiek	66
5.5.1.	Inleiding	66
5.5.2.	Basispeilen 1985	66
5.5.3.	Afleiding toetspeilen	69
5.5.4.	Windrichtingsafhankelijke waterstandstatistiek	73
5.6	Golfstatistiek	78
5.6.1.	Inleiding	78
5.6.2.	Omni-directionele golfstatistiek	78
5.6.3.	Windrichtingsafhankelijke golfstatistiek	82
5.6.4.	Onzekerheden bij extremewaardenstatistiek	83
5.6.5.	Het effect van fysische begrenzingsen op de golfstatistiek	85
6.	Vertaling van waterstanden en golven op diep water naar de waterkering	88
6.1	Inleiding	88
6.2	Vertalen van waterstanden naar de waterkering	88
6.2.1.	Methode	88
6.2.2.	Alternatieve aanpak voor waterstanden voor de Oosterscheldekering	92
6.3	Vertalen van golven van diep water naar de waterkering met het golfmodel SWAN	94
6.3.1.	Inleiding, aanpak en uitgangspunten	94
6.3.2.	Het golfmodel SWAN	96

6.3.3.	Rekenroosters en bodems	98
6.3.4.	Overige uitgangspunten, uitvoerpunten en instellingen	101
6.3.5.	Definitie van de transformatiematrix	104
6.3.6.	Golfrandvoorwaarden op de modelrand	108
6.3.7.	Correcties resultaten op basis van hindcast berekeningen	110
6.3.8.	Database KustDB2006	112

Deel III: Hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Waddenzee 114

7.	Hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Waddenzee	115
7.1	Inleiding	115
7.2	Inventarisatie van golfrandvoorwaarden en gevolg voor hydraulische randvoorwaarden	115
7.3	Aanvullende berekeningen voor de golfhoogte	119
7.4	HR2006 versus HR2001	120

Deel IV: Methode ter bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor duinwaterkeringen 121

8.	Hydraulische randvoorwaarden voor duinwaterkeringen	122
8.1	Inleiding	122
8.2	Hollandse kust en Waddengebied	123
8.2.1.	Inleiding	123
8.2.2.	Relatie waterstand – golfhoogte	124
8.2.3.	Relatie golfhoogte – piekperiode	127
8.2.4.	Diepwaterrandvoorwaarden in de hoofdstations	128
8.2.5.	Ruimtelijke interpolatie	128
8.3	Bepalen van randvoorwaarden duinen ten zuiden van de Maasvlakte	131
8.3.1.	Inleiding	131
8.3.2.	Aanpak	131

Deel V: Resulterende hydraulische randvoorwaarden voor HR2006 134

9.	Resulterende hydraulische randvoorwaarden voor HR2006 en vergelijking met HR2001	135
9.1	Inleiding	135
9.2	Harde waterkeringen	135
9.2.1.	Inleiding	135
9.2.2.	Methode	135
9.2.3.	Oosterschelde	138
9.2.4.	Westerschelde	140
9.2.5.	Hollandse kust inclusief verbindende waterkeringen	141
9.3	Duinen	142
9.3.1.	Hollandse kust en Waddengebied	142

9.3.2.	Duinen in Zeeland	143
10.	Vergelijking van HR2006 met CRASH-actie	145
10.1	Inleiding	145
10.2	Vergelijking HR2006 harde waterkeringen met de CRASH-actie	145
10.2.1.	Inleiding	145
10.2.2.	Opzet analyse	145
10.2.3.	Resultaten	146
10.3	Vergelijking HR2006 Duinen met de CRASH-actie	147
11.	Samenvatting	149
11.1	Kader	149
11.2	Uitgangspunten	149
11.3	Methode bepaling hydraulische randvoorwaarden	150
11.3.1.	Inleiding	150
11.3.2.	Methode voor de harde waterkeringen	151
11.3.3.	Methode voor duinen	152
11.4	Consequenties voor de nieuwe randvoorwaarden	154
11.4.1.	Harde keringen, HR2006 vs HR2001	154
11.4.2.	Duinen, HR2006 vs HR2001	155
11.4.3.	HR2006 vs CRASH-actie	155
11.5	Conclusie	156
12.	Referenties	157
Bijlage A	Diepwaterrandvoorwaarden	164
Bijlage B	Statistieken windsnelheid en golfhoogte	173
Bijlage C	Figuren nieuwe randvoorwaarden	175
Bijlage D	Rekenvoorbeeld methode "De Haan"	195
Bijlage E	Kwaliteitscontrole voor HR2006	201
Bijlage F	Gemeten golfspectra voor stormen	204
Bijlage G	Was-wordt tabellen met CONCEPT HR2006	207
Bijlage H	Gesorteerde Was-wordt tabellen	209

Deel I: Inleidende hoofdstukken

1. Inleiding

1.1 Hydraulische randvoorwaarden in het kader van de WOW

Sinds januari 1996 is de nieuwe "Wet op de Waterkering" van kracht (WOW, 2002)¹. Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat er iedere vijf jaar door de beheerders een toetsing op veiligheid moet plaatsvinden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Bij de toetsing gaan de beheerders na of de primaire waterkeringen voldoen aan de in de wet gedefinieerde veiligheidsnorm. Deze veiligheidsnorm is voor elk dijkkringgebied gedefinieerd als een toegestane gemiddelde overschrijdingskans - per jaar - van de waterstand die een primaire waterkering nog veilig moet kunnen keren.

Voor het toetsen op veiligheid is door het ministerie van Verkeer en Waterstaat een voorschrift uitgebracht: "Voorschrift Toetsen op Veiligheid" (VTV '04). Dit voorschrift is bestemd voor de beheerders van waterkeringen. Het geeft aan hoe de toetsing moet worden uitgevoerd om de kwaliteit van de waterkeringen te kunnen beoordelen.

Om de toetsing te kunnen uitvoeren moeten tevens de maatgevende hydraulische belastingen, ook wel genoemd de hydraulische randvoorwaarden, bekend zijn. In de Wet op de Waterkering (WOW, 2002) wordt de minister van Verkeer en Waterstaat opgedragen deze belastingen beschikbaar te stellen. Bij het bepalen van de maatgevende belastingen wordt de wettelijke norm voor de veiligheid verdisconteerd. De hydraulische randvoorwaarden worden elke vijf jaar vastgesteld en gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische Randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen", oftewel het Hydraulisch Randvoorwaardenboek. De eerste versie van het randvoorwaardenboek is gepubliceerd in 1996, het thans geldende randvoorwaardenboek is vastgesteld en uitgekomen in 2001. Voorliggend rapport dient ter voorbereiding op de eerst volgende versie (HR2006).

De HR2006 worden opgesteld voor het *toetsen* van keringen en niet voor het *ontwerpen* van waterkeringen. Een belangrijk verschil tussen toetsen en ontwerpen is de zichtduur die bij toetsen veel korter is dan bij ontwerpen. Voor het ontwerpen moet bijvoorbeeld rekening gehouden worden met de potentiële gevolgen van klimaatverandering en is dus een ontwerp nodig dat voor een langere periode voldoet. Voor toetsen wordt de situatie aan het einde van de toetsperiode beschouwd, in dit geval 2011.

¹ Deze wet gaat op in de nieuwe Waterwet. Deze treedt naar verwachting medio 2008 in werking.

1.2 Doelstelling van dit rapport

Eén van de deelsystemen waarvoor randvoorwaarden moeten worden afgeleid zijn de zoute wateren. Meer specifiek zijn dat de Westerschelde, de Oosterschelde, de Waddenkust, de Zeeuwse Noordzeekust en de Hollandse kust. Dit rapport geeft een beschrijving van de gebruikte middelen en methoden om te komen tot de Hydraulische randvoorwaarden langs de Nederlandse kust voor HR2006. De aanpak verschilt op een aantal onderdelen sterk van de aanpak in het kader van HR2001, om uiteenlopende redenen. De vergelijking tussen de resultaten van HR2001 en HR2006 komt uitgebreid aan bod in dit rapport. In de loop der jaren hebben meerdere instituten meegewerkt aan de ontwikkeling van het rekenconcept, de programmatuur en de invoergegevens waarmee de nieuwe Hydraulische Randvoorwaarden worden afgeleid. De diverse studies en projecten staan beschreven in een groot aantal achtergrondrapporten. Dit rapport geeft een overzicht van de meest relevante informatie uit al deze achtergrondrapporten en is bedoeld als naslagwerk waarin de voornaamste informatie staat beschreven op het gebied van het berekenen van hydraulische randvoorwaarden langs de Nederlandse kust.

Dit rapport is geschreven om:

- Verantwoording af te leggen over de kwaliteit en betrouwbaarheid van de gevolgde aanpak;
- De opgedane kennis toegankelijk te maken middels een naslagwerk voor vervolgprojecten als HR2011 e.a. (*kennismanagement*).

In hoofdstuk 12 staat een overzicht van alle documenten waaruit we de informatie voor dit rapport samengevat en soms (deels) gekopieerd hebben. In de tekst van dit rapport staat zoveel mogelijk de bron genoemd.

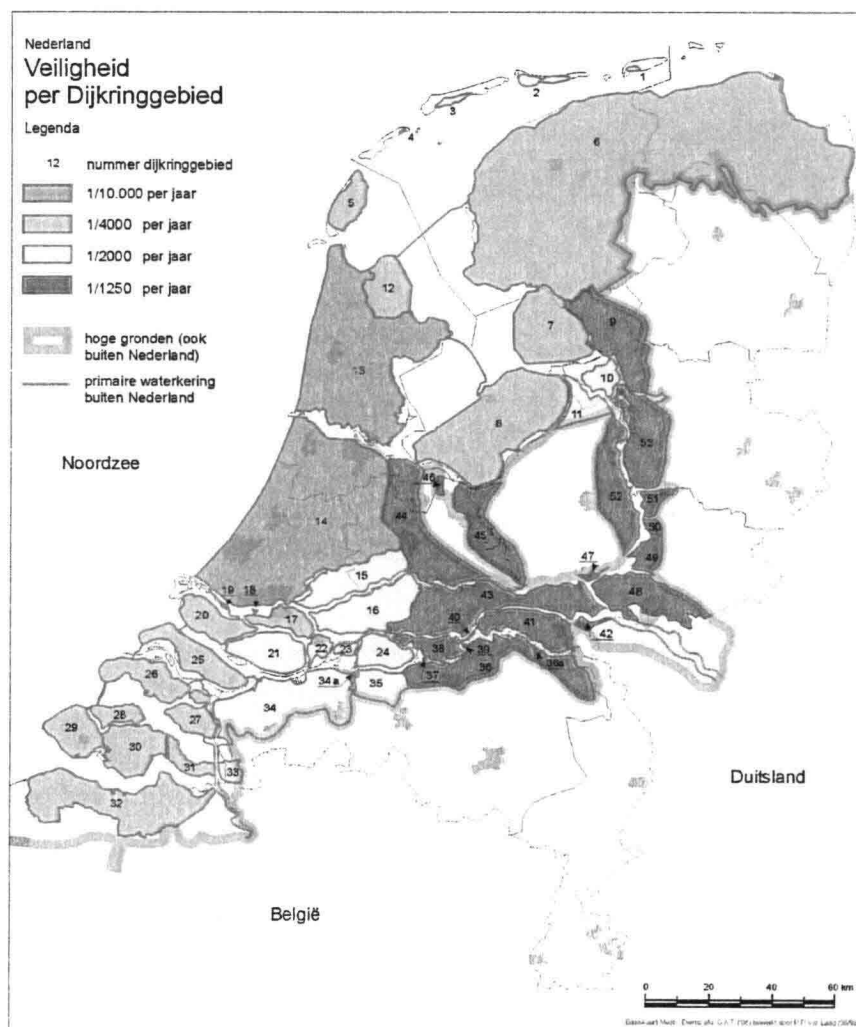
1.3 Normen voor het Hydraulische Randvoorwaardenboek

De Wet op de Waterkering (WOW, 2002) schrijft ten behoeve van de vijfjaarlijkse toetsing voor aan welke normfrequenties de primaire waterkeringen dienen te voldoen. Deze normfrequenties zijn vastgesteld per dijkkringgebied. Figuur 1.1 geeft een overzicht van alle dijkkringgebieden in Nederland en de bijbehorende normfrequentie. De normen² geven de jaarlijkse overschrijdingskansen van de waterstand per dijkkringgebied die de waterkering nog veilig moet kunnen keren. Alle primaire keringen rondom het gebied behoren hieraan te voldoen.

De normen zijn in vier categorieën te verdelen: 1/1.250, 1/2.000, 1/4.000 en 1/10.000 per jaar. In dit rapport zijn de normen van 1/2.000 per jaar (Waddeneilanden) 1/4.000 per jaar (Texel, Waddenkust Friesland, Groningen, Wieringen, de Zeeuwse kust, de Westerschelde

² Met normen wordt hier verder de normfrequentie bedoeld.

en de Oosterschelde³) en 1/10.000 per jaar (Hollandse kust) relevant. De voor dit rapport relevante dijkkringgebieden zijn: 1-6, 12-14, 20, en 25-32.



Figuur 1.1 De dijkkringgebieden van Nederland met de bijbehorende normfrequentie.

1.4 Opzet van dit rapport

Het rapport is onderverdeeld in vijf delen:

1. Deel I (hoofdstuk 1 en 2) bevat de inleidende hoofdstukken. Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de gevolgde aanpak en een opsomming van de belangrijkste uitgangspunten.

³ In Figuur 1.1 is te zien dat van sommige keringen zoals de Oosterscheldekering in dit rapport ook het achterland wordt meegenomen. Dit dient niet verward te worden met een 'achterlandstudie' die eventueel uitgevoerd wordt in het kader van de toetsing van een waterkering van categorie b (verbindende keringen als Oosterscheldekering en Maeslantkering). Het betreft hier een vaststelling van de hydraulische belasting op de keringen in het achterland conform de WOW.

-
2. Deel II (hoofdstuk 3 t/m6) bevat de methode voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarde voor de harde waterkeringen. Allereerst wordt in hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de methode waarmee de hydraulische randvoorwaarden worden bepaald. In hoofdstuk 4 worden de ‘ruwe’ meetgegevens (en hun bewerking) behandeld waarmee de hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Westerschelde, Oosterschelde en de Hollandse en Zeeuwse kust zijn bepaald. De extrapolatie van bewerkte meetgegevens tot een statistische verdeling van externe waarden (extreme waarden statistiek) is gegeven in hoofdstuk 5. De transformatie van gegevens op diep water naar gegevens aan de teen van de dijk is beschreven in hoofdstuk 6.
 3. Deel III (hoofdstuk 7) beschrijft de (afwijkende) methode voor harde waterkeringen langs de Waddenzee.
 4. Deel IV (hoofdstuk 8) beschrijft de methode waarmee de hydraulische randvoorwaarden voor duinen worden bepaald.
 5. Deel V (hoofdstuk 9-11) geeft een overzicht van de rekenresultaten voor HR2006 met een vergelijking met eerder afgegeven waarden (HR2001, hoofdstuk 9) en tussentijds afgegeven waarden in 2003 (CRASH-actie, hoofdstuk10). De samenvatting van dit rapport is gegeven in hoofdstuk 11.

1.5 Auteurs en organisatie

Dit rapport is samengesteld door Frank den Heijer, Rico Tönis, Robert Vos (allen van Rijkswaterstaat RIKZ) en door Ferdinand Diermanse en Jacco Groeneweg (beiden WL | Delft Hydraulics).

De eindredactie van het rapport is uitgevoerd door Robert Vos (Rijkswaterstaat RIKZ) en Frank den Heijer.

Diverse experts van adviesbureau's, universiteiten en GTI's hebben het concept van dit rapport gereviewed en een schriftelijke beoordeling afgegeven van de kwaliteit van het werk. Opmerkingen naar aanleiding van deze beoordeling zijn in dit rapport verwerkt. De auteurs zijn de reviewers bijzonder dankbaar voor hun bijdrage.

2. Aanpak en uitgangspunten

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft beknopt de aanpak voor het samenstellen van de hydraulische randvoorwaarden van 2006 en de belangrijkste uitgangspunten die daarbij gesteld zijn. Het dient als inleiding op de hierna komende hoofdstukken.

Dit hoofdstuk geeft alleen de uitgangspunten op hoofdlijnen. Meer gedetailleerde uitgangspunten voor bv. de probabilistische rekenmethode of de golfmodellen worden elders besproken. Er bestaat al decennia lang een verschil van aanpak voor harde waterkeringen en duinen. De reden hiervan is het verschil in de definitie van de rekenregels voor de beide typen waterkering. Daarom is het verschil in aanpak ook nu gehandhaafd.

Voorgeschiedenis van de hydraulische randvoorwaarden

De hydraulische belastingen voor het toetsen op veiligheid bestaan uit een combinatie van de waterstand en karakteristieke waarden voor de golfbelasting. Langs de rivieren is het gebruikelijk om alleen de Maatgevende Hoog Waterstand (MHW) op te nemen in de hydraulische belasting. Langs de kust worden ook karakteristieken van de locale golfbelasting opgenomen voor het toetsen van de waterkering op golfoverslag of voor het berekenen van de duinafslag.

De MHW's langs de kust worden al sinds lange tijd bepaald aan de hand van een statistische analyse van meetreeksen. In de eerste versie van de Hydraulische Randvoorwaarden (HR1996) zijn de golfbelastingen voor de harde waterkeringen langs de kust voornamelijk samengesteld uit de ontwerpwaarden die gebruikt zijn voor de meest recente versterking van de betreffende keringen. Voor de duinwaterkering zijn de randvoorwaarden op diep water gebruikt uit de Leidraad duinafslag (TAW, 1984).

In de tweede versie van de Hydraulische Randvoorwaarden, de HR 2001, zijn de waterstanden gecorrigeerd voor zeespiegelstijging, maar de golfbelasting is overgenomen uit de eerste versie. Er bestond toen nog onvoldoende vertrouwen in de nieuwe rekenmethoden om de vertaling van golven op diep water naar ondiep water te maken.

In de derde versie van de Hydraulische Randvoorwaarden, de HR 2006, worden zowel de waterstanden als de golven bijgesteld. Het plan van aanpak hiertoe is direct na 2001 uitgewerkt en had een looptijd van 2002 tot 2006. De concrete aanwijzingen dat er op dieper water een zwaardere golfbelasting te verwachten is (met name hogere golfperioden) dan eerder aangenomen, lieten echter niet toe dat tot 2006 werd gewacht met het in beeld brengen van de consequenties ervan op de veiligheid die de waterkeringen het achterliggende gebied gaven. Er zijn in 2002/2003 tussentijds waarden beschikbaar gesteld aan de waterkeringbeheerders ten behoeve van het opstellen van een

aanvullend beheerdersoordeel (“aanvullend” ten opzichte van de 1^e toetsronde 1996-2001). Deze actie is ook wel bekend als de zgn. CRASH-actie. De bij deze actie afgegeven golfbelasting wijkt op een aantal punten af van de recent voorgestelde Hydraulische randvoorwaarden HR2006. Dit zal nader in dit rapport worden toegelicht.

Leeswijzer

De opzet van hoofdstuk 2 is als volgt: paragraaf 2.2 licht kort het principe van toetsen toe. De paragrafen 2.3 en 2.4 beschrijven de aanpak voor het randvoorwaardenboek 2006, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen enerzijds de harde waterkeringen en anderzijds de duinwaterkeringen. Paragraaf 2.5 gaat vervolgens in op de aanpak om de belangrijkste verschillen met eerder beschikbare waarden inzichtelijk te maken. Paragraaf 2.6, ten slotte, beschrijft in het kort de procedure die gevolgd is ten behoeve van de kwaliteitsborging.

2.2 De rol van de hydraulische randvoorwaarden bij toetsen

Waterstanden en golfkarakteristieken zoals golfhoogte en golfperiode vormen samen de hydraulische randvoorwaarden langs de kust en dienen als invoergegeven voor de rekenregels voor het uitvoeren van de 5-jaarlijkse toetsing op veiligheid. Het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV, 2004) geeft een overzicht van een groot aantal rekenregels voor het toetsen van waterkeringen op het optreden van faalmechanismen bij een gegeven hydraulische belasting. De wettelijke veiligheidsnorm speelt in deze rekenregels geen rol. Er is hiermee een duidelijke scheiding aangebracht tussen het vaststellen van de belasting behorend bij de veiligheidsnorm enerzijds en de rekenregels voor het toetsen van de kering anderzijds.

De veiligheidsnorm, uitgedrukt in een overschrijdingskans (of frequentie) per jaar, is impliciet verdisconteerd in de Hydraulische Randvoorwaarden. De hydraulische randvoorwaarden zijn te beschouwen als een representatieve gebeurtenis bij de gestelde veiligheidsnorm. Als bij gebruik van de Hydraulische Randvoorwaarden een toetsing voor alle faalmechanismen volgens de VTV het resultaat “voldoende” geeft dan voldoet de kering.

Indien dat niet het geval is voldoet de kering niet aan de gestelde veiligheidsnorm. Dit is de gangbare interpretatie van de zinsnede in artikel 3 van de Wet op de Waterkeringen (WoW, 2002): ‘waterstand en bijkomende factoren’. In geval de beheerder niet in staat is de kering te beoordelen (bv. vanwege gebrek aan gegevens of betrouwbare rekenmethoden) wordt “geen oordeel” afgegeven.

Om het toetsproces handzaam te houden bestaan de hydraulische randvoorwaarden uit een representatieve combinatie van de hydraulische belasting: een waterstand en een verzameling bijbehorende golfkarakteristieken. In de toetsronde wordt vervolgens op basis van de rekenregels uit de VTV bepaald of de kering in staat is om een dergelijke hydraulische condities te weerstaan.

2.3 Harde waterkeringen (dijken en kunstwerken)

2.3.1. Belangrijkste uitgangspunten

Voor harde waterkeringen worden er hier 4 belangrijke uitgangspunten genoemd:

1. Een eerste uitgangspunt bij het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden is dat alleen de intrinsieke onzekerheden worden beschouwd. Dit zijn onzekerheden die voortkomen uit de natuur zelf, zoals de kans dat een stormvloed een zeker peil overschrijdt. Zowel statistische onzekerheid als onzekerheid in de waterbewegings- en golfmodellen worden niet in de beschouwing betrokken. Feitelijk wordt hiermee een nadere invulling gegeven van de definitie van de veiligheidsnorm. In de rekenregels voor de toetsing van de kering wordt overigens wel rekening gehouden met modelonzekerheden.
2. Een tweede uitgangspunt is dat er gegeven de beschouwde intrinsieke onzekerheden, waarden worden afgeleid die zo goed mogelijk de verwachtingswaarde voor de komende toetsperiode weergeven. Daarmee kan een zuiver oordeel worden geveld of de waterkering ten tijde van de toetsing nog voldoende veiligheid biedt.
3. Een derde uitgangspunt is het hanteren van de zogenaamde thermometergedachte: Er wordt een “foto” genomen van het fysische systeem, waarbij deze representatief verondersteld wordt voor de periode van de navolgende toetsperiode. Voor bijvoorbeeld de waterstand is in verband met de zeespiegelstijging het peiljaar 2011 gekozen, ofwel het laatste jaar van de toetsronde waartoe het randvoorwaardenboek 2006 is samengesteld.
4. Er is een verschil in toetsingsmethodiek van duinen en dijken, dat mede is ingegeven door het feit dat er bij een juist ‘veilig’ duin nagenoeg geen reststerkte is, terwijl voor een dijk die juist voldoet altijd nog reststerkte aanwezig is. In de WoW wordt geëist dat er bij maatgevende omstandigheden nog ‘veilig’ gekeerd moet kunnen worden. Voor dijken wordt impliciet de reststerkte ingevuld zonder die overigens te kwantificeren. Voor duinen is voor de keuze van ‘veilig’ wel een keuze gemaakt door een 10-maal lagere normfrequentie te kiezen. Een uitgangspunt voor de harde kering is dus dat de reststerkte van de kering na bezwijken niet in de veiligheidsnorm is meegenomen en dat de hydraulische randvoorwaarde dus representatief moeten zijn voor een normfrequentie van 10^{-4} per jaar.

2.3.2. De probabilistische aanpak

Bij het vaststellen van de hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de kust en estuaria is gekozen voor een

zogenoemde “probabilistische aanpak”. Deze keuze is ingegeven door het feit dat de veiligheidsnorm is uitgedrukt in een jaarlijkse overschrijdingskans. Een voordeel van een dergelijke aanpak is dat lagere hydraulische randvoorwaarden worden verkregen dan met een deterministische aanpak die in het algemeen leidt tot relatief hogere belastingen. Omdat afgesproken is dat toetsen scherp dient te gebeuren is dit een voordeel.

In de probabilistische aanpak wordt rekening gehouden met de volgende aspecten:

- Het falen van een waterkering kan optreden bij een groot domein aan combinaties van waterstanden en golven. Dit domein kan voor elk faalmechanisme weer anders liggen;
- Waterstanden en golven zijn (op het diepe water voor de kust) sterk afhankelijk van de windsnelheid en (mede daardoor) van elkaar. Deze afhankelijkheid is echter niet volledig, hetgeen betekent dat de waarde van één van deze variabelen “hooguit” een indicatie geeft over de te verwachten waarde van de andere variabelen.

In de probabilistische rekenexercitie wordt eerst een kansberekening uitgevoerd voor het mogelijk falen van een waterkering. Bij een dergelijke kansberekening wordt voor vele mogelijke combinaties van hydraulische condities vastgesteld of deze condities aanleiding geven tot bezwijken van de kering. Alle combinaties die tot falen leiden, dragen bij aan de faalkans. Vervolgens wordt uit de verzameling van mogelijke belastingen de representatieve combinatie van waterstand en golven bepaald. Het “representatieve” zit met name in het gegeven dat een dijk die in staat is om deze condities te keren voldoet aan de gestelde veiligheidsnorm, uitgedrukt in de jaarlijkse overschrijdingskans.

De gekozen probabilistische rekenmethode voor harde waterkeringen (de Haan en Resnick, 1977) is een variant van Monte Carlo sampling. Bij Monte Carlo sampling wordt een (groot) aantal trekkingen verricht van alle relevante variabelen (zoals wind en waterstand) uit hun respectievelijke kansverdelingsfuncties. Omdat het gewenste veiligheidsniveau bekend is, en de onderlinge samenhang tussen de belangrijkste variabelen goed is in te schatten, wordt gebruik gemaakt van zogenaamde “Importance sampling”. Dit betekent dat de methode zich vooral richt op gebeurtenissen rondom de grens tussen falen en niet falen. Met andere woorden: alleen relevante extreme gebeurtenissen worden beschouwd.

Om de onderlinge samenhang tussen de diverse variabelen hierbij zo goed mogelijk te behouden, worden de waarnemingen zelf beschouwd als zijnde de trekkingen. Van de golven op de Noordzee zijn slechts ongeveer 25 jaar waarnemingen beschikbaar.

Op basis van metingen in deze periode moeten uitspraken gedaan worden over gebeurtenissen met een herhalingsstijd van orde 10.000 jaar. Daarom worden de waarnemingen “opgeschaald” onder de aanname dat de waargenomen uitkomsten van de variabelen in

extremere omstandigheden dezelfde mate van onderlinge samenhang hebben. De validiteit van deze aanname is getoetst (zie paragraaf 3.4.3).

Om deze rekenmethode (de methode “De Haan”) uit te kunnen voeren is nodig:

- *De keuze ten aanzien van de stochastische variabelen die het faaldomein vastleggen.* Niet alle variabelen worden stochastisch in het proces betrokken. Het stochastische karakter van een variabele is van belang als enerzijds het effect van een variabele op het resultaat van de toetsing groot is (zoals dat van de waterstand op golfoverslag), en anderzijds ook de natuurlijke variatie groot is. Uiteindelijk is op basis van deze afweging gekozen voor de variabelen windsnelheid, windrichting, waterstand en, afhankelijk van het gebied (zie paragraaf 2.3.4) de golfperiode. De golfhoogte op diep water wordt via een empirische relatie uit de golfperiode op deterministische wijze bepaald.
- *De marginale kansverdelingen en daarnaast de onderlinge afhankelijkheid van de variabelen die stochastisch worden betrokken.* Zoals aangegeven is gekozen voor een probabilistisch model waarbij de onderlinge afhankelijkheid van de variabelen wordt bepaald door de beschikbare waarnemingen. Deze waarnemingen zijn op diverse locaties op dieper water langs onze kust beschikbaar. Zie voor de gegevens en de afleiding van de statistieken de hoofdstukken 4 en 5.
- *De grenstoestandsfunctie: het verband tussen de stochastische variabelen waarbij de sterkte precies even groot is als de belasting.* De grenstoestand vormt de grens tussen niet-falen en falen van de waterkering. De faalruimte – de combinaties van waarden voor de stochastische variabelen waar de belasting groter is dan de sterkte – kan voor elke locatie verschillend van vorm en afmeting zijn. Dit wordt onder andere veroorzaakt doordat golven op ondiep water sterk afhankelijk zijn van de lokale bodemdiepte (bathymetry) en van de geometrie van de kust. Het faalgebied kan ook sterk verschillen per faalmechanisme. De wijze waarop de faalruimte wordt bepaald door het faalmechanisme is beschreven door de rekenregels in de VTV (VTV, 2004). Zie hoofdstuk 3 voor een overzicht van gebruikte grenstoestandsfuncties.

De probabilistische rekenmethode voor harde waterkeringen is generiek opgezet om de faalkans op elke locatie en voor elk faalmechanisme te kunnen bepalen. In hoofdlijnen wordt deze weergegeven door het schema in Figuur 2. Deze opzet is gemodelleerd en geïnstrumenteerd in het rekenprogramma HYDRA-K. Hoofdstuk 3 beschrijft de methode in meer detail.

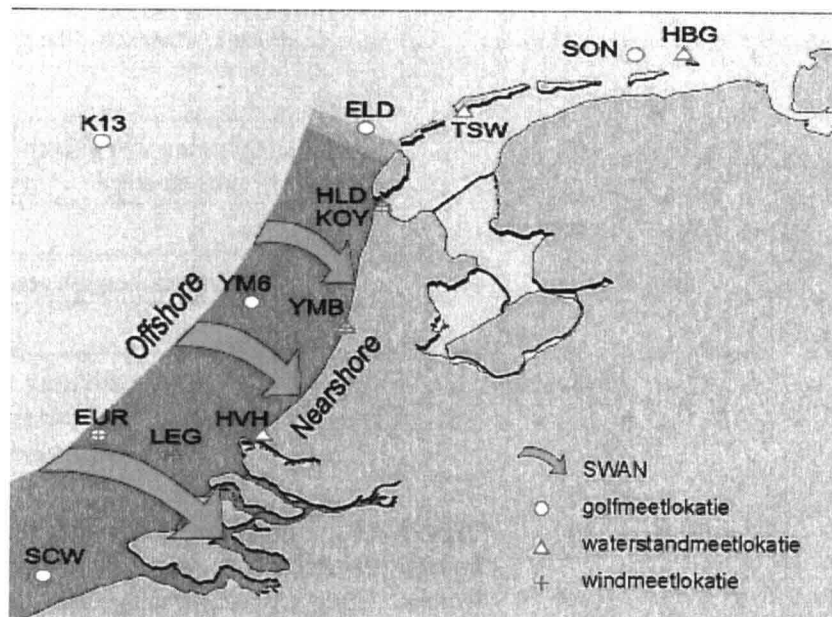


Figuur 2.1 Schematische weergave van de opzet van het belastingmodel. De bodem is een belangrijk onderdeel van het model waarmee de golfvoortplanting naar de kust wordt berekend (blokje 'voortplanting van golven naar de kust').

2.3.3. Vertaling van diep naar ondiep water

Om een faalkans van de kering te kunnen bepalen is statistiek (eg. de statistische verdeling) nodig van waterstand en golven direct voor de kering. Echter, de statistische verdeling van *golven* is alleen beschikbaar voor enkele meetlocaties op diep water. Daarom is er een vertaalslag nodig van golven op diep water naar het ondiepe water voor de waterkering (zie Figuur 2.2), en moet tussen de meetlocaties worden geïnterpoleerd. De vertaling van golven van diep naar ondiep water is berekend met het golfmodel SWAN (2004).

De statistiek van de *waterstand* is alleen beschikbaar voor enkele meetlocaties langs de kust. De waterstand voor een willekeurige waterkering wordt daarom bepaald op basis van interpolatie tussen waterstanden in nabijgelegen meetstations. Uitzondering op deze regel vormt de Oosterschelde, waar geïnterpoleerd wordt op basis van berekende waterstanden met het model IMPLIC. Dit laatste is gedaan om rekening te houden met effecten van het sluiten van de Oosterscheldekering (zie paragraaf 6.2.2).



Figuur 2.2 Schematische weergave van de vertaalslag van golven op diep water naar locaties direct voor de kering.

2.3.4. Uitwerking voor de harde keringen per gebied

Hollandse kust en Zuid-Hollandse Eilanden

Voor de Hollandse kust en de Zuid-Hollandse eilanden zijn als stochastische variabelen gekozen: windsnelheid, windrichting, waterstand en golfperiode op dieper water⁴. Er is een deterministisch verband gelegd tussen de golfperiode en de golfhoogte op dieper water op basis van volledige afhankelijkheid. Dit verband is overigens alleen op de gekozen diepwater-stations geldig. De sterkte van de kering is deterministisch weergegeven door de rekenregels in de VTV (VTV, 2004).

De golfperiode is als stochastische variabele meegenomen omdat de variatie van deze variabele op diep water een direct effect heeft op de variatie op ondiep water vlak voor de waterkering, en daarmee dus van belang is voor de faalkans. Voor de golfhoogte is dat in veel mindere mate het geval, omdat deze vrijwel geheel bepaald wordt door de locale bodemdiepte dicht bij de kust. Voor golfhoogte is de fysica (vertaling naar ondiep water) dus erg belangrijk. De vertaalslag van de golfparameters naar ondiep water is uitgevoerd met het golfmodel SWAN. De 'rand'voorwaarden voor het model bestaan uit golfcondities op locaties waar de golfstatistiek beschikbaar is.

Zoals eerder aangegeven heeft de bodemligging voor de kust, en in het bijzonder de bodemligging vlak voor de waterkering, een grote invloed op de resulterende golfbelasting. Bij de harde waterkeringen is in het

⁴ Met diep water wordt hier niet bedoeld dat er sprake is van diepwatergolven. Hier wordt bedoeld dat aangaande ondiepwatergolven zoals die op de Noordzee optreden er nog geen sprake is van processen als golfbreking. Hiervoor worden meetstations nabij de -20m diepwatერიlijn gekozen.

verleden uitgegaan van de meest recente bodemligging, maar bijvoorbeeld bij de Pettemer Zeewering varieert de bodemligging globaal tussen de waarden -4 m NAP en -1 m NAP. De bodemligging kan zelfs van jaar tot jaar sterk verschillen, zodat bijna onafhankelijkheid tussen de bodemdiepte van opeenvolgende jaren geldt. Omdat de af te geven hydraulische randvoorwaarden representatief moeten zijn voor de komende periode van 5 jaar, moet met deze variatie rekening worden gehouden. Er wordt aangenomen dat de gemiddelde bodemligging nabij de kust over de laatste 10 jaar representatief is. De bijdrage aan de faalkans door schommelingen rondom dit gemiddelde wordt niet in rekening gebracht.

De vertaling van golven van diep naar ondiep water met het rekenmodel SWAN is gemaakt voor 504 verschillende condities op diep water, te weten combinaties van waterstand (6 niveau's), windsnelheid (6 niveau's), windrichting (7 sectoren) en golfperiode (2 waarden). Hiermee wordt een transformatiematrix van waarden gegenereerd waarmee zeer snel de vertaling kan worden uitgevoerd. Het rooster van invoerwaarden dekt grotendeels het spectrum van mogelijke gebeurtenissen. Voor tussenliggende waarden van de waterstand, windsnelheid, windrichting en golfperiode worden de condities aan de kust bepaald op basis van interpolatie tussen de beschikbare rekenresultaten.

Voor de waterkering bij Petten zijn de rekenresultaten van het golfmodel SWAN vergeleken met gemeten golfcondities. Op basis van deze vergelijkingen zijn correctiefactoren gedefinieerd voor de uitvoer van SWAN. Zie voor de verdere uitwerking hoofdstuk 6.

Zeeuwse kust en estuaria,

De aanpak voor de Zeeuwse kust bezuiden de Oosterscheldekering en in de Ooster – en Westerschelde wijkt op enkele onderdelen af van de aanpak van de Hollandse kust en de Zuid-Hollandse Eilanden. Dit verschil in aanpak is met name ingegeven door beperkingen in budget en doorlooptijd.

Voor dit gebied is gebruik gemaakt van bestanden met resultaten van golfberekeningen die reeds eerder zijn uitgevoerd voor de renovatie van dijkbekledingen. Voor een overzicht van deze resultaten verwijzen we naar (Alkyon, 2005b). Deze resultaten zijn beschikbaar voor verschillende combinaties van de windsnelheid, windrichting, en waterstand, zodat deze als stochastische variabelen in de probabilistische rekenmethode meegenomen zijn. De transformatiematrix voor de vertaling van golven van diep naar ondiep water is gemaakt voor 288 combinaties van waterstand (3 niveau's), windsnelheid (6-7 niveau's) en windrichting (14 sectoren).

De golfperiode is voor dit gebied niet als stochastische variabele meegenomen omdat daarvoor de benodigde SWAN-berekeningen niet beschikbaar zijn. Behalve mogelijk voor de West Kappelse zeewering wordt er geen effect van deze benadering verwacht. Op diep water is een deterministisch verband aangenomen tussen de waterstand,

windsnelheid en windrichting enerzijds en de golfperiode en de golfhoogte anderzijds.

De beschikbare berekeningen met het golfmodel SWAN zijn in de jaren 1997-2000 gemaakt voor gebruik bij het ontwerp van de dijkbekledingen in Zeeland. Bij deze berekeningen zijn diverse ingrepen in de modelschematisatie toegepast om een golfbelasting op de waterkering te realiseren die zwaarder is dan in werkelijkheid verwacht mag worden. De bodemdiepte is bijvoorbeeld ter plaatse van diverse schorgebieden kunstmatig met 0,5 m verdiept, en diverse platen zijn met 1 m verdiept. Door gebruik van deze gegevens voor het opstellen van de Hydraulische Randvoorwaarden is niet voldaan aan het uitgangspunt om de verwachtingswaarde te leveren, zoals in paragraaf 2.3.1 genoemd.

Analoog aan de Hollandse kust en Zuid-Hollandse Eilanden zijn ook voor dit gebied correctiefactoren afgeleid om de verschillen tussen metingen en berekeningen met het SWAN model te compenseren. Zie voor de verdere uitwerking hoofdstuk 6.

Oosterscheldekering

Voor de Oosterschelde aan de buiten- (Noordzee) zijde van de kering is eveneens een enigszins aangepaste aanpak gebruikt. In de beschikbare matrix met resultaten van golfberekeningen voor Zeeland waren geen gegevens beschikbaar voor de Oosterscheldekering, en ook hier ontbraken budget en doorlooptijd om de algemene aanpak volledig uit te werken.

Er is gekozen voor het opstellen van een matrix met golfberekeningen die alleen geschikt is voor een kering georiënteerd op het noordwesten, en die alleen bij hoge waterstanden wordt belast.

De vertaling van golven van diep naar ondiep water is gemaakt voor 24 combinaties van waterstand (3 niveau's), windsnelheid (2 niveau's) en windrichting (4 sectoren). Zie voor de verdere uitwerking hoofdstuk 6.

Wadden

De kwaliteit van de modellering van de voortplanting van de golven vanaf de Noordzee naar de Waddenzee via de zeegaten tussen de eilanden is nog niet goed vast te stellen omdat er geen betrouwbare meetgegevens beschikbaar zijn. Momenteel start een meetcampagne die hierin moet voorzien. In afwachting daarvan is in het kader van HR2006 nogmaals gekozen voor het vasthouden van de waarden voor de golfbelasting uit de HR 1996 en 2001.

De inventarisatie van de ontwerpwaarden voor de HR 1996 was voor de harde waterkeringen aan de Waddenzee niet volledig. Op enkele locaties ontbraken gegevens, en voor Groningen is destijds bij gebrek aan de ontwerpwaarden het resultaat van een destijds beschikbaar golfmodel gebruikt. Dit leverde destijds een inconsistent verloop op van de Hydraulische Randvoorwaarden van Friesland naar Groningen. Daarom is bij de voorbereidingen voor de Hydraulische

Randvoorwaarden 2006 met hulp van de waterkeringbeheerders een uitgebreide inventarisatie uitgevoerd van bestaande ontwerpwaarden. Op basis van deze inventarisatie zijn de randvoorwaarden voor 2006 samengesteld. Zie voor de verdere uitwerking hoofdstuk 7.

2.4 Uitwerking voor duinwaterkeringen

2.4.1. Algemene aanpak

Ook voor duinwaterkeringen dienen waterstanden en golven als invoer voor de rekenregels uit (VTV, 2004) voor het uitvoeren van de 5-jaarlijkse toetsing op veiligheid. Echter, voor duinwaterkeringen is de vertaling van de veiligheidsnorm in een rekenregel en hydraulische randvoorwaarden anders tot stand gekomen dan voor de harde waterkeringen. De belangrijkste verschillen zijn:

- Een duinwaterkering is vrijwel daadwerkelijk bezwiken als het faalmechanisme optreedt. Het uitgangspunt uit de (WoW, 2002) dat een waterkering bij maatgevende omstandigheden nog 'volledig standzeker' moet zijn, heeft hier geen onderbouwing vanuit het waterkeringssysteem. Dit in tegenstelling tot bij de harde waterkeringen, waar er bij het falen door bv. teveel golfoverslag veelal nog reststerkte aanwezig is. Daarom is bij duinwaterkeringen de vertaling van 'volledig standzeker' gemaakt door de veiligheid te baseren op de normfrequentie gedeeld door een factor tien.
- Hydraulische randvoorwaarden worden niet alleen bepaald op basis van statistische variabelen aan de belastingkant (waterstand, golven), maar ook aan de sterktekant. Daar waar bij harde waterkeringen de gemiddelde waarden voor de dimensies aan de sterktekant worden gebruikt (bijvoorbeeld de dikte van de bekleding op het talud), wordt voor duinwaterkeringen niet de gemiddelde korreldiameter, maar een "rekenwaarde" gebruikt (bv. het gemiddelde plus een deel van de standaardafwijking). Deze rekenwaarde wordt vastgesteld op basis van probabilistische berekeningen waar de korreldiameter als stochastische variabele fungeert. Ook aan de belastingkant zijn op basis van de probabilistische analyses rekenwaarden bepaald.

Om het toetsproces handzaam te houden is, net als voor harde waterkeringen, gebruik gemaakt van een zekere representatieve combinatie van de hydraulische belasting: een waterstand en bijbehorende golfkarakteristieken. Dat is die combinatie van waterstand en golven die leidt tot dimensies van de duinwaterkering waarbij de kans op falen voor dat betreffende faalmechanismen gelijk is aan de veiligheidsnorm/10.

2.4.2. Uitgangspunten

De eerste drie uitgangspunten van harde waterkeringen uit paragraaf 2.3.1 worden ook voor duinwaterkeringen gehanteerd. Daarnaast geldt nog een ander uitgangspunt dat praktisch van aard is, nl. dat uitgangspunten ten aanzien van de rekenwaarden voor de belastingkant

gebruikt worden uit (TAW, 1984). De aanleiding voor deze aanpak ligt in het feit dat de rekenregel voor het toetsen van de veiligheid van duinwaterkeringen medio 2007 wordt gewijzigd. Dit is met name om de effecten van de golfperiode in rekening te brengen. In het kader van HR2006 is het niet mogelijk geweest om probabilistische analyses uit te voeren met de nieuwe rekenregel. Daarom was het niet mogelijk de uitgangspunten ten aanzien van de rekenwaarden voor de belastingkant opnieuw te bepalen. In concreto betekend dit dat gewerkt wordt met het rekenpeil (2/3 maal de decimeringshoogte⁵ boven het zogenaamde ontwerppeil⁶), en met de daarbij behorende verwachtingswaarde van de golfcondities op diep water (-20 m NAP).

Het vierde uitgangspunt voor duinen is dat er bij een juist 'veilig' duin nagenoeg geen reststerkte aanwezig is (zie paragraaf 2.4.1) en dat de hydraulische randvoorwaarden representatief moeten zijn voor een frequentie van 10^{-5} per jaar.

2.4.3. Uitwerking per gebied

Hollandse kust en Waddengebied

Bij het afleiden van de hydraulische belasting voor duinwaterkeringen op de 20 m dieptelijn wordt uitgegaan van de wind als belangrijkste oorzaak voor zowel hoog water als hoge en lange golven. De methode voor het bepalen van de verwachtingswaarde van de golfhoogte, bij een gegeven waterniveau, is beschreven in (WWKZ-83G.218). Om te garanderen dat harde waterkeringen en duinen langs dezelfde veiligheidsmaatlat worden gelegd, is de methode afgeregeld op de marginale statistiek van wind, waterstand en golfhoogte langs onze kust die ook voor harde waterkeringen is gehanteerd. Zie voor de uitwerking hoofdstuk 8.

Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden

De golfbelasting voor de duinwaterkeringen in het zuiden van ons land wordt aanzienlijk beperkt door de ligging van de Voordelta. De golfbelasting op de 20 m dieptelijn is daarom te zwaar en niet representatief voor de veiligheidsbeoordeling. Daarom is in het verleden voor het zuidelijk deel van onze kustlijn een vertaling gemaakt van de 20 m dieptelijn naar een denkbeeldige locatie dicht bij de kust (WWKZ-84.V319P). In het kader van HR2006 is deze vertaalslag afgeleid met behulp van het golfmodel SWAN. Zie voor de uitwerking hoofdstuk 8.

2.5 Consequenties voor de nieuwe randvoorwaarden

De nieuwe Hydraulische Randvoorwaarden zullen consequenties hebben voor de toetsing op veiligheid van de primaire waterkeringen. DG Water heeft naast de oplevering van de nieuwe waarden voor de

⁵ de decimeringshoogte is het verschil tussen het toetspeil en een waterstand, met een overschrijdingsfrequentie die 10 keer hoger of lager is dan de overschrijdingsfrequentie van het toetspeil.

⁶ de waterstand met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de veiligheidsnorm.

Hydraulische Randvoorwaarden behoefte aan inzicht in de verschillen met de eerder afgegeven Hydraulische Randvoorwaarden. Daartoe zijn de volgende inventarisaties uitgevoerd:

- Vergelijking met de Hydraulische Randvoorwaarden 2001, tezamen met een analyse van de opgetreden verschillen. Dit is een summier analyse omdat de waarden uit 2001 grotendeels al tientallen jaren oud zijn en de totstandkoming van de waarden niet uitgebreid omschreven en beschikbaar is.
- Vergelijking met de waarden die tussentijds in 2003 beschikbaar zijn gesteld ten behoeve van het Aanvullend BeheerdersOordeel, tezamen met een analyse van verschillen in uitgangspunten en resultaten.

De uitwerking hiervan is gegeven in hoofdstukken 9 en 10.

2.6 kwaliteitsborging tijdens de uitvoering

De borging van de kwaliteit is een voortdurend aandachtspunt geweest.

- De beheerders zijn al vroeg in het project betrokken in verband met gebiedskennis en draagvlak voor de algehele aanpak,
- Diverse experts van adviesbureau's, universiteiten en GTI's hebben het projectplan beoordeeld, evenals de belangrijke tussenproducten.
- De gebruikte methoden en met name de bijbehorende software zijn uitvoerig getest op de juiste werking.

De stappen in het kader van de kwaliteitsborging tijdens de uitvoering van het project zijn gegeven in bijlage E.

Deel II: Methode ter bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Hollandse kust en Zeeland

3. Probabilistische rekenmethode harde waterkeringen Hollandse kust en Zeeland

3.1 Inleiding

Zoals beschreven in paragraaf 2.3.2 is gekozen voor een probabilistische aanpak om de hydraulische randvoorwaarden voor de harde waterkeringen te bepalen. Er is gekozen voor een speciale variant van de Monte Carlo simulatie methode die alleen voor sterk afhankelijke variabelen geldig is, ook wel “De Haan” genoemd. Hiermee wordt de kans op het optreden van een zeker faalmechanisme voor een waterkering berekend. Tevens kunnen uit het resultaat van de berekening de bijbehorende hydraulische randvoorwaarden worden bepaald.

In dit hoofdstuk wordt de methode nader toegelicht, en wordt aangegeven op welke wijze de hydraulische randvoorwaarden worden bepaald. Tevens vormt dit hoofdstuk de inhoudelijke inleiding voor de komende hoofdstukken, waarin de afleiding van de invoergegevens voor de methode wordt beschreven.

Eerst worden in paragraaf 3.2 hier nog een aantal basisbegrippen uit de kansrekening geïntroduceerd: de betrouwbaarheidsfunctie, de grenstoestand, het faalgebied, de faalkans. Deze begrippen zullen de komende paragrafen regelmatig terugkomen. Daarna wordt in paragraaf 3.3 de faalkans berekening toegelicht. In paragraaf 3.4 wordt de toets beschreven op een belangrijke voorwaarde voor de geldigheid van de probabilistische methode, waarna in paragraaf 3.5 wordt beschreven hoe de hydraulische randvoorwaarde wordt bepaald uit het resultaat van berekeningen. In paragraaf 3.6 worden enkele praktische voordelen van de gebruikte methode gegeven. De gehele methode is in detail beschreven in (RIKZ, 2005a), en geïmplementeerd in het rekenprogramma HYDRA-K.

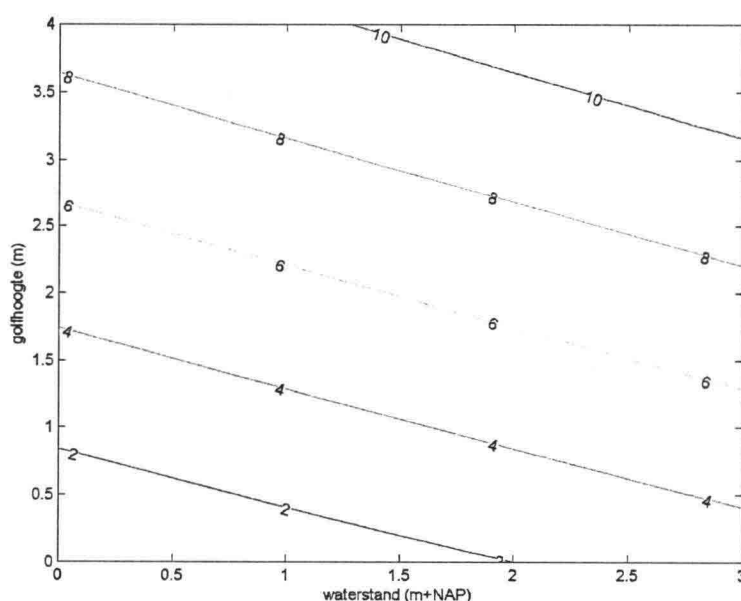
3.2 Basisbegrippen beoordeling betrouwbaarheid

Er zijn verschillende faalmechanismen die het bezwijken van waterkeringen kunnen veroorzaken, zoals golfoploop/overslag, instabiliteit van de dijkbekleding of instabiliteit van het dijklichaam/ondergrond. Voor de meeste van deze faalmechanismen zijn in HYDRA-K zogenoemde “betrouwbaarheidsfuncties” geïmplementeerd. Betrouwbaarheidsfuncties zijn wiskundige formuleringen waarmee de sterkte van de kering wordt vergeleken met de heersende hydraulische belasting. De grenstoestandsfunctie bevat die situaties (de grenstoestanden) waarin de betrouwbaarheidsfunctie precies nul is. De belasting is dan precies gelijk aan de sterkte constructie.

Het principe van een betrouwbaarheidsfunctie is eenvoudig te illustreren aan de hand van het voorbeeld in Figuur 3.1. Daarin is middels gekleurde contourlijnen de hoogte van de golfoploop tegen de dijk weergegeven als functie van de heersende waterstand (horizontale as) en golfhoogte (verticale as) aan de teen van de dijk. Voor de inzichtelijkheid zijn in dit voorbeeld andere invloeden, zoals de golfperiode en de golfrichting, buiten beschouwing gelaten.

Beschouw nu een dijk waarvan de kruin op NAP+8m ligt. Deze hoogte wordt precies bereikt bij combinaties van waterstand en golfhoogte die leiden tot een punt op de oranje lijn in Figuur 3.1. Het gebied (rechts-)boven de oranje lijn wordt gevormd door alle mogelijke combinaties van de waterstand en de golfhoogte die een golfoploop van boven de NAP+8m opleveren en dus tot falen leiden. In het vakgebied van de probabilistiek (kansrekening) wordt dit gebied het *faalgebied* genoemd: het gebied waar de hydraulische belasting groter is dan de sterkte van de kering. De contourlijn van, in dit voorbeeld, NAP+8m wordt de *faalgrens* of *grenstoestand* genoemd.

Met een probabilistische methode kan de kans worden berekend dat de constructie faalt. De faalkans is (in het voorbeeld van Figuur 3.1) feitelijk de integratie van de kans op alle combinaties van waterstand en golfhoogte waarbij de betrouwbaarheidsfunctie kleiner is dan nul, hier dus het gebied rechtsboven de lijn die een golfoploophoogte van 8m +NAP aangeeft.



Figuur 3.1 Voorbeeld van de golfoploophoogte (in m+NAP) op de dijk als functie van waterstand en golfhoogte voor de kering.

Met het rekenprogramma HYDRA-K wordt een dergelijke kansberekening uitgevoerd. Naast de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag, die gebruikt worden bij de beoordeling van de

constructiefunctie, zijn er ook andere faalmechanismen beschikbaar gemaakt in HYDRA-K, die betrekking hebben op de dijkbekleding. Tabel 3.1 toont de verschillende typen bekleding die in HYDRA-K zijn opgenomen en de bijbehorende faalmechanismen. Voor een uitgebreide beschrijving van de faalmechanismen en de wijze waarop ze geïmplementeerd zijn wordt verwezen naar (WL/TNO 20003a,b; 2004a,b,c) en (HKV, 2005). Zoals eerder gemeld zijn de formules voor de faalmechanismen gebaseerd op het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV, 2004).

Tabel 3.1 Faalmechanismen voor verschillende typen dijkbekledingen in HYDRA-K

Dijkbekleding	Faalmechanisme
gras	- erosie door golfklappen - erosie door stroming in golfoploop
steenstelling	- topaagstabiliteit - afschuiving
asfalt	- schade door golfklappen - schade door statische overdruk
breuksteen	- schade door golfklappen
betonblokken (2 lagen)	- schade door golfklappen

3.3 Berekenen van de faalkans

3.3.1. De Haan als een variant op de standaard Monte Carlo analyse

In een standaard Monte Carlo analyse wordt uit de kansverdelingen van (in het voorbeeld van paragraaf 3.2 en Figuur 3.1) waterstand en golfhoogte trekkingen gedaan, en wordt bijgehouden welk deel van de trekkingen in het faalgebied vallen. De faalkans is dan gelijk aan het aantal trekkingen in het faalgebied gedeeld door het totaal aantal trekkingen.

Een moeilijkheid is dat omstandigheden met zulke kleine kansen worden gezocht, dat er zeer veel trekkingen moeten worden verricht alvorens er voldoende in het faalgebied liggen om een nauwkeurige kans uit te rekenen. Daarvoor wordt wel de methode ‘important sampling’ gebruikt. Die houdt in dat er een belangrijk domein wordt geselecteerd van de te trekken parameters, waarbij alleen uit dat domein trekkingen worden verricht. Van de gecombineerde trekkingen moet dan bekend zijn dat ze in de buurt van het faalgebied liggen. Er behoeven dan veel minder trekkingen te worden verricht dan met een standaard Monte Carlo procedure, maar er moet nog wel in de kansrekening worden gecorrigeerd voor het feit dat alleen trekkingen worden verricht in een bepaald domein uit de kansverdelingen. Wordt er alleen getrokken in het gebied met een kans kleiner dan $1/1000$, dan moet de gevonden faalkans nog worden gedeeld door 1000.

In een standaard Monte Carlo procedure wordt van alle parameters de kansverdeling én de afhankelijkheid tussen de parameters expliciet bekend verondersteld. Het uitgangspunt van de methode ‘De Haan’ is dat de expliciete omschrijving van de afhankelijkheid niet nodig is, omdat deze opgesloten zit in de waarnemingen op de golfmeetlocatie. Dit zijn geen extreme gebeurtenissen, maar ‘De Haan’ neemt als uitgangspunt dat de afhankelijkheidsstructuur tussen de verschillende parameters gelijk blijft in het extreme gebied (asymptotische afhankelijkheid, zie paragraaf 3.4). ‘De Haan’ verschuift onder deze aanname de waargenomen gebeurtenissen naar het extreme gebied, waarbij deze opgeschoven of ‘opgeschaalde’ waarnemingen de ‘important samples’ van de Monte Carlo analyse vormen.

3.3.2. Faalkansberekening volgens De Haan

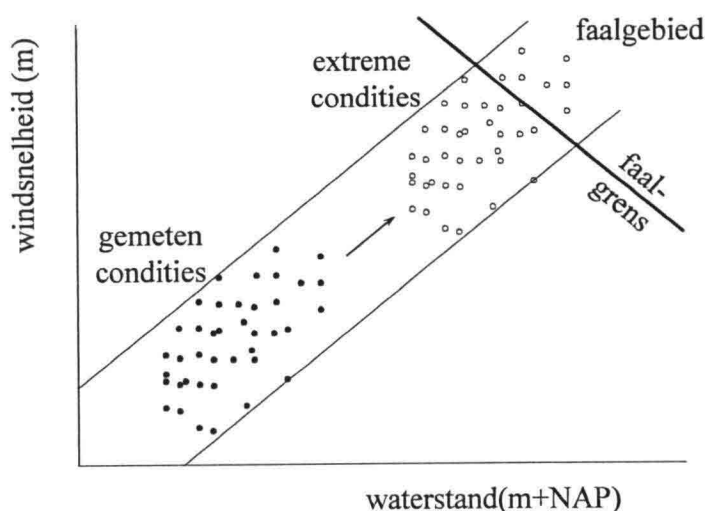
De theoretische basis van de methode ‘De Haan’ is afkomstig van (De Haan en Resnick, 1977) en is voor toepassing op waterkeringen aan zee uitgewerkt door De Valk (1996). In (RIKZ, 2005a) is de praktische uitwerking van de methode in detail omschreven. In deze paragraaf wordt een globaal overzicht gegeven.

Het genereren van ‘important samples’

Met de methode de Haan wordt middels de in paragraaf 3.2.1 ingeleide verschuiving of opschaling elke waargenomen stormgebeurtenis getransformeerd in een voor de grenstoestandsfunctie relevante extreme stormgebeurtenis (zie Figuur 3.2). Hiertoe worden de marginale verdelingsfuncties die niet exponentieel verdeeld zijn eerst

getransformeerd in een overeenkomstige exponentiele verdeling. Dit is een praktische tussenstap om de kansberekening te vereenvoudigen. Vervolgens worden alle variabelen van een gemeten conditie worden in termen van hun getransformeerde marginale overschrijdingsfrequentie over een even grote factor verschoven, bijvoorbeeld een factor 1000.

De waargenomen gebeurtenis is gemeten op een van de golfmeetlocaties op diep water, en de opgeschaalde gebeurtenissen bevinden zich dus ook op diep water. De getekend faalgrens in figuur 3.2 is dan ook virtueel, alleen bedoeld om aan te geven naar welk niveau de gebeurtenissen worden opgeschaald. Omdat dit niveau voorafgaande aan de berekening nog niet bekend is, wordt deze stap op iteratieve wijze uitgevoerd net zolang tot het gewenste niveau is bereikt.



Figuur 3.2 Schematische weergave van het opschalen van stormgebeurtenissen tot nabij of zelfs in het faalgebied.

Vertaling naar de waterkering met een transformatiematrix

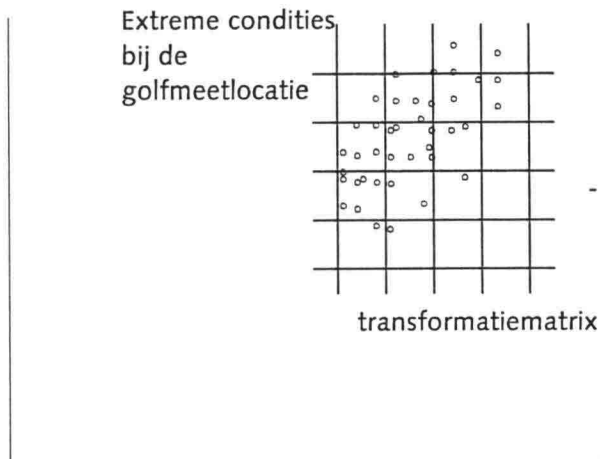
Een probleem bij onderhavige toepassing is dat de locaties waar de kansverdelingen bekend zijn, niet direct voor de waterkering liggen. Daarmee moet er een vertaalslag worden gemaakt tussen de locatie waar de trekkingen worden verricht, en de locatie waar de Monte Carlo simulatie daadwerkelijk wordt uitgevoerd. De trekkingen worden gedaan op de diepwater golf meetlocaties, de vertaling met golfmodel SWAN.

Na de opschaling maakt HYDRA-K dus voor elke stormgebeurtenis de vertaalslag van diep water (orde 20 m diep) naar ondiep water nabij de kering. Deze vertaalslag van diep water naar de kering geschiedt met een transformatiematrix (de database KustDB2006, zie paragraaf 6.3.8) met rekenresultaten van het golfmodel SWAN. Dit is in Figuur 3.3 geïllustreerd voor de transformatie van windsnelheid naar lokale golfhoogte, en wordt op deze wijze ook uitgevoerd voor de vertaling van windsnelheid in lokale golfperiode. Elke opgeschaalde

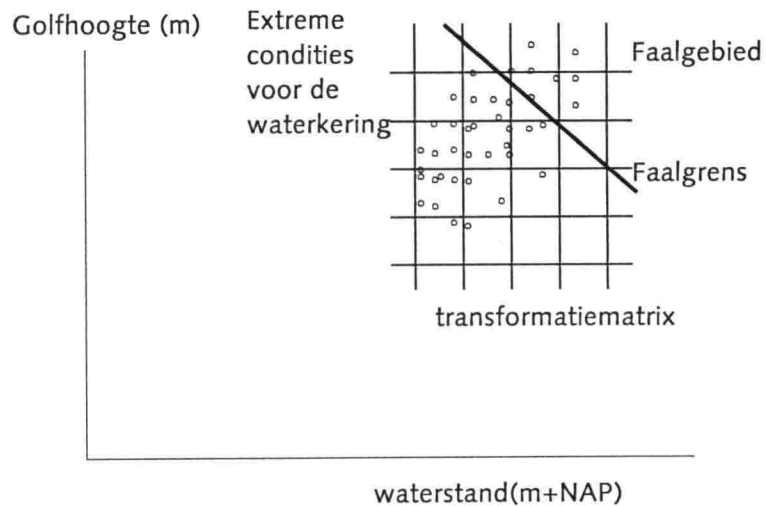
stormgebeurtenis in termen van wind en waterstand, ligt ergens in de matrix. De omliggende punten corresponderen met punten op ondiep water (onderste figuur) zodat middels interpolatie de stormgebeurtenis naar ondiep water voor de waterkering geprojecteerd kan worden. Feitelijk is de matrix meerdimensionaal zodat ook andere diepwaterparameters als windrichting en diep water golfperiode vertaald worden in lokale golfparameters.

Vervolgens wordt een betrouwbaarheidsfunctie behorend bij een faalmechanisme (zie paragraaf 3.2) voor elke 'waarneming' toegepast om te bepalen of de kering voor die situatie faalt voor het betreffende faalmechanisme. In Figuur 3.3 is dit principe weergegeven door de faalgrens en het faalgebied in te tekenen.

windsnelheid (m)



waterstand(m+NAP)



Figuur 3.3 Schematische weergave van het vertalen van stormgebeurtenissen naar de waterkering met behulp van een transformatiematrix

De kansberekening

De kans op falen wordt nu bepaald middels een integratie over de gehele opgeschaalde puntenwolk. De grootte van de verschuiving, ν , wordt uitgedrukt in termen van frequentie. Het verschuiven van de waarnemingen is zodanig dat er voldoende waarnemingen in het faalgebied terecht komen zodat de faalfrequentie van de kering nauwkeurig kan worden bepaald. Daarna kan op eenvoudige wijze een faalfrequentie bepaald worden met de volgende formule:

$$\mu = \frac{\kappa}{\Delta} e^{-\nu} \quad (3.1)$$

met

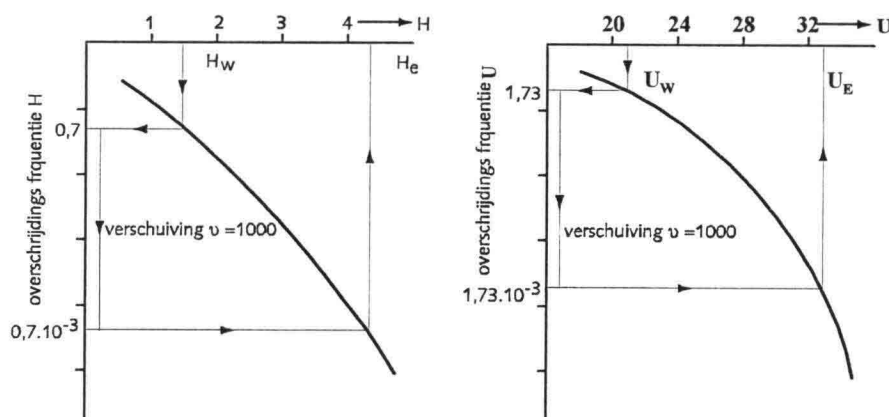
- μ = de faalfrequentie (per jaar);
 κ = aantal punten dat in het faalgebied geschoven is;
 υ = de grootte van de verschuiving in de exponentieel verdeelde ruimte;
 Δ = de lengte van de meetreeks (in jaren).

Uit formule (3.1) blijkt dat de faalfrequentie afhankelijk is van:

- κ : het aantal stormgebeurtenissen waarvoor (na opschaling) wordt vastgesteld dat deze tot falen van de kering leiden. Hoe meer faalgebeurtenissen, des te groter de faalkans;
- υ : de grootte van de verschuiving die gebruikt is om de stormgebeurtenissen op te schalen. Hierbij geldt dat hoe groter de mate van opschaling, des te kleiner de faalkans. Vergelijk bijvoorbeeld twee dijken met een kruinhoogte van NAP+8m respectievelijk NAP+10m. Voor het faalmechanisme golfoverslag heeft de tweede dijk per definitie een kleinere faalkans. Dat impliceert dat voor de tweede dijk extremere condities van wind en waterstand nodig zijn om tot falen te leiden. De verschuiving zal dan groter moeten zijn;
- Δ : de lengte van de meetreeks. Hoe langer de meetreeks hoe meer stormgebeurtenissen zijn waargenomen. Dit zal ook aanleiding geven tot meerdere faalgebeurtenissen na opschaling. Hiervoor moet gecompenseerd worden in de berekening van de faalkans.

Illustratie van de verschuiving om een important sample te genereren

Het principe van verschuiven wordt geïllustreerd aan de hand van het voorbeeld in Figuur 3.4 waarin een simultane waarneming van waterstand, H , en windsnelheid, U staat afgebeeld. Voor de eenvoud wordt hierbij de transformatie naar een exponentiele ruimte achterwege gelaten. In dit voorbeeld heeft de waargenomen waterstand, H_w , een frequentie van overschrijden van gemiddeld 0,7 per jaar. Dat betekent dat deze waarde gemiddeld eens per 1,5 jaar wordt overschreden (want $1,5 \approx 1/0,7$). Deze waterstand treedt gelijk op met een windsnelheid, U_w , die een overschrijdingsfrequentie heeft van 1,73 per jaar.



Figuur 3.4 Voorbeeld van het verschuiven van een simultane waarneming, bestaande uit twee stochasten

Stel nu dat verschuivingsterm ν gelijk is aan 1000, dan betekent dat dat de frequenties van de waarnemingen worden herschaald met een factor 1000. In dit rekenvoorbeeld heeft dit tot gevolg dat de simultane waarneming (H_w , U_w) met frequenties 0,7 resp. 1,73 wordt verschoven naar het extreme punt (H_e , U_e) met frequenties van $0,7 \cdot 10^{-3}$ resp. $1,73 \cdot 10^{-3}$. Na de verschuiving worden de fysische waarden van H_e en U_e bepaald met gebruikmaking van de *marginale statistiek* van de afzonderlijke variabelen.

De hierboven beschreven procedure wordt, uitgaande van hetzelfde principe, uitgevoerd voor alle beschikbare simultane waarnemingen. De overschrijdingsfrequenties worden allen met dezelfde factor ν opgeschaald, geheel in lijn met de eigenschap van asymptotische afhankelijkheid.

In Bijlage D staat een getallenvoorbeeld uitgewerkt van een berekening met de methode “De Haan”.

3.3.3. Benodigde gegevens voor het berekenen van de faalkans

Voor het berekenen van de faalkans zijn de volgende gegevens nodig:

1. de *statistiek op diep water*: marginale (individuele) statistiek van de wind, de waterstand en golfparameters. Deze wordt afgeleid in hoofdstuk 5, op basis van de gegevens in hoofdstuk 4.
2. de *simultaan gemeten waarden* van de variabelen wind en hydraulische condities op diep water waarmee de onderlinge afhankelijkheid van deze variabelen wordt vastgelegd is beschreven in hoofdstuk 4.
3. de *transformatiematrix* voor vertaling van de hydraulische omstandigheden van diep water naar ondiep water nabij de kering. Deze wordt beschreven in hoofdstuk 6.
4. de *grenstoestandsfunctie(s) behorende bij een faalmechanisme*, d.w.z. het model dat de sterkte van de kering vergelijkt met de belasting op de kering. Deze worden beschreven in (VTV, 2004), en de werking is toegelicht in paragraaf 3.2. Een globaal overzicht is in Tabel 3.1 gegeven.

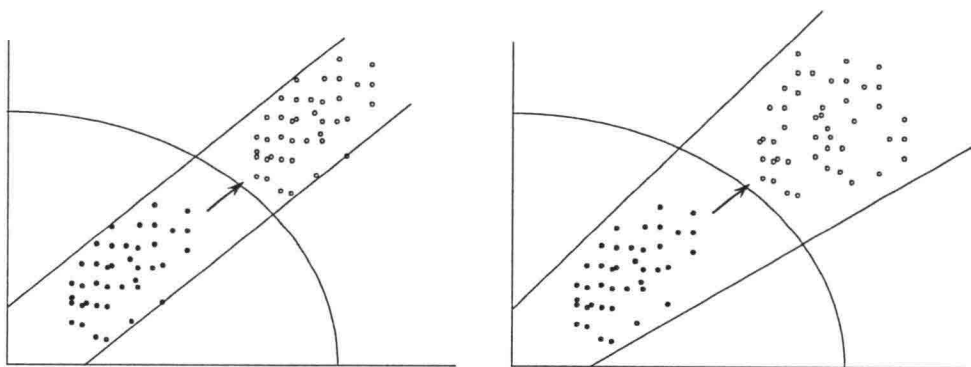
3.4 Toets op asymptotische afhankelijkheid

Afhankelijkheid tussen 2 variabelen of stochasten impliceert dat de waarde van de één iets zegt over de kansverdeling van de uitkomst van de ander. Bijvoorbeeld wind en golfhoogte zijn afhankelijk omdat bij hoge windsnelheid de kans groot is dat ook hoge golven gemeten worden. De mate van afhankelijkheid tussen twee stochasten wordt in de regel gekwantificeerd middels de zogenaamde “correlatie-coëfficiënt”.

De methode De Haan, die ten grondslag ligt aan HYDRA-K, is alleen onverkort geldig als de betrokken stochasten *asymptotisch* afhankelijk zijn. Dat is een specifieke vorm van afhankelijkheid, waarbij geldt dat de stochasten in het extreme bereik *vrijwel volledig* afhankelijk zijn. Volledige afhankelijkheid wil zeggen dat op basis van een meting van de ene stochast *exact* bekend is welke waarde de andere stochast aanneemt. De lichte afzwakking met het woord “vrijwel” geeft aan dat dat laatste niet het geval is, maar dat de tweede stochast wel met grote zekerheid een waarde aanneemt binnen een relatief klein interval. Voor wind, waterstand en golven is dit voor de NW-richtingen al te beredeneren.

Asymptotische afhankelijkheid

De methode De Haan gaat ervan uit dat de puntenwolk van de waarnemingen te verschuiven is naar het extreme gebied zonder dat de puntenwolk uitwaaiert (zie Figuur 3.5). Wiskundig gezien wordt dit fenomeen “*asymptotische afhankelijkheid*” genoemd. De meetreeksen van wind en waterstand zijn hierop uitgebreid getoetst.



Figuur 3.5 Voorbeelden van niet uitwaaieren (asymptotisch afhankelijk) en van wel uitwaaieren (asymptotisch onafhankelijk).

In (Argoss, 2004/2006) is de onderlinge afhankelijkheid van het voorkomen van hoge waarden van windsnelheid, waterstand, significante golfhoogte en golfperiode-maten onderzocht aan de hand van de meetgegevens (paragraaf 4.7, meetgegevens voor gecombineerde statistiek) die ook als invoer dienen van HYDRA-K. Deze afhankelijkheid is gekwantificeerd in schattingen van een parameter: de “*staart-correlatie-coëfficiënt*”. Deze geeft voor de hoogste waarden in de meetreeks (de staart) aan hoe groot de correlatie-coëfficiënt is.

Door middel van schattingen van de staart-correlatie-coëfficiënt en een daaraan gerelateerde toets is onderzocht in hoeverre sprake is van asymptotische afhankelijkheid van verschillende hydraulische parameters op dezelfde meetlocatie of nabijgelegen locaties. In verreweg de meeste gevallen blijkt er sprake van positieve onderlinge afhankelijkheid over een breed bereik van windrichtingen. Uitzonderingen (zoals waterstand en windsnelheid voor bepaalde windrichtingen) zijn te verklaren.

De resultaten uit (Argoss, 2006) wijzen in het algemeen niet op asymptotische afhankelijkheid noch op asymptotische onafhankelijkheid. Bij asymptotische afhankelijkheid is de staartcorrelatiecoëfficiënt ongeveer 1. De afhankelijkheid uitgedrukt in een correlatiecoëfficiënt is bekeken voor verschillende paren van parameters en is voor de noordwestelijke windrichtingen het grootst, en in de regel variërend van 0,5-0,6 voor de combinatie van windsnelheid en waterstand, en 0,65-0,85 voor de combinatie golfhoogte en waterstand. Een uitzondering is locatie Scheur-West (SCW) waar geen afhankelijkheid wordt gevonden wat waarschijnlijk zijn oorzaak vindt in golfbreking in de Voordelta. Dit hoofdstation is dan ook niet in beschouwing genomen bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden voor de harde keringen in dit gebied (Europlatform is gebruikt). Er zijn echter verschillende redenen waarom de mate van afhankelijkheid in bij het onderzoek uit Argoss (2006) mogelijk onderschat wordt. De belangrijkste daarvan is dat de meetreeksen relatief kort zijn. Vanuit de kennis over het fysisch systeem mag worden verwacht dat bij zwaardere stormomstandigheden de afhankelijkheid toeneemt⁷.

Met de aanname van asymptotische afhankelijkheid overschat de methode de Haan de werkelijke afhankelijkheid enigszins. Dat leidt ertoe dat de uitkomsten van de methode kunnen afwijken *in de richting* van de uitkomsten van een deterministische berekening zoals voorheen is toegepast. In dergelijke deterministische relaties wordt de windsnelheid met een overschrijdingsfrequentie van, bijvoorbeeld, 1/100 per jaar gekoppeld aan de waterstand met dezelfde overschrijdingsfrequentie van 1/100 per jaar. Dat betekent dat de methode de Haan mogelijke enigszins conservatieve (robuuste)

⁷ Een factor in de data-analyse is dat stormmaxima niet hoeven samen te vallen met waterstandsmaxima, mede ten gevolge van getij. Ook zijn er onzekerheden die samenhangen met de gevoeligheid van de gebruikte methode waarmee de asymptoot bepaald wordt uit de onderliggende data.

schattingen geeft van de hydraulische belasting. Net zoals bij een deterministische berekening leidt de aanname van asymptotische afhankelijkheid tot robuuste schattingen, zij het dat deze overschatting veel geringer is dan voor het voorbeeld van volledige correlatie.

3.5 Bepalen van hydraulische randvoorwaarden

De hydraulische randvoorwaarden langs de kust bestaan uit een (maatgevende) combinatie van de waterstand en golfparameters en dienen als invoer voor een toets op de veiligheid op basis van de rekenregels uit de VTV (VTV, 2004). De probabilistische berekening zoals beschreven in paragraaf 3.3 geeft de faalkans van de kering voor alle mogelijke combinaties van waterstand en golfparameters (de stormgebeurtenissen) maar nog niet de maatgevende combinatie van parameters voor de randvoorwaarden. Binnen HYDRA-K worden deze randvoorwaarden vastgesteld middels een zogenaamde *berekening van het illustratiepunt*. In de theorie van betrouwbaarheid van constructies wordt de term “ontwerppunt” (Engels: design point) vaak gebruikt. Dit is gedefinieerd als de combinatie van variabelen waarvoor geldt:

1. het ontwerppunt ligt op de faalgrens; en
2. van alle punten op de faalgrens heeft het de grootste kans van voorkomen.

Voorafgaand aan het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden (c.q. het illustratiepunt) wordt dus altijd eerst een faalkansberekening uitgevoerd, om aantoonbaar aan eis 1 te kunnen voldoen.

Figuur 3.6 geeft een schematische weergave van de bepaling van het illustratiepunt voor 2 stochasten (waterstand en windsnelheid). Hierin is te zien dat het illustratiepunt op de faalgrens ligt, zoals gedefinieerd. In feite dient de faalgrens “afgelopen” te worden om na te gaan welk punt op de faalgrens de grootste kans van voorkomen heeft. Het probleem is echter dat daarvoor de gezamenlijke kansverdeling nodig is. Deze is niet beschikbaar omdat de methode De Haan een niet-parametrische methode is; dat wil zeggen een methode waarbij geen functievoorschrift wordt afgeleid voor de gezamenlijke kansverdeling. Daarom wordt de locatie van het illustratiepunt geschat. De basis van deze schatting is om een de lijn door het midden van de puntenwolk te definiëren waarvoor geldt dat het ontwerppunt precies op het kruispunt ligt van die lijn met de faalgrens (zie Figuur 3.6). Deze lijn loopt onder een hoek van 45 graden (in de standaard exponentiele ruimte, waarnaar alle stochastische variabelen worden getransformeerd). De exacte locatie van de lijn wordt bepaald door de term C_L in Figuur 3.6. Deze wordt als volgt bepaald:

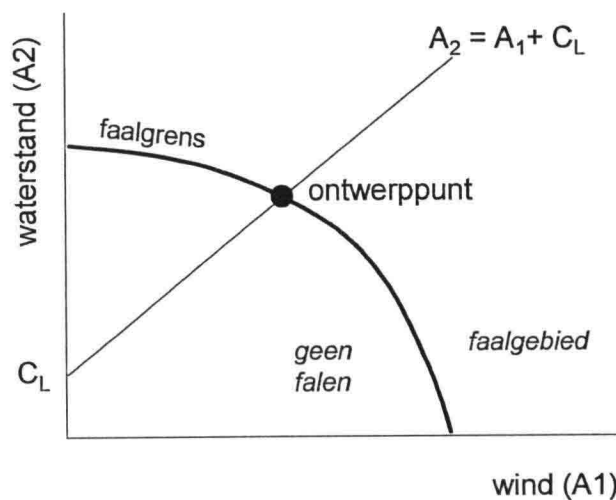
[1] De gemeten waarden van wind en waterstand worden eerst getransformeerd naar standaard-exponentieel verdeelde stochastische grootheden A_1 en A_2 (zie RIKZ, 2005a).

[2] Voor elke waarneming in het faalgebied wordt de volgende term bepaald:

$$T = \frac{A_1 - A_2}{2} \quad (3.2)$$

[3] De berekende waarden van T worden op volgorde van grootte gezet en de middelste waarde wordt bepaald. Dit is de mediaan van de variabele T . De waarde van C_L is gelijk aan $2 \cdot \text{mediaan}(T)$.

Deze benadering is vergeleken met andere, wel parametrische methoden (HKV, 1998), en is voldoende nauwkeurig gebleken.



Figuur 3.6 Schematische weergave van de methode ter bepaling van het illustratiepunt.

Het illustratiepunt bij een herhalingstijd van, bijvoorbeeld, 4.000 jaar kan gezien worden als een representatieve belasting voor die herhalingstijd. Nadrukkelijk geldt *niet* dat het illustratiepunt zelf een overschrijdingsfrequentie heeft van 1/4.000. De term overschrijdingsfrequentie heeft namelijk alleen betekenis bij individuele variabelen; het illustratiepunt is een combinatie van variabelen. Omdat het illustratiepunt gebaseerd is op het gecombineerde effect van de betrokken variabelen, geldt over het algemeen dat de waarden van de individuele variabelen in het illustratiepunt een hogere overschrijdingsfrequentie (c.q. lagere herhalingstijd) hebben dan de normfrequentie. Bijvoorbeeld de golfhoogte in het illustratiepunt dat bij een herhalingstijd van 4.000 jaar hoort, heeft in de regel een lagere herhalingstijd dan 4.000 jaar op basis van zijn eigen verdelingsfunctie.

Voor de waterstand betekent dit concreet dat deze in het illustratiepunt in de regel lager is dan het toetspeil ter plaatse (zie paragraaf 5.5.3 voor een nadere beschrijving van het toetspeil).

Keuze bepaling illustratiepunt

Voor veel praktijktoepassingen is het toetspeil echter een belangrijke randvoorwaarde. Daarom is in HYDRA-K een extra rekenoptie gemaakt waarbij het illustratiepunt per definitie een waterstand heeft die gelijk is aan het toetspeil. Het illustratiepunt moet echter op de grenstoestandsfunctie blijven liggen. In vergelijking met illustratiepunt gelijk aan het eerder gedefinieerde ontwerppunt, zijn de golfcondities dan minder zwaar. De resulterende hydraulische belasting van de twee punten zijn immers gelijk, omdat ze per definitie beiden op de faalgrens liggen. Om te compenseren voor de hogere waterstand daalt de golfbelasting dan automatisch bij deze rekenoptie.

In het kader van HR2006 is besloten om deze laatste rekenoptie toe te passen. De waterstanden in HR2006 zijn derhalve gelijk aan het toetspeil.

De bepaalde hydraulische randvoorwaarden zijn tevens relatief ongevoelig voor kleine wijzigingen in de faalgrens of het criterium. Iets andere dijkprofielen geven daarom gelijke hydraulische randvoorwaarden en benaderingen in het werkelijke dijkprofiel zijn daarom veelal toegestaan.

3.6 Meerwaarde methode De Haan

De gekozen implementatie van de methode de Haan biedt voordelen die veel andere methoden niet hebben. Het eerste voordeel is dat de niet-parametrische beschrijving van de afhankelijkheid voorkomt dat subjectieve keuzen van de vorm van verdeling noodzakelijk zijn. Het tweede voordeel is daar een gevolg van: omdat de beschrijving niet-parametrisch is kan de data selectie voor de afhankelijkheidsstructuur tijdens het rekenproces plaatsvinden. Daarmee kan voor elk faalmechanisme en elke berekening opnieuw de puntenwolk worden opgebouwd, en behoeft geen subjectieve keuze vooraf plaats te vinden. Een derde voordeel is dat de methode relatief weinig rekentijd vraagt.

Niet - parametrische beschrijving afhankelijkheid

Een klassieke aanpak voor het beschrijven van de kansverdeling van de onderlinge samenhang bestaat uit twee stappen. Eerst wordt een fysisch gebaseerde wiskundige (deterministische) relatie afgeleid tussen de variabelen, die de gemiddelde situatie zo goed mogelijk weergeeft. Vervolgens wordt met een of meer stochastische variabelen en bijbehorende kansverdelingen gesimuleerd, dat de genoemde relatie de werkelijkheid niet altijd goed weergeeft. Dit zijn de zogenaamde *parametrische* methoden. De Haan maakt echter gebruik van een *niet - parametrische* methode. Hierbij hoeft er geen aparte kansverdeling van de samenhang gesimuleerd te worden. Er wordt direct gebruik gemaakt van de reeks van gemeten simultane waarnemingen om de onderlinge samenhang van de stochastische variabelen te modelleren. Dit heeft als grote voordeel dat er geen functiebeschrijving nodig is van de gezamenlijke kansverdeling van de betrokken stochasten⁸. De methode is daardoor minder afhankelijk van aannames bij het bepalen van de samengestelde verdelingen, zoals:

1. de vorm van de spreiding: een normale- of een scheve verdeling;
2. in geval van een scheve verdeling: welke verdeling;
3. de extrapolatie van de spreiding: constant houden of juist niet.

De aanname van asymptotische afhankelijkheid is wel een keuze vooraf. Deze is vanuit de data en het watersysteem goed te onderbouwen (zie ook paragraaf 3.4).

Selectie van de data die de afhankelijkheid vastleggen

Ieder punt uit de puntenwolk in Figuur 3.2 representeert het “stormmaximum”. Elk punt is geselecteerd uit een storm van bepaalde duur, en een bepaald verloop in de tijd. Bij de meeste faalmechanismen speelt het tijdsverloop, of de duur van de storm, geen rol in de mate van belasting. De keuze van de definitie van “het stormmaximum” speelt wel een belangrijke rol. De maximale belasting door golfoverslag zal rondom het maximale stormvloedpeil liggen. De maximale belasting voor een dijkbekleding op het talud beneden de berm zal op een ander moment plaatsvinden. Het precieze moment verschilt voor elke storm maar ook voor elke locatie en dijkgeometrie. In de gekozen methode De Haan is het mogelijk de keuze van het stormmaximum tijdens het rekenproces te maken. Daarin onderscheidt de methode zich van andere, parametrische methoden, waarin de samengestelde kansverdelingen expliciet vooraf gemaakt moeten worden, en er dus voor diverse faalmechanismen, locaties en dijkgeometrieën verschillende dataselecties gemaakt moeten worden. Bij de uitwerking van de methode De Haan is gekozen de gehele tijdreeksen van de waargenomen stormgebeurtenissen op te nemen in de databestanden in HYDRA-K. Het stormmaximum wordt hier vervolgens uit geselecteerd, waarbij er 2 keuzemogelijkheden zijn:

⁸ Wel wordt opgemerkt dat naast de set van simultane waarnemingen ook de marginale statistiek gebruikt wordt in Hydra-K in de methode de Haan en deze is wel met verdelingsfuncties afgeleid.

-
1. het moment waarop de hoogste waterstand plaats vindt; of
 2. het moment waarop de hydraulische belasting maximaal is.

Voor de faalmechanismen golfploop en golfoverslag geldt dat de maximale belasting doorgaans plaats vindt op of rond het moment dat de waterstand maximaal is. Daarom is er voor de berekeningen voor HR2006 gekozen voor optie 1. In het rekenmodel zijn wel beide opties beschikbaar.

4. Meetgegevens langs de kust en op diep water; de basis voor

HR2006

4.1 Inleiding

Een belangrijk aspect van de bepaling van de hydraulische belastingen op de waterkeringen zijn de metingen van de waterstanden en golfcondities op diep water en de daaruit afgeleide statistiek. Hoofdstuk 5 beschrijft hoe de statistiek wordt afgeleid uit de beschikbare meetgegevens langs de kust en op diep water. Het onderhavige hoofdstuk beschrijft de meetgegevens waarop deze statistieken gebaseerd zijn. Een belangrijk deel van de informatie uit dit hoofdstuk is afkomstig uit (RIKZ, 2004b/2005c).

Paragraaf 4.2 en 4.3 geven een kort overzicht van de wind- en waterstandsmetingen die in de literatuur reeds uitgebreid zijn beschreven.

Paragraaf 4.4 geeft een overzicht van de locaties waar de metingen worden verricht; paragraaf 4.5 beschrijft wat er gemeten wordt. Paragraaf 4.6 gaat in op de verwerkingsslagen die nodig zijn om de metingen te vertalen naar voor de statistiek bruikbare tijdseries. Dit betreft onder andere het omzetten van de meetgegevens naar karakteristieke parameters en het opvullen van hiaten voor periodes waarin de meetapparatuur niet naar behoren heeft gefunctioneerd. Na uitvoering van de bewerkingsslagen resulteren twee typen bestanden:

1. bestanden met stormmaxima van relevante hydraulische parameters; deze worden gebruikt om de marginale statistiek af te leiden die als invoer van HYDRA-K dient; en
2. bestanden met simultane waarnemingen; deze dienen rechtstreeks als invoer in HYDRA-K en worden gebruikt om de mate van samenhang tussen de wind, waterstand en golven te kwantificeren.

De wijze van samenstellen van deze bestanden komt aan bod in de paragrafen 4.6 en 4.7.

4.2 Metingen van wind

4.2.1. Windmetingen KNMI

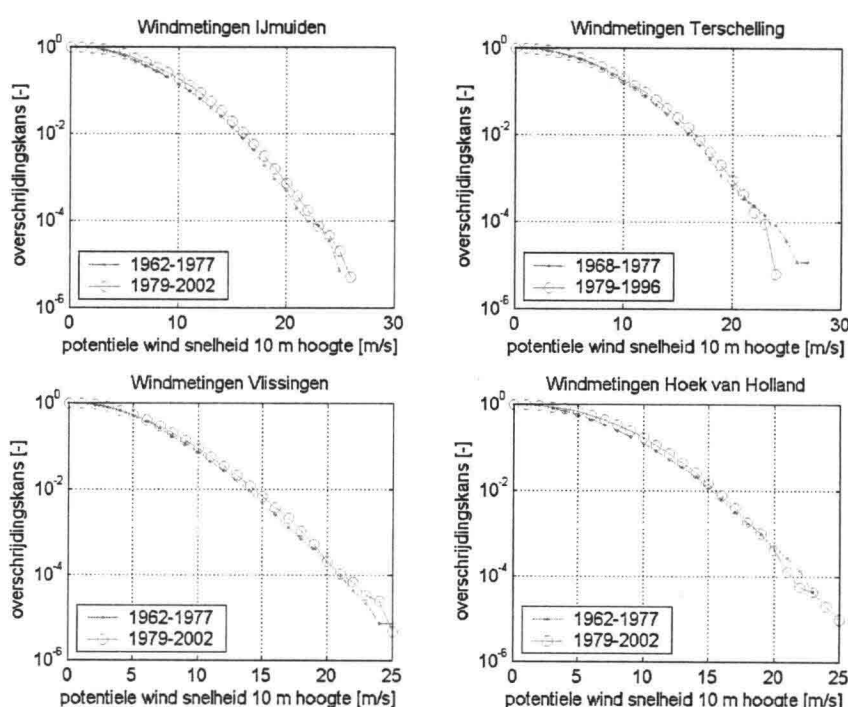
De metingen waarmee de windstatistiek is bepaald zijn uurlijkse of drieuurlijkse meetreeksen van wind van het KNMI voor kuststations. De wijze van selectie en samenstelling van de meetreeksen is beschreven door Wieringa en Rijkooft in (KNMI, 1983). Het betreft veelal reeksen over de periode 1960-1980 maar dit verschilt per locatie. De statistiek betreffende de stations hieronder besproken is voor de periode 1962-1977.

4.2.2. Vergelijking met wind uit de periode 1979-2002

In deze sectie wordt de wind van de periode 1962-1977 (de basis voor het windklimaat 1983) vergeleken met wind van de periode 1979-2002. Dit om de volgende redenen:

1. Is het windklimaat uit 1983 niet verouderd?
2. Is de windstatistiek van deze periode consistent met wind voor de periode 1979-2002 waarvoor ook de golfstatistiek in sectie 5.6 is afgeleid?

Hiertoe zijn overschrijdingskansen van windsnelheid voor beide perioden geplot voor de windsnelheid en windrichting voor IJmuiden, Terschelling, Vlissingen en Hoek van Holland (zie Figuur 4.1). De originele ruwe windmetingen (uurgegevens) zijn hiertoe gebruikt. De overschrijdingskans is gegeven als de cumulatieve fractie van voorkomen ten aanzien van de volledige meetreeks⁹.



Figuur 4.1 Overschrijdingskansen van windsnelheid voor beide perioden geplot voor IJmuiden, Terschelling, Vlissingen en Hoek van Holland.

Uit deze figuren blijkt dat de windstatistiek van 1962-1977 ook geldig is voor de periode gebruikt voor de golfstatistiek. Ook voor de windrichting zijn dergelijke overeenkomsten gevonden uitgezonderd voor de richting noordoost voor het station Hoek van Holland (10% voor 1969-1977 en 15% voor latere perioden).

⁹ Voor vergelijking met de overschrijdingsfrequentie voor de figuren uit sectie 4.4.1 dient men de dimensieloze overschrijdingskans te vermenigvuldigen met het aantal uren per jaar (8760).

4.3 Metingen van waterstanden

De waterstandsmetingen die gebruikt zijn bij het afleiden van de basispeilen zijn waterstandsmeeetreeksen in de peilmeetstations Delfzijl, West-Terschelling, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland, Vlissingen, Terneuzen en Hansweert (RIKZ, 1993a; 1993b, 1993c; 1995a). Deze meetreeksen vormen de basis voor de statistische methoden en de hydrodynamische berekeningen van stormen waaruit de ‘basispeilen 1985’ zijn afgeleid (zie paragraaf 4.5). Een vijftal van deze stations heeft bij het statistisch onderzoek bijzondere aandacht gekregen en wordt mede daarom ‘hoofdstation’ genoemd (RIKZ, 1993a). Het betreft Vlissingen, Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. De meetreeksen in deze stations beginnen voor Den Helder en Harlingen na de afsluiting van de Zuiderzee (1932) en voor de andere 3 stations in de tachtiger jaren van de 19^e eeuw.

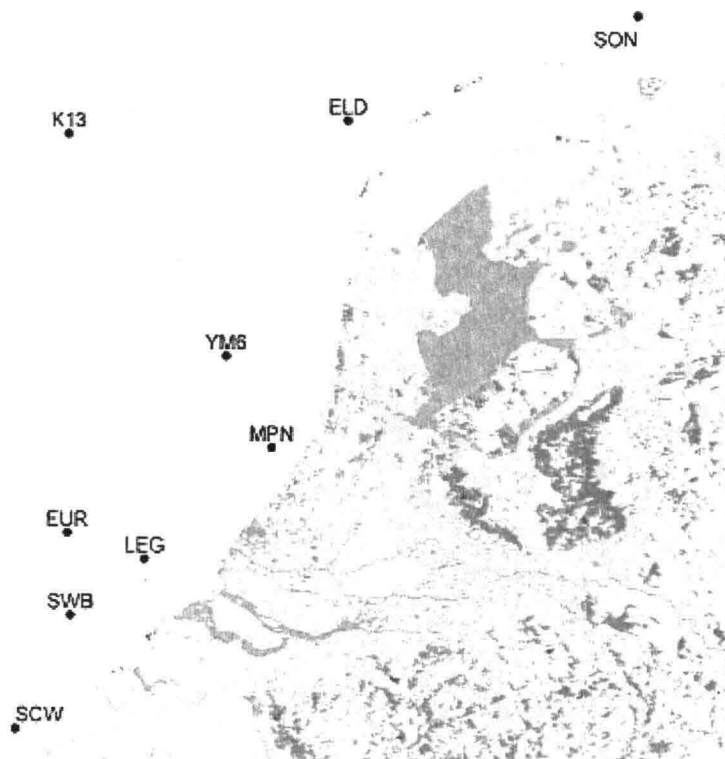
4.4 Meetstations voor golven op diep water

Figuur 4.2 en Tabel 4.1 geven een overzicht van de 9 golfmeetstations op relatief¹⁰ diep water langs de Nederlandse kust. Naast deze stations zijn er ook nog de stations “AUK” en Deurloo (RIKZ, 2004b) maar deze worden in het kader van HR2006 niet gebruikt. Soms wordt bij één meetstation met meerdere sensoren gemeten. Deze worden dan hoofdsensor en nevensensor genoemd. De hoofdsensor is altijd een golfrichtingsboei (wavec of directional waverider) en de nevensensor een waverider, stappenbaak of radar. Een uitzondering hierop vormt het meest zuidelijk meetstation Scheur West, waar een waveriderboei op enige afstand (ca. 15 km) als nevensensor functioneert.

Tabel 4.1 Overzicht van golfmeetstations

Station	code	bodemdiepte (m)
Schiermonnikoog Noord	SON	19
Eierlandse Gat	ELD	26
Platform K13A	K13	30
IJmuiden-06 (mun stortpl)	YM6	21
Meetpost Noordwijk	MPN	18
Euro platform	EUR	32
Lichteiland Goeree	LEG	21
Schouwenbank	SWB	20
Scheur West	SCW	15

¹⁰ Deze stations liggen in de buurt van de NAP –20 m lijn en daarom wordt hier wel gesproken over de –20m diepwaterlijn.



Figuur 4.2 Golfmeetstations langs de Nederlandse kust.

Als begin van de meetperiode is voor elk station het jaar 1979 aangehouden. Bij sommige meetstations zijn weliswaar oudere golfmetingen bekend, maar deze zijn te fragmentarisch om te gebruiken. De gehanteerde meetreeksen in het kader van HR2001 lopen voor alle stations tot en met 2002.

4.5 Golfmetingen en golfparameters

4.5.1. Spectrum en golfkarakteristieken

Er zijn twee manieren om een golfveld op zee te karakteriseren. Bij de eerste methode (*tijddomein*) wordt van elke golf in het golfveld de hoogte en de periode bepaald. Golfparameters in het tijdsdomein geven statistische eigenschappen weer van de verdeling van golfhoogten en golfperiodes. Bij de tweede methode (*frequentiedomein*) wordt het golfveld verondersteld te bestaan uit een groot aantal sinusvormige golven met verschillende energie (hoogte) en van verschillende frequentie (periode). De verdeling van de energie over de frequenties wordt vastgelegd in het (energiedichtheid-)spectrum. Golfparameters in het frequentiedomein karakteriseren eigenschappen van het spectrum.

Uit het *tijddomein* worden alleen de golfhoogte $H_{1/3}$ en de golfperiode $TH_{1/3}$ uit de metingen herleid. Dit betekent dat eerst de 33% hoogst gemeten waarden geselecteerd worden (over een tijdsduur van 20 minuten) waaruit vervolgens het gemiddelde bepaald wordt. Uit het *frequentiedomein* worden meerdere parameters afgeleid en opgeslagen. In het frequentiedomein wordt het signaal van de golfhoogte in de tijd via een wiskundige transformatie (Fourier transformatie) omgezet in een energiespectrum. Het energiespectrum laat zien hoe de golfenergie (formeel energiedichtheid) verdeeld is over het alle frequenties, ofwel het frequentiedomein.

Het spectrum geeft een goede beschrijving van het golfveld, maar het is een zeer complexe beschrijving. Daarom zijn karakteristieke parameters ontwikkeld die het spectrum en daarmee het golfveld karakteriseren. Deze parameters zijn vrijwel altijd gebaseerd op de *momenten* van het spectrum. Deze momenten zijn gedefinieerd als:

$$m_n = \int s(f) f^n df \quad (3.1)$$

waarin:

m_n = het n^e moment van het spectrum
 f = frequentie
 $s(f)$ = de energiedichtheid als functie van de frequentie

De bovenstaande integraal wordt in principe uitgevoerd over het gehele frequentiedomein. Echter, voor een aantal parameters wordt slechts een gedeelte van het frequentiedomein geanalyseerd. Tabel 4.2 en Tabel 4.3 tonen de belangrijkste golfhoogte en –periode parameters uit het frequentiedomein die worden afgeleid uit de meetgegevens en worden opgeslagen (definities gebaseerd op Young, 1999).

We merken op dat overal waar in dit rapport gesproken wordt over de spectrale piekperiode, T_p , in feite sprake is van een andere schatter: T_{pm} . De laatste krijgt de voorkeur omdat deze een nauwkeuriger schatting geeft van de spectrale piekperiode. Ook de piekperiode voor de hydraulische randvoorwaarde gegeven in bijlage G is gelijk aan T_{pm} .

Tabel 4.2 Golfhoogte-parameters en integratiegrenzen

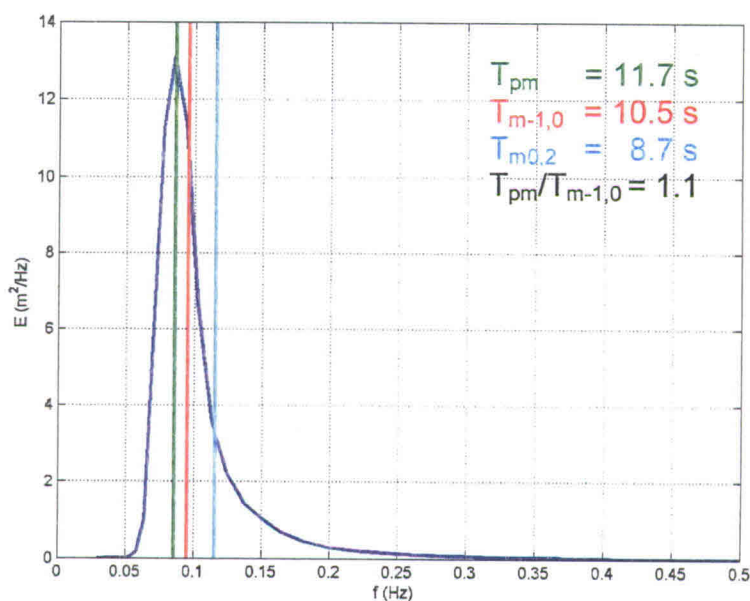
Term	Formule
Hm_0	$4\sqrt{m_0}$; integraal over het hele frequentiedomein; equivalent met $H_{1/3}$ in het tijddomein
Hte_3	$4\sqrt{m_3}$; integraal over het laagfrequente deel: 0,03 - 0,10 Hz. Deze geeft een indicatie over de aanwezigheid van deining.
Hte_2	$4\sqrt{m_2}$; integraal over het middenfrequente deel: 0,10 - 0,20 Hz
Hte_1	$4\sqrt{m_1}$; integraal over het hoogfrequente deel: 0,20 - 0,50 Hz
Hte_0	$4\sqrt{m_0}$; integraal over het zeer hoogfrequente deel: 0,50 - 1,00 Hz

Tabel 4.3 *Golfperiode-parameters*

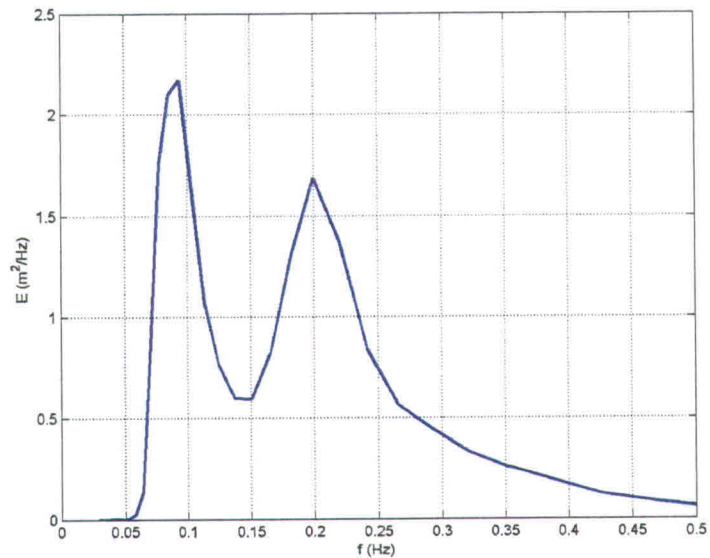
Term	formule
$T_{m-1,0}$	m_{-1}/m_0
T_{m01}	m_0/m_1
T_{m02}	$\sqrt{(m_0/m_2)}$
T_p	de golfperiode met de hoogste energiedichtheid in het spectrum
T_{pb}	Verbeterde schatter voor T_p . Hierbij wordt in het frequentiedomein rondom de piek van de periode het gemiddelde genomen (zie RIKZ, 1996).
T_{bpeq}	Equivalente vorm van T_{pb} geschikt voor meertoppige spectra.
T_{pm}	Maximum van T_{pb} en T_{bpeq}

In Figuur 4.3 zijn de 3 belangrijkste golfperiodematen weergegeven voor een enkeltoppig spectrum. Voor een dergelijk spectrum geldt bij benadering een verhouding van 1.1 tussen T_{pm} en $T_{m-1,0}$. Voor meertoppige spectra zoals deze vaak in de monding van estuaria worden gevonden gelden vaak grotere verhoudingsgetallen.

In Figuur 4.4 is een meertoppig spectrum gegeven wat met het golfmodel SWAN bepaald is voor een nearshore locatie aan de noordzijde van de Haringvlietmonding (Rak van Scheelhoek). Voor dit soort spectra worden vaak sterk afwijkende verhoudingen gevonden tussen T_{pm} en $T_{m-1,0}$.

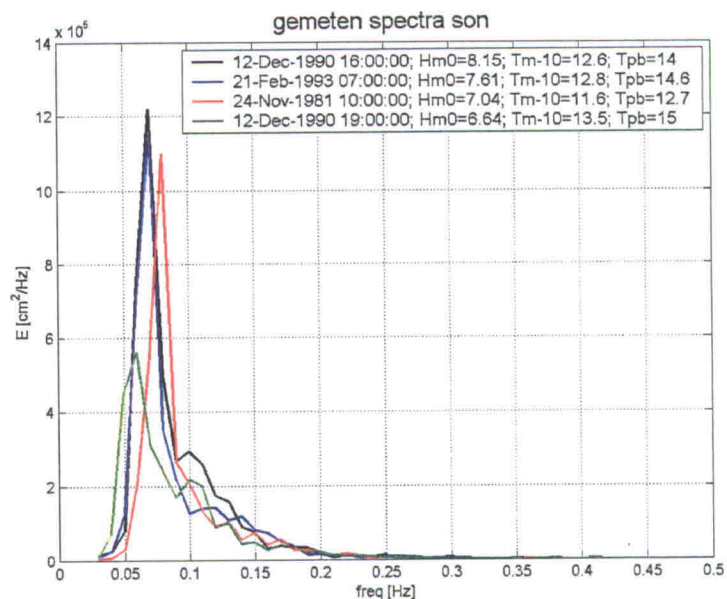


Figuur 4.3 Weergave van de periodematen T_{pm} , $T_{m-1,0}$ en T_{m02} (s), voor een enkeltoppig spectrum berekend met het golfmodel SWAN voor een locatie nabij Flauwe werk ($RD(x,y) = (52698;427567)$). De windsnelheid was 25 m/s, windrichting 330° , $H_{m0} = 2.95$ m en waterstand NAP+5m.



Figuur 4.4 Meertoppig spectrum berekend met het golfmodel SWAN voor een nearshore locatie in de Haringvlietmonding ($RD(x,y) = (63500; 428974)$) waarvoor een afwijkende verhouding is gevonden tussen T_{pm} en $T_{m-1,0}$. Hier geldt een verhouding $T_{pm} / T_{m-1,0} = 1.9$. De windsnelheid was 25 m/s, windrichting 330°, $H_{m0} = 2.16$ m, waterstand NAP+5m.

In Figuur 4.5 is een voorbeelden opgenomen van golfmetingen onder stormomstandigheden bij Schiermonnikoog (SON). In bijlage F staan nog figuren voor K13, Eierlandse gat en Europlatform. Het betreft hier ruwe meetgegevens zonder enige vorm van selectie of filtering. Deze spectra vertonen geen pieken van deining bij de lagere frequenties en zijn dus te interpreteren als enkeltoppige spectra. Vergelijking van deze spectra laat zien dat de langste golfperiodes hier voorkomen bij SON.



Figuur 4.5 Gemeten golfspectra onder stormomstandigheden bij SON.

4.5.2. Nauwkeurigheid van de metingen

De nauwkeurigheid van de golfparameters wordt maar voor een klein deel bepaald door de meetnauwkeurigheid van de boeien en baken. Bepalend voor de nauwkeurigheid van de golfparameters is hoofdzakelijk de nauwkeurigheid waarmee het bemeten deel van het zeeoppervlak maatgevend is voor de gehele toestand van de zee op die locatie. De meting van (in de regel) 20 minuten is te beschouwen als een steekproef uit het totale zeeoppervlak. Met behulp van een aantal statistische regels wordt de nauwkeurigheid geschat van de uit die steekproef berekende parameters (RIKZ, 2004b). Voor parameters in het tijddomein hangt de nauwkeurigheid af van het aantal golven in de steekproef. Bij parameters in het frequentiedomein hangt de nauwkeurigheid af van de ligging en vorm van het spectrum. Naast de meetnauwkeurigheid is dan ook gevoeligheid van de parameter voor variaties in het spectrum van belang (RIKZ, 2002b). Alhoewel parameters die in het tijddomein zijn afgeleid in het algemeen iets nauwkeuriger zijn wordt in deze studie gebruik gemaakt van parameters berekend in het frequentiedomein.

Er bestaan enkele eenvoudige vuistregels voor de nauwkeurigheid van golfparameters, uitgedrukt in een relatieve standaard afwijking (RIKZ, 2004b):

- H_{m0} en $H_{1/3}$: 5,0%
- H_{te3} : 7,5%
- $T_{m0,2}$ en $T_{h1/3}$: 2,5%

Bij kleine golfhoogten is de relatieve standaardafwijking wat lager en bij grote golfhoogten wat groter. De standaardafwijking van de schatter van de gemiddelde golfrichting bedraagt 5° bij gemiddelde golfhoogten. Bij grote golfhoogten is deze afwijking doorgaans kleiner, maar bij kleinere golfhoogten juist groter. Bij erg kleine golfhoogten kan de geschatte golfrichting zeer onnauwkeurig zijn. Bovenstaande vuistregels zijn afgeleid uit verschillende onderzoeken waar de onnauwkeurigheid in veel meer detail is onderzocht (RIKZ, 1993d; Forristall et al., 1996; RIKZ, 2004a).

De meetgegevens van golven uit DONAR¹¹ zijn aan een grondige controle onderworpen (RIKZ, 2004b). Hierin zijn hiaten opgevuld met geschatte waarden om problemen met verdere bewerkingen te voorkomen. Deze kwaliteitscontrole gebeurt met het controle- en validatieprogramma WAVIX.

4.6 Samenstellen van golfstatistiek op diep water

4.6.1. Inleiding

¹¹ DONAR (Data opslag natte Rijkswaterstaat) is de centrale database van Rijkswaterstaat, waarin al haar fysische, chemische, biologische en morfologische gegevens worden opgeslagen.

De golfstatistiek op diep water is één van de bouwstenen van de procedure waarin de hydraulische randvoorwaarden langs de Nederlandse kust worden vastgesteld. Aangezien deze randvoorwaarden afgeleid worden met het oog op het toetsen van waterkeringen zijn met name de extreme golfcondities relevant. De statistiek wordt daarom afgeleid op basis van de zwaarste golfcondities per stormgebeurtenis. Deze paragraaf beschrijft de procedure waarmee de hoogste waarden van de golfhoogte en golfperiode uit de meetreeks worden geselecteerd. Dat is minder triviaal dan het wellicht op het eerste gezicht lijkt:

- Waarnemingen van extremen die kort na elkaar optreden zijn (wellicht) afhankelijk van elkaar. Deze moeten uit de reeks gefilterd worden om te voorkomen dat een stormgebeurtenis twee keer wordt meegenomen bij het afleiden van de statistieken (zie paragraaf 4.6.2).
- Gemeten maxima van de golfhoogte en golfperiode gedurende stormperiodes zijn geen zuivere schatters van de werkelijk opgetreden maxima van die golfhoogte (zie paragraaf 4.6.3). Er moet daarom een correctie toegepast worden op de gemeten waarden.
- Hoge waarden van de golfperiode die optreden in combinatie met lage waarden van de golfhoogte (zoals bij deining) zijn niet relevant voor de extremewaardenstatistiek van de lokaal opgewekte golf en moeten derhalve niet geselecteerd worden (paragraaf 4.6.4).

4.6.2. Selectiecriteria voor stormmaxima

De eerste stap bij de selectie van maxima is de definitie van een drempelwaarde. Alleen meetwaarden die boven deze drempel liggen kunnen gekwalificeerd worden als stormmaxima. Een tweede selectie criterium is de periode waarin de meting is uitgevoerd. Extreme stormgebeurtenissen komen alleen voor in de winterperiode, dus de selectie beperkt zich tot maxima die zijn opgetreden in de periode van 1 oktober t/m 31 maart.

Bij de veiligheidsbeschouwingen van de primaire waterkeringen wordt er van uitgegaan dat een constructie slechts één keer per storm kan falen. Daarom is telkens exact één maximum per stormgebeurtenis geselecteerd. Indien waargenomen maxima kort achter elkaar optreden maken ze mogelijk onderdeel uit van dezelfde gebeurtenis. Om te voorkomen dat, ten onrechte, beide maxima in de statistieken worden meegenomen is een selectie criterium opgesteld om vast te stellen of twee achtereenvolgende maxima tot dezelfde stormgebeurtenis horen. Het gehanteerde criterium stelt dat twee maxima onafhankelijk zijn, d.w.z. niet tot dezelfde gebeurtenis behoren, als voldaan wordt aan de volgende twee eisen:

1. De tijdsduur tussen de twee opeenvolgende maxima (de zogenaamde *zichtduur*) moet voldoende groot zijn.

2. De laagste waarde die tussen de twee maxima is waargenomen moet voldoende klein zijn. Met andere woorden: de golfparameters moeten gedaald zijn tot een niveau dat niet meer als stormcondities gekenmerkt kan worden. Hiertoe wordt een drempelwaarde gedefinieerd die de *maximumfactor* genoemd wordt, omdat de waarde van de drempel gerelateerd wordt aan de waarde van het voorliggende maximum. Voor de golfhoogte is dit 70% van de waarde van het vorige maximum, voor de golfperiode is dat 80%. De drempelwaarde is dus variabel over de periode van meten.

Resumerend zijn de vier criteria op basis waarvan de maxima geselecteerd worden (WL, 2004b) gegeven in onderstaande Tabel.

Tabel 4.4 Criteria voor de selectie van maxima.

criterium	keuze
drempelwaarde	verschilt per locatie en per golfparameter
periode	winter: 1 oktober t/m 31 maart
zichtduur	48 uur
maximumfactor	golfhoogte: 0.7*maximum golfperiode: 0.8*maximum

Voor elk maximum wordt niet alleen de waarde zelf geselecteerd maar ook de waarnemingen in de uren ervoor en erna, de zogenaamde *omgeving* van het maximum. Dit is noodzakelijk om in het vervolg een betere schatting te maken van de werkelijke waarde van het geselecteerde stormmaximum (zie volgende paragraaf).

4.6.3. Verbeterde schattingen met behulp van filters

Probleemstelling

Gemeten maxima van de golfhoogte en golfperiode gedurende stormperiodes zijn geen zuivere schatters van de werkelijk opgetreden maxima van die golfhoogte. De hoogste waarde uit een meetreeks is daardoor in de regel een overschatting (zie Foristrall, 1996). De grootte van de overschatting hangt af van met name de volgende twee factoren:

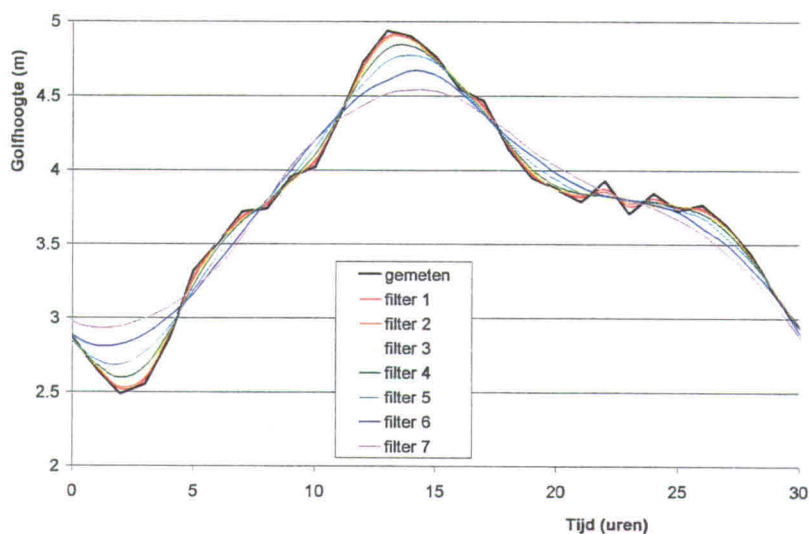
1. Het aantal meetwaarden in de directe omgeving van het maximum boven een gegeven drempelwaarde, dat bijvoorbeeld gelijk is aan 90% van het gemeten maximum. Dit aantal is ook wel te interpreteren als de *duur* van het maximum. In het algemeen geldt dat hoe langer de duur is hoe groter de overschatting;
2. De schattingsnauwkeurigheid die elke meetwaarde intrinsiek in zich heeft.

Het is dus van belang om de metingen te corrigeren voor het feit dat deze in de regel een overschatting vormen en dit gebeurt met behulp van *filters*.

Filterprocedure

Het principe van de filter is gebaseerd op het feit dat de meting wordt beïnvloed door toevallige fouten die zowel hogere als lagere metingen van golfhoogte of golfperiode kunnen geven. Daarbij gaat het er om de juiste verwachtingswaarde van de golfparameter te bepalen. *Door het voorkomen van toevallige fouten is bij een relatief lange stormduur het zeer waarschijnlijk dat de hoogste waarde uit de tijdreeks een overschatting is, terwijl dit bij de kortst mogelijke reeks van 1 meting niet te zeggen is.* Bij een relatief lange stormduur is aldus veel waarschijnlijker dat de hoogste waarde uit de tijdreeks een overschatting is dan bij kortere reeksen en het filter corrigeert hiervoor. Filtering is ook op de golfperiode toegepast, en heeft ook daar invloed. Het RIKZ onderzoek (RIKZ, 2004a) heeft geresulteerd in een selectieprocedure voor het te gebruiken filter afhankelijk van de belangrijkste karakteristieken van de storm. Op basis van analyses van gesimuleerde (synthetische) stormgebeurtenissen is een relatie gelegd tussen de belangrijkste karakteristieken van de storm en de benodigde correctie van het maximum (RIKZ, 2004a). Vervolgens is voor een groot aantal filtertechnieken getoetst in hoeverre deze het “werkelijke verloop” kunnen reconstrueren uit het “gemeten verloop”. In de procedure worden voor elk maximum en hun omgeving 7 filters berekend. Deze filters zijn een soort van lopend gemiddelde, ook wel “moving average” genoemd. De mate waarmee het oorspronkelijke tijdsverloop gereproduceerd kan worden hangt sterk af van het type storm en het gekozen filter. Daarbij speelt vooral de duur van de storm een belangrijke rol. De filters lopen op van “licht” (voor kortdurende stormen) naar “zwaar” (voor langdurige stormen) wat betekent dat bij filter 1 en 2 de gefilterde waarde weinig verschilt van de gemeten waarde, terwijl dat verschil bij filter 6 en 7 veel groter kan zijn. Zware

filters leiden tot een gladder tijdsverloop, terwijl de lichte filters het bestaande tijdsverloop grotendeels intact houden. Figuur 4.6 illustreert dit principe voor de storm van februari 1990.

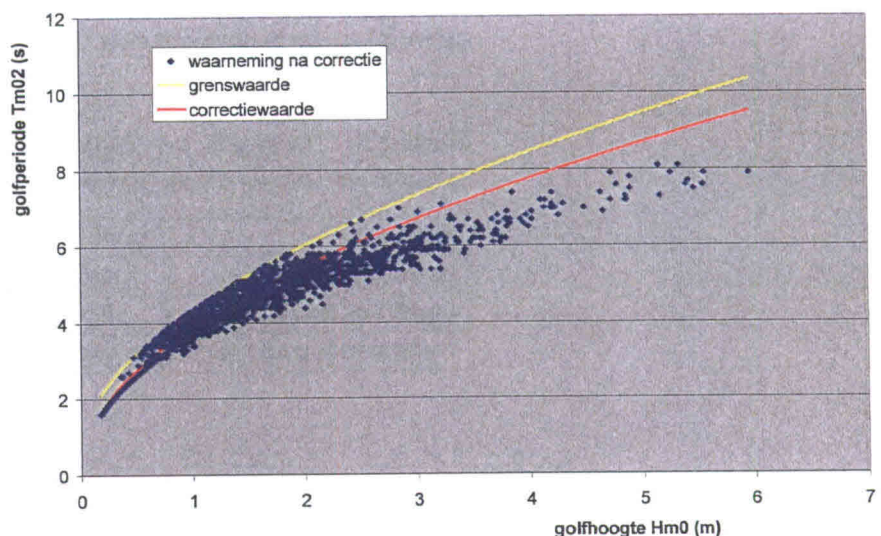


Figuur 4.6 Gemeten vs. gefilterde uurwaarden. Parameter H_{m0} voor locatie EUR (Europlatform) februari 1990.

Voor de meeste stormen geldt dat een intermediair filter (3 t/m 5) de beste keuze is. De gemiddelde reductie van deze aanpak in deze studie is 5% voor golfhoogte H_{m0} en 2% voor golfperiode $T_{m-1,0}$.

4.6.4. Identificeren van hoge golfperioden bij deining

In omstandigheden van relatief beperkte golfhoogten en lage windsnelheden kan het gebeuren dat de gemiddelde golfperiode zeer hoog is. Het golfveld bestaat dan meestal geheel of gedeeltelijk uit deining als gevolg van andere omstandigheden dan een storm. Aangezien dit soort omstandigheden geen rol spelen bij kritieke belastingen op harde waterkeringen en duinen moeten deze (hoge) waarden van de golfperiode niet opgenomen worden in de selectie van maxima. Het is derhalve zaak om de waarnemingen te identificeren met een relatief hoge waarde van de golfperiode ten opzichte van de op hetzelfde moment waargenomen golfhoogte. Daartoe is in (RIKZ, 1995b, 1996) een drempelwaarde gedefinieerd, waarboven de golfperiode wordt beschouwd als zijnde het gevolg van deining. Deze drempelwaarde is afhankelijk van de golfhoogte. Ter illustratie toont Figuur 4.7 de grens voor periodemaat T_{m02} bij locatie SON (gele lijn). Deze grenslijn is voor elke meetlocatie en elke golfparameter verschillend. De procedure gebruikt in deze studie is voor een aantal periodematen gegeven in (WL, 2004b). Voor alle punten boven de gele lijn is een reductie toegepast opdat deze waarden niet worden geselecteerd als maximum. De reductie is aangegeven met de rode lijn in Figuur 4.7. Door deze verschuiving worden de hoge golfperioden die het gevolg zijn van deining niet opgenomen in de bestanden met stormmaxima. De punten mogen niet worden weggegooid omdat anders hiaten in de meetreeksen zouden kunnen ontstaan. Dit laatste is bv. van belang voor de filterprocedure die bij eliminatie van deze punten niet zou werken. De kans dat deining na verschuiving toch nog als stormmaximum wordt meegenomen (bv bij een storm met lage H_{0m}) is nihil.



Figuur 4.7 Gemeten waarden van T_{m02} en H_{m0} met aanpassingen voor deining.

4.7 Metingen voor gecombineerde statistiek

4.7.1. Inleiding

Simultane waarnemingen van wind, waterstand en golven zijn van belang om de mate van afhankelijkheid tussen deze grootheden te kunnen bepalen. Hoe groter de samenhang des te groter de kans op combinaties van extremen en dus hoe groter de kans op falen van een kering. Ten behoeve van het rekenprogramma HYDRA-K waarmee de hydraulische belasting uit de statistiek wordt bepaald zijn de waarnemingen opgeslagen in zogenaamde “MV-bestanden”, waarbij “MV” een afkorting is voor multivariabel.

In de regel zijn de reeksen van een dergelijk bestand afkomstig uit verschillende stations. De golfmetingen zijn afkomstig van de diepwaterstations omdat aan de kust de variatie van golfkarakteristieken door invloed van locale bodemeffecten te groot is. Van waterstand en wind daarentegen zijn de beste gegevens over het algemeen juist van kuststations beschikbaar. Per bestand worden de metingen uiteraard zoveel mogelijk aan nabijgelegen stations ontleend.

4.7.2. Procedure voor aanmaken van MV-bestanden

De procedure voor het aanmaken van MV-bestanden is een aaneenschakeling van een aantal stappen die nauwkeurig beschreven in bijlage E van (WL, 2004b). Een belangrijk element uit de procedure is de selectie van stormen per station waarvoor een samengesteld bestand is afgeleid. Daartoe wordt een drempelwaarde gehanteerd van een overschrijdingskans van 5% voor een van de parameters golfhoogte, windsnelheid en opzet (zie Tabel 4.5). Bij EUR zijn voor de periode 1979-2002 bijvoorbeeld 1176 van de oorspronkelijke 1461 stormen geselecteerd¹². Voor de MV-bestanden zijn meer stormen beschikbaar maar de correlatiestructuren in de data worden voldoende weergegeven door de hoogste 50 maxima. Alleen deze hoogste 50 maxima worden gebruikt in de faalkansberekeningen.

Tabel 3.5 Drempels per locatie en per parameter voor de tweede selectie van stormen voor een overschrijdingskans van 5%.

variabele	SON	ELD	K13	YM6	EUR
golfhoogte (m)	2.665	3.115	3.255	2.975	2.865
windsnelheid (m/s)	13.2	12.2	14.3	13.0	14.3
waterstandopzet (m)	0.525	0.485	0.385	0.485	0.395

¹² Het is hier van belang onderscheid te maken met de stormen die zijn geselecteerd ten behoeve van de marginale statistiek. Daartoe worden per locatie veel minder stormen geselecteerd, nl. zo'n 200 voor de halfjaarlijkse winterperiode wat neerkomt op ongeveer 1 storm per 20 dagen.

5. Van meetgegevens naar extremewaardenstatistiek

5.1 Inleiding

Een belangrijk aspect van de bepaling van de hydraulische belastingen op de waterkeringen zijn de metingen van de waterstanden en golfcondities op diep water en de daaruit afgeleide statistiek. Dit hoofdstuk beschrijft hoe deze statistiek is vastgesteld. Het grootste deel van dit hoofdstuk betreft de zogenaamde “marginale statistiek”. Dat is de individuele statistiek per variabele (stochast) windsnelheid, waterstand, golfhoogte en golfperiode. De marginale statistiek beschrijft de relatie tussen overschrijdingsfrequenties enerzijds en de bijbehorende waarden van de betreffende variabele anderzijds. Een voorbeeld van de informatie die wordt vastgelegd met deze marginale statistiek is:

“Een waterstand van NAP+3.0 m bij Hoek van Holland wordt gemiddeld eens per 10 jaar overschreden”

De paragrafen 5.4, 5.5 en 5.6 beschrijven de statistiek van respectievelijk de wind, de waterstand en golven. Daaraan voorafgaand staat een toelichting over de invloed van de windrichting op deze variabelen (paragraaf 5.2) en de gebruikte verdelingsfunctie voor het afleiden van de statistiek (paragraaf 5.3). De marginale statistiek voor extremen stormen kan nl. alleen via extrapolatie uit de voor stormen relevante metingen worden afgeleid.

5.2 Omni-directionele en windrichtingsafhankelijke statistiek

De windrichting is sterk van invloed op de optredende windsnelheid, waterstand en golven. Langs de Nederlandse kust zijn met name de westelijk en noordwestelijk georiënteerde windrichtingen relevant met het oog op extreme belastingen van waterkeringen. De statistieken van wind, waterstand en golven worden daarom afgeleid als functie van de windrichting en ook als zodanig toegepast bij het berekenen van de randvoorwaarden. De windrichting is opgedeeld in 12 sectoren van elk 30 graden. Voor elke sector zijn apart statistieken afgeleid. De statistiek is gebaseerd op maxima van stormen waarvan de dominante windrichting toebehoort aan de bewuste sector. De statistiek wordt gekwantificeerd als een *gecombineerde* kans of frequentie. Bijvoorbeeld:

“De combinatie van een windrichting uit sector 9 (255° – 285°) en een windsnelheid van 27 m/s of hoger komt bij locatie Vlissingen gemiddeld eens per 100 jaar voor”

Ondanks het feit dat de afhankelijkheid met de windrichting hiermee wordt gekwantificeerd, wordt in dit geval nog steeds gesproken over *marginale* statistiek.

Behalve de windrichtingsafhankelijke statistiek is voor alle variabelen ook de omni-directionele statistiek afgeleid. Het getallenvoorbeeld in paragraaf 5.1 voor Hoek van Holland is een typisch voorbeeld van omni-directionele statistiek. Het is de statistiek die voor alle richtingen tezamen wordt afgeleid. De omni-directionele statistiek heeft een directe relatie met de windrichtingsafhankelijke statistiek. Voor een gegeven waterstand of windsnelheid is de omni-directionele overschrijdingsfrequentie gelijk aan de optelsom van de frequenties per windrichtingssector.

De omni-directionele statistiek is van belang omdat ze als de meest betrouwbare van beiden gezien wordt vanwege het grotere aantal gegevens dat beschikbaar is. Daarom geldt ze als uitgangspunt van de windrichtingsafhankelijke statistiek. Dat betekent dat ten behoeve van de consistentie de windrichtingsafhankelijke statistiek zó wordt gecorrigeerd dat omni-directionele overschrijdingsfrequentie gelijk is aan de optelsom van de frequenties per windrichtingssector.

5.3 Verdelingsfunctie voor wind, golven en waterstanden

Op basis van de metingen wordt per windrichtingssector een verdelingsfunctie gefit op de metingen. De reden hiervoor is dat op basis van een dergelijke functie overschrijdingsfrequenties bepaald kunnen worden voor alle mogelijke waarden van de windwaterstand en golfparameters; óók voor waarden die extremer zijn dan gemeten waarden.

Voor de wiskundige beschrijving van overschrijdingsfrequenties van de verscheidene maten voor golfhoogte en golfperiode is gekozen voor een conditionele Weibull verdeling (RIKZ, 1995b). Deze verdelingsfunctie is hier voor elke windrichtingssector gegeven in de vorm van een overschrijdingsfrequentie¹³ en wordt als volgt geformuleerd:

$$F(X > x) = \rho \exp \left\{ - \left(\frac{x}{\sigma} \right)^\alpha + \left[\frac{\omega}{\sigma} \right]^\alpha \right\} ; x \geq \omega \quad (5.1)$$

waarin:

F = overschrijdingsfrequentie;

X = de variabele waarvoor de verdelingsfunctie is afgeleid (de stochast);

x = mogelijke realisatie van stochast X ;

α = vorm- of krommingparameter;

σ = schaalparameter;

ω = drempelwaarde, waarboven de statistieken zijn afgeleid; en

ρ = overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde ω : ($F(x=\omega)$).

¹³ De originele Weibullverdeling is geformuleerd als een kansverdeling

Omgekeerd kan ook voor een gegeven overschrijdingsfrequentie de bijbehorende waarde van de variabele worden bepaald door inversie van vgl. (4.1):

$$x = \sigma \left\{ \left(\frac{\omega}{\sigma} \right)^\alpha - \ln \left[\frac{F}{\rho} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}} = \left\{ \omega^\alpha - \sigma^\alpha \ln \left[\frac{F}{\rho} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}} ; x \geq \omega \quad (5.2)$$

De uitkomsten van deze functie worden bepaald door de vier parameters α , σ , ω en ρ . Deze parameters verschillen per meetlocatie (Figuur 4.2), per variabele en per windrichtingssector. Ze zijn gefit op de in paragraaf 4.6 geselecteerde maxima van stormgebeurtenissen. Dat betekent dat dié combinatie van parameters gekozen is die optimaal het gedrag van de waargenomen maxima nabootsen.

Functie (5.1) heet de *conditionele* Weibull-verdeling omdat de verdeling wordt afgeleid op basis van waarnemingen boven een bepaalde drempelwaarde, ω , en ook alleen geldig is boven diezelfde drempelwaarde. De keuze voor deze verdelingsfunctie komt voort uit een onderzoek naar *golf*parameters in (RIKZ, 1995b). De Weibull-verdeling kwam daarin als beste naar voren vanwege de over het algemeen goede fit met de data en vanwege het feit dat deze verdeling vrij robuust is, d.w.z. niet gevoelig is voor één afwijkende meting. Ook in (Battjes, 1970) komt de Weibull-verdeling als beste fit naar voren voor golfdata van meetstations in de Noordzee, Ierse zee en de Atlantische oceaan.

5.4 Windstatistiek

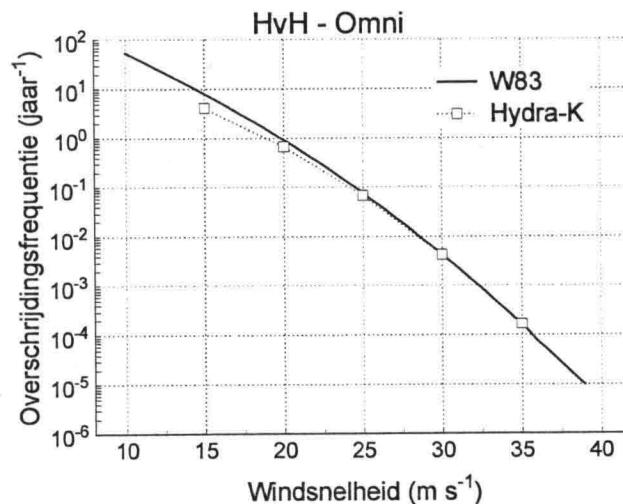
Voor de statistiek van de wind wordt gebruik gemaakt van de resultaten van een onderzoek van het KNMI uit 1983, het zogenaamde "Windklimaat van Nederland", (KNMI, 1983). Deze is een algemeen aanvaarde standaard voor de windstatistiek. In dat onderzoek wordt de statistiek beschreven met een zogenaamd "Rijkoort-Weibull-model" dat gebaseerd is op een Weibullverdeling met 2 parameters. Deze Weibullverdeling is een andere dan de conditionele Weibullverdeling die voor de golven is gebruikt. Daarom is in het kader van HR2006, uit pragmatische overwegingen¹⁴, de conditionele Weibullverdeling gefit aan de uitkomsten volgens de het Rijkoort-Weibull model van (KNMI, 1983).

¹⁴ Hiermee doelen we op het zoveel mogelijk compact en overzichtelijk houden van de programmatuur van HYDRA-K

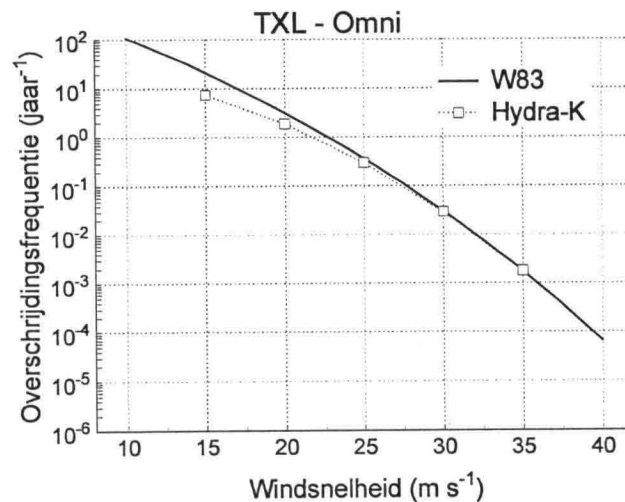
Het gevolg van het gebruik van een dergelijke fit is dat er (kleine) verschillen ontstaan tussen beide statistieken. Daarom heeft het KNMI de onderlinge verschillen gekwantificeerd en geanalyseerd (KNMI, 2005). De analyse spitste zich toe op de locaties West Terschelling, Texel, Hoek van Holland en Vlissingen. Dit zijn de vier locaties waarvan in het kader van HR2006 (in het rekenprogramma HYDRA-K) de windstatistiek wordt gebruikt. Zowel het Rijkcoort-Weibull-model als de Weibull-verdelingen die als invoer dienen van HYDRA-K zijn afgeleid per windrichtingssector. Echter, de onderlinge vergelijking door (KNMI, 2005) is alleen uitgevoerd op de omnidirectionele statistiek. De belangrijkste uitkomsten van deze vergelijking zijn:

1. Voor windsnelheden onder de 25 m/s onderschat de conditionele Weibullverdeling (in HYDRA-K) de overschrijdingsfrequenties ten opzichte van de statistiek van (KNMI 1983). Deze onderschatting kan voor sommige stations en windrichtingssectoren oplopen tot een factor 2 in de overschrijdingsfrequentie en 2 m/s in de windsnelheid. Over het algemeen geldt dat hoe lager de windsnelheid, hoe groter de verschillen.
2. Voor windsnelheden boven de 25 m/s stemmen de overschrijdingsfrequenties binnen 20% met elkaar overeen, waarbij de conditionele Weibullverdeling nog steeds iets lagere frequenties geeft.
3. Voor windsnelheden met overschrijdingsfrequenties in het bereik van 10^{-1} tot 10^{-2} per jaar zijn de onderlinge verschillen in de windsnelheid in de regel kleiner dan 0.2 m/s, hetgeen een afwijking van minder dan 1% impliceert.
4. Voor windsnelheden met overschrijdingsfrequenties in het bereik van 10^{-3} tot 10^{-4} per jaar zijn de onderlinge verschillen in de windsnelheid in de regel kleiner dan 0.1 m/s, hetgeen een afwijking van minder dan 0.5% impliceert.

Ter illustratie tonen Figuur 5.1 en Figuur 5.2 de windstatistiek voor locaties Hoek van Holland en Texel volgens HYDRA-K en (KNMI, 1983). Vanuit meteorologisch oogpunt zijn de verschillen bij hoge windsnelheden (lage overschrijdingsfrequenties) verwaarloosbaar te noemen.



Figuur 5.1 Windstatistiek voor Hoek van Holland volgens HYDRA-K en W83 (KNMI, 1983); Bron: (KNMI, 2005).



Figuur 5.2 Windstatistiek voor Texel volgens de conditionele Weibullverdeling (HYDRA-K) en de Rijkcoort-Weibull-verdeling W83 (KNMI, 1983) ; Bron: (KNMI, 2005).

De hier beschreven windstatistiek is gemeten boven land. In het rekenprogramma HYDRA-K (voor harde waterkeringen) wordt uitgegaan van zgn. potentiële wind die is gedefinieerd als wind op een hoogte van 10m boven land met een bepaalde ruwheid. Bij toepassing van de wind boven open water in de golfberekeningen wordt een transformatie naar open water toegepast. Voor de Westerschelde wordt in HYDRA-K een correctie toegepast op de windsnelheid vanwege het effect van ruwheid van de landpartijen. In het gebied ten oosten van Vlissingen wordt deze met 1 m/s gereduceerd vanwege landpartijen.

5.5 Waterstandstatistiek

5.5.1. Inleiding

Ook voor de waterstand gebruikt HYDRA-K windrichtingsafhankelijke statistiek, beschreven met de conditionele Weibullverdeling. Bij het afleiden van deze verdelingen is rekening gehouden met de zogenaamde “basispeilen” (RIKZ, 1995a). Dat zijn waterstanden met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar, afgeleid uit de omni-directionele statistiek van de waterstand. Ten behoeve van de consistentie is wederom de windrichtingsafhankelijke statistiek zó gecorrigeerd dat na omrekening naar omnidirectionele statistiek de basispeilen exact worden gereproduceerd. De windrichtingsafhankelijke statistiek is dus mede gebaseerd op de omnidirectionele statistiek. Paragraaf 5.5.4 beschrijft hoe deze correctie wordt toegepast. Paragraaf 5.5.2 beschrijft hoe de basispeilen zijn vastgesteld. De basispeilen gelden voor de situatie in het jaar 1985. Paragraaf 5.5.3 beschrijft hoe de basispeilen recent zijn gecorrigeerd voor de hoogwaterstijging na 1985.

5.5.2. Basispeilen 1985

Basispeilen in hoofdstations

De basispeilen zijn waterstanden met een overschrijdingsfrequentie van eens per 10.000 jaar. In 1993 zijn deze afgeleid voor de zogenaamde hoofdstations langs de Nederlandse kust: Vlissingen, Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen, en Delfzijl (RIKZ, 1993b). De basispeilen uit dat onderzoek gelden voor de situatie in het jaar 1985. In de eerste plaats zijn daarbij diverse statistische methoden vergeleken. Uitgaande van de 5 hoofdstations kwam de “vrije verdelingsmethode” als meest geschikte methode naar voren. Dit is een methode waarbij extreme kansen worden geschat zonder gebruik te maken van een kansverdelingsfunctie.

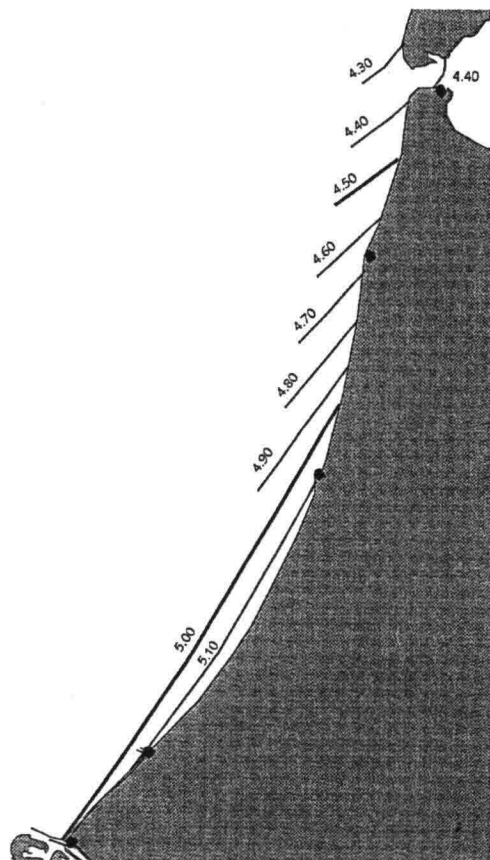
Op basis van de vrije verdelingsmethode zijn de basispeilen in eerste instantie afzonderlijk afgeleid voor de vijf hoofdstations (zie Tabel 5.1, tweede kolom). Vervolgens is gecontroleerd of de onderlinge samenhang tussen de vijf stations met deze peilen adequaat wordt weergegeven. Deze analyse is uitgevoerd op basis van de meetreeksen en op basis van fysisch modelonderzoek (RIKZ, 1993c). Op basis van de meetreeksen zijn voor alle stations de waterstanden met herhalingstijden van 1, 2 en 10 jaar onderling vergeleken. In het fysisch modelonderzoek zijn simulaties van “superstormen” uitgevoerd met het 2-dimensionele waterbewegingsmodel WAQUA. WAQUA modelleert fysische processen zoals de getijdebeweging, bodemwrijving, transporten, droogvallen en onderlopen van platen en de interacties tussen water, wind en luchtdruk. De gesimuleerde superstormen zijn opgeschaalde versies van waargenomen gebeurtenissen van februari 1953, november 1981, februari 1983 en februari 1989. Dat betekent dat de waarnemingen met een bepaalde factor zijn opgehoogd. De simulaties leverden extreme waterstanden in de diverse stations op die vervolgens weer onderling vergeleken zijn. Op basis van deze vergelijking zijn de basispeilen uit het statistische onderzoek (2^e kolom van Tabel 5.1) aangepast aan het modelonderzoek (3^e kolom) tot een gewogen eindresultaat opdat het ruimtelijke verloop van de peilen langs de kustlijn beter in overeenstemming is met de fysica (4^e kolom van Tabel 5.1). Hierbij is overigens als uitgangspunt genomen voor alle benaderingen dat het basispeil in Hoek van Holland gelijk is aan 5.00m. De basispeilen 1985 gegeven in de 4^e kolom van Tabel 4.1 zijn door de minister in juni 1993 vastgesteld.

Tabel 5.1 Basispeilen uit RIKZ (1993)

Station	Basispeil (cm+NAP)		
	statistisch onderzoek	Model onderzoek	Basispeil 1985
Vlissingen	540	552	545
Hoek van Holland	500	500	500
Den Helder	425	447	440
Harlingen	460	548	500
Delfzijl	600	634	615

Basispeilen langs de gehele kust

In 1995 zijn middels ruimtelijke interpolatie de basispeilen voor de hele Nederlandse kust afgeleid (RIKZ, 1995a). Uitgangspunt daarbij is dat in de 5 hoofdstations het reeds vastgestelde basispeil 1985 gegeven in Tabel 4.1 (4^e kolom) gehandhaafd blijft. Het statistisch onderzoek uit 1993 is daartoe opnieuw uitgevoerd voor een aantal additionele stations Terneuzen, Hansweert, IJmuiden en West Terschelling¹⁵. Daarbij was het noodzakelijk om over te stappen op een nieuwe statistische methode. De geschiktheid van de vrije verdelingsmethode was namelijk mede te danken aan het feit dat voor de 5 hoofdstations relatief lange meetreeksen beschikbaar zijn. De methode leent zich echter minder goed voor het bepalen van overschrijdingskansen voor de andere locaties omdat daarvoor relatief korte meetreeksen beschikbaar zijn. Daarom is besloten om over te stappen op het gebruik van de gegeneraliseerde Pareto-verdeling (GPV). Ook het fysische onderzoek is opnieuw uitgevoerd, d.w.z. er zijn additionele simulaties uitgevoerd van synthetische stormgebeurtenissen. De uitkomsten van de simulaties zijn gebruikt om door middel van (niet-lineaire) interpolatie de basispeilen te schatten voor locaties waar geen metingen beschikbaar zijn. Het resultaat bestaat uit een aantal ruimtelijke contourlijnen die punten van gelijke basispeilen verbinden. Figuur 5.3 geeft een voorbeeld van dergelijke contourlijnen.



Figuur 5.3 Basispeilen 1985 voor de Hollandse kust (RIKZ, 1995). Het basispeil bij Hoek van Holland = 5.00m en is het ijkpunt voor alle andere stations.

¹⁵ In het onderzoek van 1993 is West Terschelling ook meegenomen, ter "ondersteuning" voor het onderzoek van de 5 hoofdstations.

5.5.3. Afleiding toetspeilen

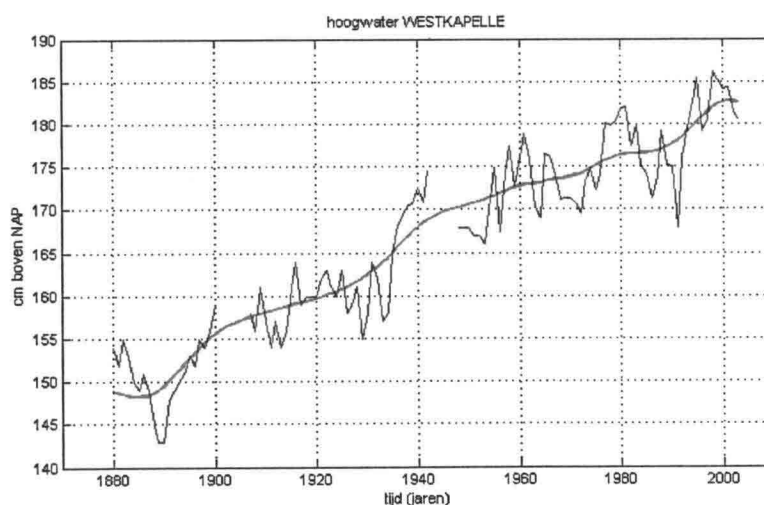
Inleiding

De basispeilen zoals beschreven in de vorige paragraaf gelden voor de situatie in het jaar 1985. Hieraan is de normfrequentie van 1 op 10.000 verbonden. Vanwege de stijging van het waterpeil als gevolg van effecten van klimaatverandering dienen de peilen doorlopend te worden geactualiseerd naar het jaar waarop de toetsing of het ontwerp van een waterkering betrekking heeft. Dit worden de toetspeilen genoemd. Het eerstvolgende randvoorwaardenboek is bestemd voor de 3^e toetsronde die is afgerond in 2011. Daarom zijn in het kader van HR2006 de basispeilen geactualiseerd naar het jaar 2011 (RIKZ, 2006d).

Bepalen van correcties op de waterstand

Om de correctie op de waterstand te bepalen is door (RIKZ, 2006d) een Singuliere Spectrum Analyse (SSA) toegepast op gemeten waterstanden. Dit type analyse is ontworpen om trends te detecteren in tijdseries met grillig verloop. Door toepassing van de SSA worden dergelijke series getransformeerd in series met een meer geleidelijk verloop. Figuur 5.4 geeft een voorbeeld van een dergelijke transformatie. De blauwe lijn verbindt de reeks van jaarmaxima van de waterstand bij Westkapelle. De reeks vertoont sterke variatie van jaar tot jaar, maar er is ook duidelijk een stijgende trend te herkennen. De rode lijn is de uitkomst van de SSA en geeft de trend weer. De jaarlijkse variatie is daarmee uit de meetreeks gefilterd.

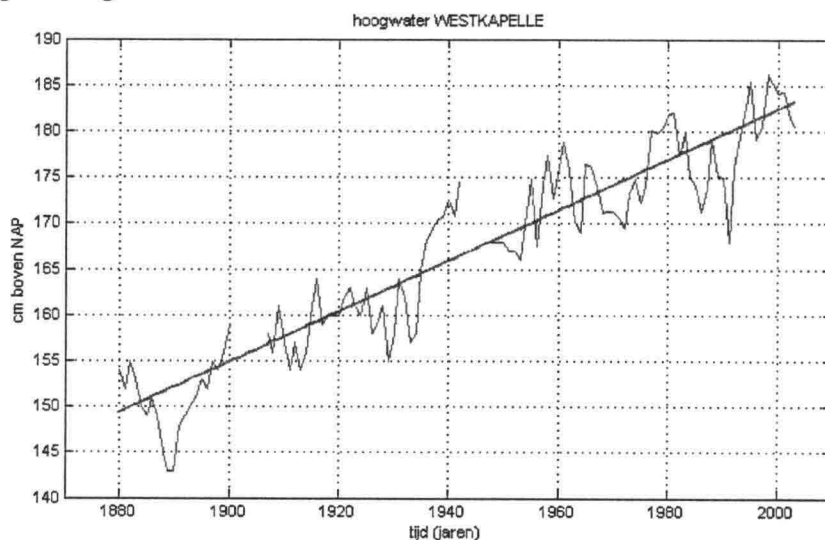
Om de toeslag op het basispeil voor het jaar 2011 te bepalen is voor de jaren 1985 en 2000 de hoogwaterstand bepaald uit de trendlijn van de SSA. Het verschil tussen beide waarden geeft een maat voor de gemiddelde stijging over deze tijdsperiode (1985 - 2000). Onder de aanname dat deze gemiddelde stijgsnelheid zich voortzet is de verwachte gemiddelde hoogwaterstand in 2011 bepaald op basis van lineaire extrapolatie van de stijging over de periode 1985 - 2000.



Figuur 5.4 SSA-trendlijn voor de reeks van jaarmaxima bij Westkapelle (Bron: RIKZ, 2006d)

Lineaire regressie

Voor in totaal 19 meetstations langs de Nederlandse kust is de gemiddelde hoogwaterstand in 2011 bepaald op basis van SSA (RIKZ, 2006d). In een aantal gevallen bleken de uitkomsten niet realistisch. Bijvoorbeeld voor een aantal naburige stations ontstonden relatief grote verschillen. Eén van de oorzaken is dat een relatief snelle verandering van het getij als gevolg van menselijke ingrepen door SSA-trendlijnen niet goed gevolgd kan worden (een duidelijk maar gedateerd voorbeeld van dit effect is te zien bij de stations in de westelijke Waddenzee in de periode rond het gereedkomen van de Afsluitdijk). De soms niet realistische resultaten gaven aanleiding alle tijdreeksen en SSA-resultaten nog eens per station nader te analyseren. Per station is bekeken of de resultaten volgens de SSA-analyse een goede schatting geven van de stijging van het gemiddelde hoogwater over de periode 1985 - 2000. Bij afwijkende waarden is geanalyseerd of er een verklaring te vinden is voor deze afwijking. Voor een aantal stations bleek het noodzakelijk om een nieuwe schatting te maken. Deze nieuwe schatting is gebaseerd op lineaire regressie. Die wordt berekend over een recente periode van voldoende lengte. Figuur 5.5 geeft een voorbeeld van een lineaire regressie voor de reeks van jaarmaxima bij Westkapelle. De groene lijn kan eenvoudig doorgetrokken worden tot het jaar 2011. We merken op dat de trendlijn in Figuur 5.5 gebaseerd is op de gehele periode van meten; in de studie van (RIKZ, 2006d) is doorgaans een kortere, meer representatieve periode gekozen.



Figuur 5.5 Lineaire regressielijn voor de reeks van jaarmaxima bij Westkapelle (bron: RIKZ, 2006d)

Correctie voor ruimtelijke verschillen

Op grond van de fysica mag verwacht worden dat er weinig variatie is in berekende toeslagen voor de klimaatverandering 1985/2011 voor nabijgelegen stations omdat het verloop langs de kust geleidelijk zou zijn. Als zich desondanks toch relatief grote verschillen voordoen is daar een aantal mogelijke oorzaken voor:

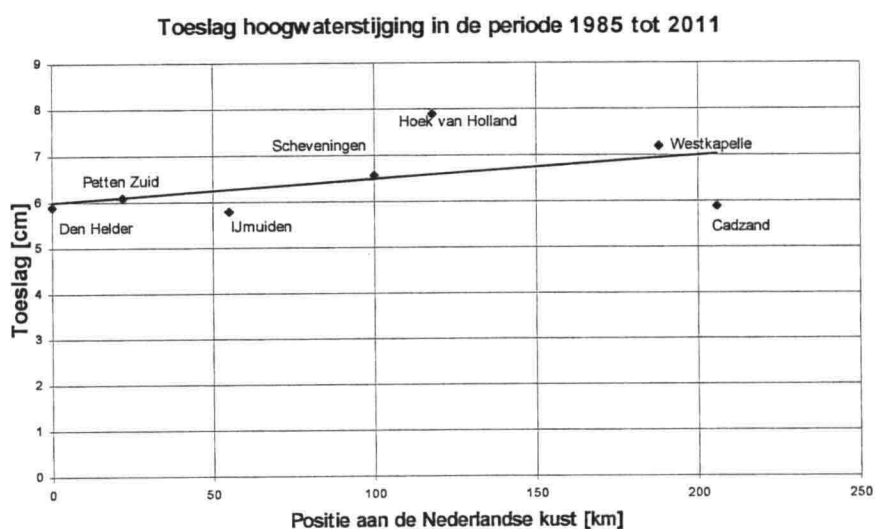
- locale effecten;

- meeton nauwkeurigheden; of
- onnauwkeurigheden in de (statistische) analyse en extrapolatie naar 2011.

Om de invloed van dergelijke effecten te reduceren zijn de toeslagen aangepast door middel van een ruimtelijke regressie langs de Nederlandse kust en Estuaria. Hiertoe zijn drie deelgebieden gedefinieerd:

1. de Hollandse en Zeeuwse Noordzeekust;
2. de Westerschelde; en
3. de Waddenzee.

Voor elk van de drie deelgebieden zijn de meetstations met bijbehorende toeslagen op volgorde van locatie gezet. Vervolgens is een ruimtelijke regressielijn afgeleid ter bepaling van het verloop van de toeslag langs de kustlijn. Figuur 5.6 illustreert deze procedure voor het deelgebied van de Hollandse en Zeeuwse Noordzeekust. Bij de horizontale as staat de afstand van elke locatie tot Den Helder aangegeven (in km), bij de verticale as staat de berekende toeslag (in cm). De doorgetrokken lijn is de regressielijn die het verloop van de toeslag langs de kustlijn representeert.



Figuur 5.6 Interpolatie voor de Hollandse en Zeeuwse Noordzee kust (bron: RIKZ, 2006d)

De definitieve toeslag van de diverse stations volgt uiteindelijk uit de regressielijn.

Tabel 5.2 bevat de toeslagen voor enkele stations.

Tabel 5.2 Berekende toeslag op het basispeil over de periode 1985-2011 voor een aantal stations langs de Nederlandse kust.

Locatie	Toeslag (cm)
Hansweert	10.1
Vlissingen	7.1
Hoek van Holland	6.6
IJmuiden	6.3
Den Helder	6.0
Den Oever	6.3
Terschelling	6.5
Harlingen	6.5
Lauwersoog	6.6
Delfzijl	6.3

Toets- en rekenpeilen

De laatste stap uit de studie van (RIKZ, 2006d) bestaat uit het vaststellen van de toets- en rekenpeilen langs de gehele kust, d.w.z. niet alleen in de 19 meetlocaties. Het toetspeil is de optelsom van het basispeil en de correctie en wordt gebruikt voor het toetsen van harde waterkeringen. Het rekenpeil is gelijk aan het toetspeil + 2/3 keer de decimeringshoogte en wordt gebruikt voor het toetsen van duinen.

Voor de tabellen met toets- en rekenpeilen 2011 zijn (onafgeronde) ontwerppeilen voor het jaar 1985 afgeleid uit figuren met isolijnen van (RIKZ, 1995a). Deze isolijnen zijn om de 10 cm weergegeven, zodat op tussenliggende locaties de waterstand op basis van interpolatie vastgesteld moest worden.

5.5.4. Windrichtingsafhankelijke waterstandstatistiek

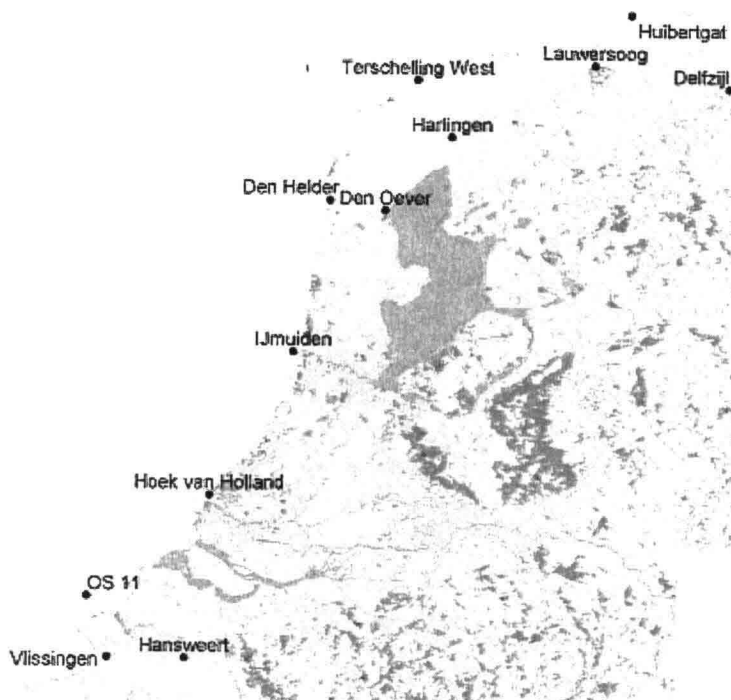
De statistiek van de waterstand is in eerste instantie per windrichting afzonderlijk afgeleid. Vervolgens is een lopend gemiddelde (filter) over de windrichtingen toegepast. Daarmee zijn niet-significante verschillen weggewerkt tussen de richtingen onderling die meer door toevalligheden bepaald zijn dan een echte fysische basis hebben. Tenslotte is de windrichtingsafhankelijke statistiek, zoals beschreven in paragraaf 5.5.1, afgestemd op de omnidirectionele statistiek en, daarmee samenhangend, de basispeilen. Samenvattend zijn de volgende drie stappen doorlopen:

1. Eerste selectie van parameterwaarden per windrichting;
2. Middeling over windrichtingen;
3. Vereffening met basispeil.

In het vervolg van deze paragraaf werken we de stappen in meer detail uit. De methode is ontwikkeld in de studie van (RIKZ, 2000).

Stap 1: Eerste selectie van parameterwaarden

De studie van (RIKZ, 2000) richtte zich op 11 meetstations: Vlissingen, Hansweert, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Terschelling West, Den Oever, Harlingen, Lauwersoog, Delfzijl en Huibertgat. Figuur 5.7 toont de 11 stations, aangevuld met station OS11. De windrichtingsafhankelijke statistiek is afgeleid op basis van een reeks van 16 jaar (1981 t/m 1996). Dit is de periode waarvoor destijds voor alle stations de benodigde metingen beschikbaar waren.

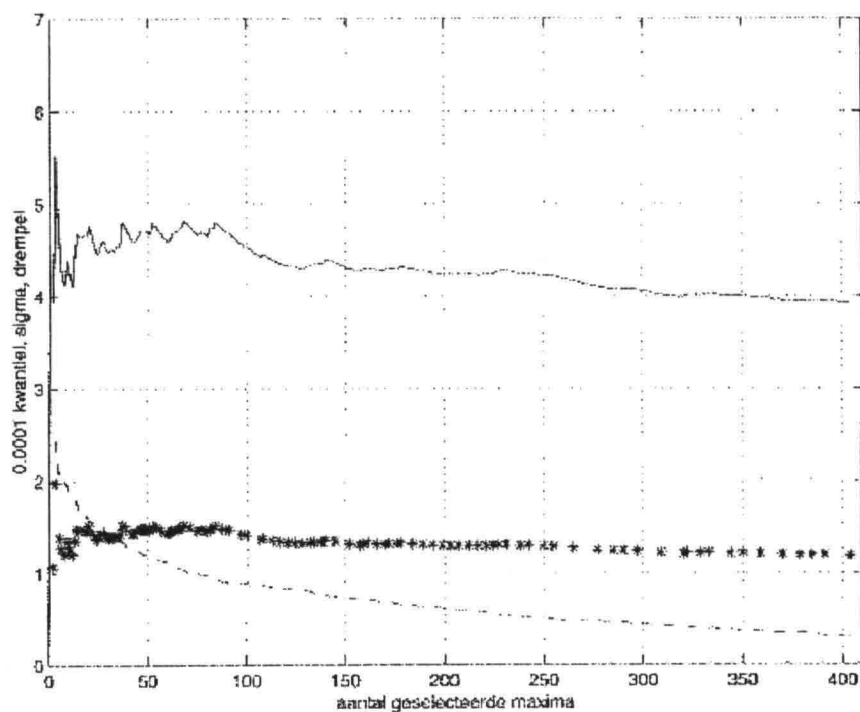


Figuur 5.7 Waterstandstations

Voor elk station en voor elke windrichtingssector van 30° is een conditionele Weibull-verdeling afgeleid op basis van de metingen. De conditionele Weibullverdeling bevat de vier parameters α , σ , ω , ρ (zie paragraaf 5.3) waarvan σ is gefit nadat voor α , ω en ρ waarden zijn gekozen.

De keuze van parameters ρ en ω is bepaald op basis van een visuele beoordeling van zogenaamde “drempelfiguren”, waarvan Figuur 5.8 een voorbeeld geeft. Deze figuren geven de belangrijkste uitkomsten van de fitprocedure als functie van het aantal stormmaxima dat voor de fitprocedure is geselecteerd. Het aantal stormmaxima houdt direct verband met de drempelwaarde, ω , vandaar de naam “drempelfiguur”. De parameter ρ volgt uit het aantal stormmaxima per jaar. De keuze voor het aantal maxima waarop de fit gebaseerd wordt legt automatisch parameters ρ en ω vast.

De drie lijnen in Figuur 5.8 tonen de drempelwaarde ω , het 10^{-4} -kwantiel¹⁶, en schaalparameter σ . Bij de horizontale as van de figuur staat het aantal geselecteerde maxima.



Figuur 5.8 10^{-4} kwantiel (doorgetrokken lijn), drempelwaarde ω (stippellijn) en schaalparameter σ als functie van het aantal geselecteerde metingen waarop de Weibull-verdeling is gefit (bron: RIKZ, 2000).

Op basis van deze drempelfiguren is in de studie van (RIKZ, 2000) onderzocht bij welke drempelwaarden de Weibull-verdeling een goede fit van de stormmaxima geeft. De drempelwaarde moet in principe zo hoog mogelijk gekozen worden omdat dan de fit het meest wordt bepaald door echt extreme waarden en minder door tamelijk vaak voorkomende verhogingen van de waterstand. Bovendien reduceert een keuze voor een hoge drempelwaarde de (ongewenste) invloed van verschillen in getij. Anderzijds moet de drempel niet te hoog gekozen worden om zo voldoende waarnemingen in de fit te betrekken en “toevalselementen” zoveel mogelijk uit te sluiten.

Een ander belangrijk criterium was dat het verloop van het 10^{-4} -kwantiel als functie van het aantal stormmaxima “stabiel” moet zijn. In de figuur is dit het gebied waar de doorgetrokken lijn een relatief vlak, vrijwel horizontaal, verloop heeft.

¹⁶ Het 10^{-4} kwantiel is dié waterstand waarvan de jaarlijkse overschrijdingsfrequentie gelijk is aan 10^{-4} per jaar. De kans dat deze waterstand in een jaar wordt overschreden is eveneens gelijk aan 10^{-4} .

Ook parameter α is aan een dergelijke gevoeligheidsanalyse onderworpen, op basis waarvan een keuze voor deze parameter is gemaakt. Voor de zuidelijke stations (IJmuiden en zuidelijker) bleek dat een α van om en nabij de 1,0 de beste fit van de data geeft, voor noordelijke stations was dit 1,35. Een hogere waarde van α leidt tot een sterkere kromming (afvlakking) van de Weibullverdeling bij toenemende herhalingstijden en daarmee tot een reductie van de extremen. De hogere waarden van een α in de zuidelijke stations geven aan dat de extreme waterstanden daar over het algemeen hoger zijn dan in de noordelijke stations.

Na uitvoering van bovenstaande analyse liggen de waarde van α , ρ en ω vast en is een fitprocedure toegepast voor het kiezen van de optimale waarde van schaalparameter σ .

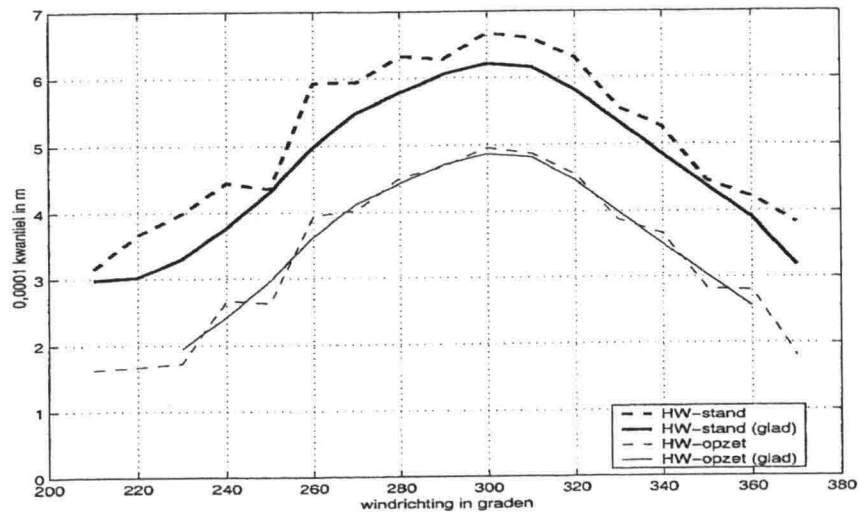
Tabel 5.3 Geselecteerde waarden van α , ω , en het aantal stormmaxima (RIKZ, 2000).

station	α	drempel ω	aantal maxima
Delfzijl	1,35	2,40	211
Huibertsgat	1,35	1,80	201
Terschelling	1,35	1,80	186
Lauwersoog	1,35	2,05	172
Harlingen	1,35	2,00	212
Den Oever	1,35	1,80	172
Den Helder	1,35	1,55	161
IJmuiden	1,00	1,80	174
Hoek van Holland	1,00	1,90	195
Vlissingen	1,00	2,90	176
Hansweert	1,00	3,30	190

Stap 2: Middelen over windrichtingen

In (RIKZ, 2000) is vervolgens per locatie een onderlinge vergelijking gemaakt tussen de resulterende 10^{-4} -kwantielen voor de diverse windrichtingssectoren. Bij alle locaties kwam hetzelfde beeld naar voren: de waterstand en de windopzet zijn relatief laag bij zuidwestelijke richtingen, neemt toe met een top in de buurt van de noordwestelijke windrichting om daarna snel weer af te nemen (oostelijke richtingen). Er waren niet-significante verschillen tussen de windrichtingen die meer door toevalligheden bepaald zijn dan een echte fysische basis hebben. Om het effect van deze toevalligheden te verminderen is een filter toegepast over de windrichtingen dat een gladder en meer fysisch verloop geeft. Er is voor gekozen om het filter alleen op de windopzet toe te passen. De reden voor deze keuze is dat de invloed van het getij op hoogwaterstanden voor een aantal locaties erg groot is. Dit werkt vervlakkend op de verdeling over de windrichtingen. Daarom wordt de verdeling over de richtingen afgeleid voor de windopzet. Vervolgens wordt deze verdeling verschoven op basis van de gemiddelde hoogwaterstand bij de bewuste locatie.

Figuur 5.9 geeft een voorbeeld van het effect van de toepassing van de filtermethode voor locatie Delfzijl. Het verloop over de windrichtingen is duidelijk gladder. Verder valt op dat de gefilterde waterstanden (dikke doorgetrokken lijn) voor alle windrichtingen lager zijn dan de oorspronkelijke (dikke gestippelde lijn). Dit is het gevolg van het feit dat de filtering niet heeft plaatsgevonden op de waterstanden zelf, maar op de windopzet. Door vereffening met de omni-directionele statistiek van het basispeil (zie volgende paragraaf) wordt dit overigens weer gecompenseerd, het gaat hier dus alleen om het gladstrijken van het verloop.



Figuur 5.9 Voorbeelden van wel/niet gefilterde 10^{-4} kwantielen van de waterstand bij Delfzijl als functie van de windrichting (bron: RIKZ, 2000). De extensie "glad" verwijst naar de gefilterde functie.

De filterprocedure resulteert in nieuwe 10^{-4} -kwantielen die niet meer aan de in stap 1 berekende verdelingsfuncties voldoen. De verdelingsfuncties zijn daarom aangepast. In eerste instantie is daartoe parameter ρ (de overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde ω) aangepast. Vervolgens wordt schaalparameter σ weer bepaald op basis van de optimale fit. De overige parameters blijven onveranderd.

Stap 3: Vereffening met basispeil

Zoals beschreven in paragraaf 5.5.1 wordt ten behoeve van de consistentie de windrichtings-afhankelijke statistiek zo gekozen dat na omrekening naar omni-directionele statistiek de basispeilen exact worden gereproduceerd. Daartoe wordt in de eerste plaats de overschrijdingsfrequentie berekend voor een groot bereik van waterstanden, met stapgrootte 0,2 m. Dit wordt voor alle windrichtingsectoren gedaan op basis van de tot dusver afgeleide Weibull-verdelingen.

Vervolgens wordt voor alle waterstanden de overschrijdingsfrequentie gesommeerd over de windrichtingen. De gesommeerde frequentie wordt vergeleken met de frequentie volgens de verdelingsfunctie waaruit het basispeil is afgeleid (paragraaf 5.5.2). De verhouding tussen die twee wordt gebruikt om de frequenties voor alle richtingen te vereffenen. Op deze wijze ontstaat een tabel met nieuwe frequenties voor alle windrichtingssectoren, locaties en waterstanden. Op deze tabellen zijn vervolgens nieuwe Weibull-verdelingen gefit. Daarbij zijn de parameters ω en ρ (respectievelijk de drempelwaarde en de overschrijdingsfrequentie van de drempelwaarde) onveranderd gelaten in vergelijking met de oorspronkelijke fit. Het zijn derhalve de parameters α en σ die de vrijheidsgraden vormen bij de fit. Het resultaat is, zoals gewenst, een windrichtings-afhankelijke statistiek waarvan de omni-directionele statistiek bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} gelijk is aan die van het basispeil.

De resulterende windrichtingsafhankelijke statistiek wordt gebruikt als invoer van HYDRA-K.

5.6 Golfstatistiek

5.6.1. Inleiding

Net als voor de wind en de waterstand zijn ook voor golven Weibull-verdelingen afgeleid voor windrichtingssectoren van 30 graden. In (WL, 2004b) is deze statistiek afgeleid voor de golfhoogte H_{m0} en drie maten voor de golfperiode T_{m02} , $T_{m-1,0}$ en T_{pb} (zie paragraaf 4.5.1 voor een beschrijving van deze maten).

Net als bij de waterstand wordt de windrichtingsafhankelijke statistiek afgestemd op de omni-directionele statistiek.

Paragraaf 5.6.2 beschrijft hoe de omni-directionele golfstatistiek wordt afgeleid. Paragraaf 5.6.3 beschrijft het afleiden van de windrichtings-afhankelijke statistiek. Paragraaf 5.6.4 beschrijft de onzekerheden in de golfstatistiek en de methode waarmee deze onzekerheid wordt gekwantificeerd. Paragraaf 5.6.5 beschrijft in hoeverre fysische begrenzingen aan golfgroei van invloed kunnen zijn op de afgeleide statistiek van extreem hoge golfparameters.

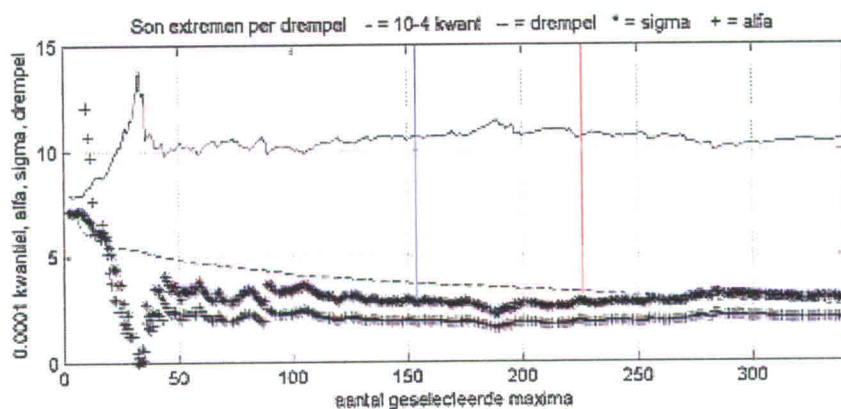
5.6.2. Omni-directionele golfstatistiek

In de studie (WL, 2004b) is de golfstatistiek afgeleid voor 9 stations op relatief diep water langs de Noordzeekust (Figuur 4.2). Op basis van metingen in deze stations in de periode van 1979 tot 2002 is voor elk station afzonderlijk een conditionele Weibull-verdeling afgeleid.

Daarbij is eerst een keuze gemaakt voor vormparameter α . In eerste instantie is α per station en per golfparameter afzonderlijk bepaald. Vervolgens is een functie gefit die het verloop van α langs de kust beschrijft zodat de stations onderling consistente resultaten laten zien. Vervolgens zijn door keuze van het aantal stormmaxima ρ en ω vastgelegd en tot slot is de parameter σ van de Weibull-verdeling gefit. In het vervolg van deze paragraaf wordt de methode nader toegelicht. De methode is in detail beschreven in (WL, 2004b).

Stap 1: Selectie van parameter α per individuele meetreeks

In de eerste plaats is de waarde van α (en het bijbehorende 10^{-4} -kwantiel) als functie van het aantal stormmaxima in kaart gebracht voor alle meetstations. Figuur 5.10 geeft hiervan een voorbeeld. Gekeken is waar α relatief ongevoelig is voor variaties in het aantal stormmaxima. Figuur 5.10 geeft een voorbeeld van deze keuze middels de rode (α) en blauwe (10^{-4} -waarde) lijn voor locatie SON (Schiermonnikoog Noord). Hieruit blijkt dat de meest stabiele keuze van het aantal waarnemingen voor α en de 10^{-4} -waarde onderling behoorlijk kunnen verschillen.



Figuur 5.10 Voorbeeld van objectivering van de keuze op basis van stabiele α (rode lijn) en stabiele 10^{-4} -waarde (blauwe lijn) voor locatie SON voor de periode 1979-2002.

Stap 2: Selectie van parameter α op basis van gezamenlijke meetreeksen

De waarde van parameter α zoals die volgt uit de procedure van stap 1 bleek helaas sterk locatieafhankelijk. Bijvoorbeeld voor de significante golfhoogte H_{m0} varieert de gevonden waarde van α tussen ca. 1.9 en 3.3 voor de 9 stations langs de Noordzeekust. Gedeeltelijk is de variatie van deze parameter afhankelijk van toevalligheden ("statistische ruis"), maar de verschillen zijn zo significant dat er ook een fysische verklaring bestaat. Zo is bijvoorbeeld de waarde van α voor de noordelijke stations lager dan voor de zuidelijke stations, als gevolg van het feit dat golven in de noordelijke stations in de regel hoger zijn tijdens stormcondities.

In (WL, 2004b) is een methode ontwikkeld om de (ongewenste) statistische toevalligheden in de berekende waarde van α zoveel mogelijk te reduceren, gebruik makend van een eenvoudige beschrijving van de fysica. De methode vertoont een sterke vergelijking met de zogenoemde “Regional Frequency Analysis” (RFA). De RFA methode staat ook bekend onder het principe “trading space for time” (zie ook Hosking and Wallis, 1997 en Van Gelder, 1999). Bij een RFA worden de meetgegevens van diverse locaties met gelijkwaardige fysische eigenschappen vertaald naar de locatie waar men een verdelingsfunctie af wil leiden. Het gevolg is dat de reeks (veel) meer gegevens bevat en de extrapolatie daardoor betrouwbaarder wordt geacht. Na extrapolatie met die 'verlengde' reeks wordt het resultaat weer teruggeschaald. Vanwege de verschillen van de methode uit (WL, 2004b) met RFA op detailniveau spreken we in het vervolg van een “Modified Regional Frequency Analysis” (MRFA, Den Heijer et. al, 2005).

De factoren die van invloed zijn op de ontwikkeling van het golfveld zijn met name de strijklengte en de waterdiepte. Daarom is de waarde van α gerelateerd aan de volgende functie:

$$\alpha = aL^b D^c \tag{5.4}$$

waarin:

- L = representatieve (strijk-)lengtemaat (= geschatte afstand tot Doggersbank in km);
- D = waterdiepte (m); en
- a, b, c = functieparameters, af te leiden op basis van een fitprocedure.

Tabel 5.4 toont de ten opzichte van de Doggersbank gekozen lengtemaat en de waterdiepte per meetlocatie. De parameters a , b en c zijn zó gekozen dat de functie een optimale fit geeft op de in stap 1 berekende waarden van α voor de 9 stations.

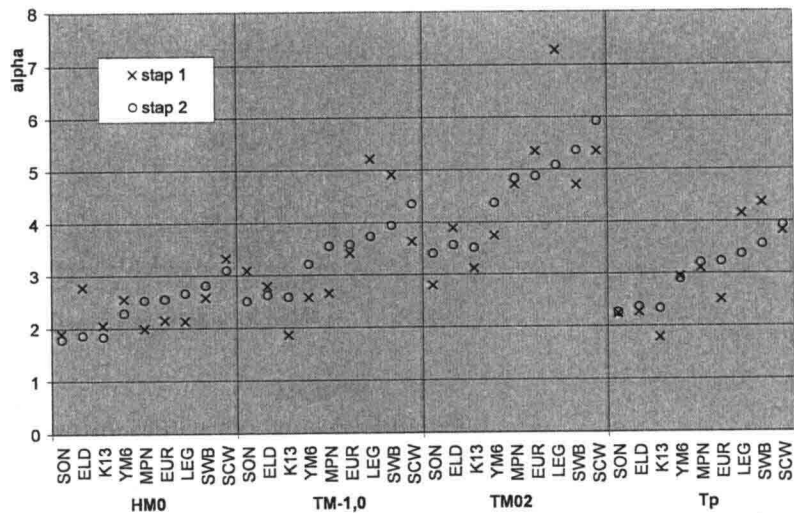
Tabel 5.4 Diepte en lengtemaat (afstand tot Doggersbank) voor de 9 stations.

station	diepte (m)	lengtemaat (km)
SON	19	230
ELD	26	250
K13	30	250
YM6	21	305
MPN	18	335
EUR	32	360
LEG	21	360
SWB	20	380
SCW	15	410

Omdat de fit voor 9 stations wordt afgeleid heeft een afwijkende waarde van α in één van de stations mogelijk vrij veel effect op de uiteindelijke fit. Om deze gevoeligheid te reduceren is gebruik gemaakt van een andere fysische eigenschap van het systeem onder stormcondities: golfhoogte en golfperiode zijn sterk gecorreleerd. Uitgaande van volledige afhankelijkheid hebben (Den Heijer et al., 2005) aangetoond dat er een lineair verband bestaat tussen de α -waarden van verschillende golfparameters (H_{m0} , T_{m02} , $T_{m-1,0}$ en T_p). Daarom is in (WL, 2004) één fit afgeleid van vergelijking (4.4) op basis van de α -waarden van alle vier de golfparameters. Met een fit op basis van 36 waarden (4 golfparameters keer 9 stations) is de gevoeligheid voor afwijkende waarden namelijk kleiner dan voor 9 waarden. Om deze fit af te kunnen leiden zijn de α -waarden eerst herschaald zodat de verdelingen van de vier afzonderlijke golfparameters onderling vergelijkbaar zijn. Voor de (wiskundige) details van de procedure van het herschalen en fitten verwijzen we naar (WL, 2005a, paragraaf 2.2.3). Tabel 5.5 toont de parameterwaarden van vergelijking (4.4) op basis van deze fitprocedure. De waarden uit stap 2 worden vergeleken met stap 1 in Figuur 5.11.

Tabel 5.5 Parameters van vergelijking (5.4).

parameter:	a	b	c
waarde:	0,007	0,915	-0,101



Figuur 5.11 Eerste selectie van α op basis stap 1 vergeleken met de gefitte waarde uit stap 2.

Stap 3: Bepaling van overige parameters

Na de vaststelling van parameter α wordt voor elke locatie een nieuwe Weibull-verdeling afgeleid. In de eerste plaats moet (wederom) een keuze gemaakt worden voor het aantal stormmaxima dat bij de fit-procedure wordt gehanteerd waarmee de parameters ρ en ω worden vastgelegd. Daarbij is het van belang om enerzijds voldoende waarnemingen te gebruiken om een betrouwbare fit af te kunnen leiden, maar anderzijds is bij een te groot aantal niet daadwerkelijk sprake van stormgebeurtenissen. Er is, gekozen voor 200 stormmaxima. Tenslotte wordt de schaalparameter σ gefit. Tabel 5.6 toont de resulterende 10^{-4} -kwantielen die uit de gefitte verdelingsfuncties volgen.

Deze gegevens vormen ook de basis voor de diepwaterrand-voorwaarden van de nieuwe golfberekeningen met SWAN voor de HR2006. Voor de CRASH-actie zijn destijds de deze nieuwe SWAN sommen niet gebruikt zodat daar deze verbeteringen nog niet waren doorgevoerd. Diepwaterrandvoorwaarden voor de CRASH-actie zijn daarom gelijk aan die voor HR2001 die zijn afgeleid in 1995-1996 (WL, 2004b) op de dataset 1979-1993. De effecten voor het verlengen van de meetreeks zijn gerapporteerd in (WL, 2004b) en geven met name hogere H_{m0} bij een aantal stations (bv SON nu 11.00m vs 9.78m destijds).

Tabel 5.6 10^{-4} -kwantielen voor 4 golfparameters en 9 stations¹⁷.

Locatie	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_{m02}	T_p
SON	11,00	16,4	11,80	19,9
ELD	11,10	14,5	11,00	17,0
K13	10,50	14,6	10,80	16,9
YM6	9,32	14,0	10,20	16,1
MPN	7,96	12,7	9,46	15,3
EUR	8,19	11,3	8,74	12,7
LEG	8,08	11,2	8,56	12,9
SWB	7,06	10,8	8,46	12,4
SCW	5,70	10,6	8,15	12,3

5.6.3. Windrichtingsafhankelijke golfstatistiek

Methode

De golfstatistiek per windrichtingssector is als volgt bepaald (RIKZ, 2000; WL, 2004b):

1. Indelen van alle meetwaarden (dus niet alleen stormmaxima) in windrichtingssectoren.
2. Afleiden van een conditionele Weibull-verdeling voor elke sector.
3. Corrigeren van de 10^{-4} -kwantielen van elke sector opdat het geheel in overeenstemming is met de omnidirectionele statistiek (analoog aan de methode voor de waterstand, paragraaf 5.5.3).

¹⁷ Uit deze Tabel mogen geen algemeen geldende verhoudingsgetallen voor de periodematen worden berekend omdat de getallen niet afgeleid zijn voor simultane waarnemingen. De verhouding geldt alleen als een indicatie voor de aangegeven locaties.

-
4. Opnieuw afleiden van een Weibull-verdeling voor elke sector waarbij geldt dat deze de gecorrigeerde 10^{-4} -kwantiel-waarde oplevert.

Voor de golfperiode-maten T_{m02} , T_p en $T_{m-1,0}$ geldt dat eerst nog een voorselectie gemaakt is om de grensperiode tussen zeegang en deining vast te stellen (RIKZ, 2000). Dit gaat analoog aan de methode zoals beschreven in paragraaf 4.6.4. Voor de details en een overzicht van de resultaten verwijzen we naar (WL, 2004b, paragraaf 5.2).

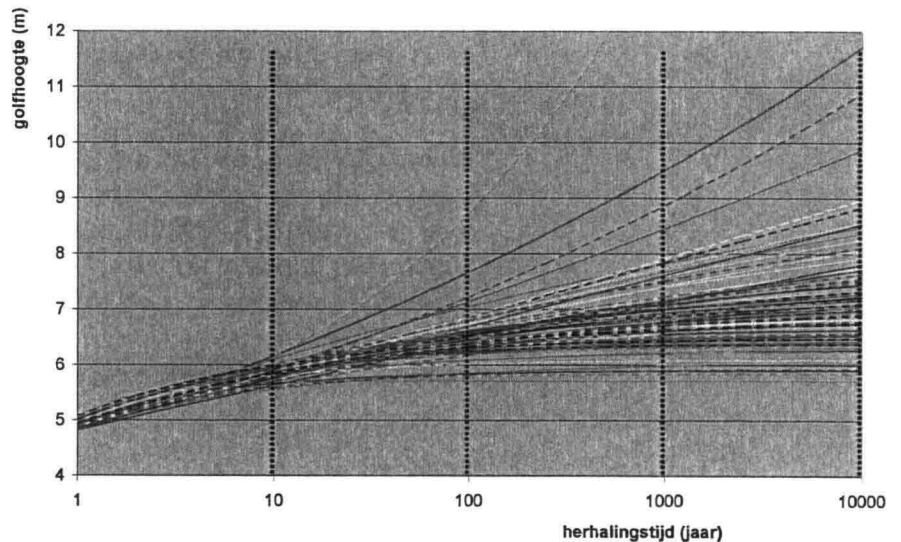
5.6.4. Onzekerheden bij extremewaardenstatistiek

Inleiding

Statistieken van extreme waarden zijn in de regel behept met relatief grote onzekerheden. Deze onzekerheden worden vooral veroorzaakt door het feit dat de statistiek gebaseerd is op een meetreeks van een lengte die veel korter is dan de herhalingscycli waarvoor de statistieken zijn afgeleid. Kennis van onzekerheden draagt bij aan het inzicht in de betrouwbaarheid van de hydraulische belastingen en laat zien welke onderdelen verbetering vragen, bijvoorbeeld middels het uitvoeren van extra metingen. Deze paragraaf beschrijft hoe de onzekerheden in de “nieuwe golfstatistiek” zijn afgenomen in vergelijking met de “oude golfstatistiek” (RIKZ, 1995, 1996) als gevolg van het verlengen van de meetreeks.

Bepalen van betrouwbaarheidsinterval met resampling-technieken

In (WL, 2005a) zijn betrouwbaarheidsintervallen van golfstatistieken bepaald op basis van een methode die gebruik maakt van ‘resampling’ technieken. Van den Boogaard en Diermanse (2005) hebben aangetoond dat een dergelijke methode een goede schatting geeft van onzekerheden van golfparameters langs de Nederlandse kust. Resampling betekent dat een groot aantal random trekkingen verricht wordt uit de beschikbare meetreeks (of een deel ervan, zoals stormmaxima). Uit de trekkingen wordt meerdere keren de statistiek berekend en op basis van de variatie in de uitkomsten worden de onzekerheden bepaald. Figuur 5.12 geeft een voorbeeld van een groot aantal verdelingsfuncties dat met resampling is afgeleid. Tezamen vormen zij een soort van ‘waaier’ en de breedte van deze waaier is een indicatie van de mate van onzekerheid.



Figuur 5.12 “Waaier” van verdelingsfuncties, afgeleid met resamplingtechnieken

Vergelijking met oude golfstatistiek

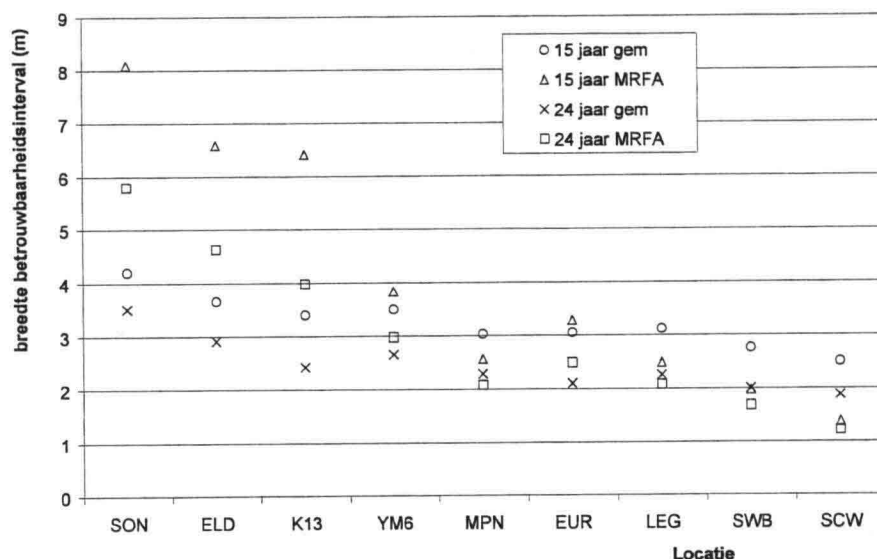
Eén van de achterliggende doeleinden voor het ontwikkelen en implementeren van de methoden voor het bepalen van betrouwbaarheidsintervallen is dat daarmee een onderlinge vergelijking gemaakt kan worden tussen de onzekerheden in de “oude statistiek” (RIKZ, 1995, 1996) en de onzekerheden in de “nieuwe statistiek” (WL, 2004b). De belangrijkste oorzaken voor verschillen tussen beide zijn:

1. De beschikbare meetreeks is uitgebreid van 15 naar 24 jaar;
2. In (RIKZ, 1995, 1996) werd Weibull-parameter α gemiddeld over de stations, in paragraaf 5.6.2 is daarvoor een op de fysica gebaseerde methode geïntroduceerd (MRFA).

In (WL, 2005a) zijn vergelijkingssommen uitgevoerd om stapsgewijs het effect van deze verschillen op de betrouwbaarheidsintervallen te kwantificeren. De betrouwbaarheidsintervallen zijn gekwantificeerd voor de volgende vier combinaties:

1. Meetreeks 15 jaar, methode gemiddelde α ;
2. Meetreeks 15 jaar, methode MRFA;
3. Meetreeks 24 jaar, methode gemiddelde α ; en
4. Meetreeks 24 jaar; methode MRFA.

Uit de vergelijkingssommen bleek dat de betrouwbaarheidsintervallen voor de reeks van 24 jaar voor alle locaties en parameters kleiner zijn dan voor de reeks van 15 jaar (WL, 2005a) zoals verwacht mag worden voor langere meetreeksen. Met name in de noordelijke locaties (SON, ELD, K13) is het verschil tussen de beide reeksen groot. Ter illustratie toont Figuur 5.13 de afname in de breedte van het betrouwbaarheidsinterval voor golfhoogte H_{m0} . Geconcludeerd kan worden dat met name voor de noordelijke locaties het betrouwbaarheidsinterval nog steeds erg groot is.



Figuur 5.13 Breedte van het betrouwbaarheidsband voor het 10^{-4} -kwantiel van parameter H_{m0} .

5.6.5. Het effect van fysieke begrenzungen op de golfstatistiek

Inleiding

Statistische extrapolatie van meetresultaten naar extreme situaties kan leiden tot fysisch onrealistische waarden voor golfparameters. In de voorgaande paragrafen is de statistiek van de golfparameters H_{m0} , T_{m02} , $T_{m-1,0}$ en T_p bepaald zonder inachtneming van eventuele fysieke begrenzungen zoals de beperkte waterdiepte of strijklengte tijdens extreme condities. In (WL, 2004a) is onderzocht in hoeverre dergelijke fysieke begrenzungen mogelijk effect hebben op de kans van optreden van extreme golfhoogtes en -perioden.

Methode

De fysieke bovengrens van de golfparameters wordt hoofdzakelijk bepaald door de heersende stormcondities, de strijklengte, de diepte en de golfsteilheid. Om de bovengrenzen per meetlocaties te bepalen, is de volgende procedure uitgevoerd:

1. Voor vier windrichtingen (240, 270, 300 en 330 graden) zijn in totaal 6 combinaties van windsnelheid en waterstand doorgerekend met een ééndimensionale (1D) schematisatie van het golfmodel SWAN (zie &5.3.3). Dit zijn combinaties met herhalingsstijden 100, 500, 1.000, 4.000, 10.000 en 100.000 jaar. In de statistische analyses is aangenomen dat windsnelheid en waterstand volledig gecorreleerd zijn. De SWAN-1D berekeningen zijn uitgevoerd over raaien van maximaal 1.000 km met de werkelijke bathymetrie.

2. Voor iedere meetlocatie en windrichting is de diepte over de raai bepaald uit het zogenaamde ZUNO-model¹⁸. De raai is vastgelegd door de meetlocatie en de windrichting.
3. Voor elke 1D berekening zijn de golfcondities in de bewuste locaties opgeslagen en beschouwd als fysische bovengrens onder die condities. De bovengrens is óf het gevolg van beperkte strijklengte óf het gevolg van beperkte bodemdiepte.
4. De statistiek uit stap 1 en de bovengrenzen uit stap 3 worden gecombineerd. Het resultaat is voor elke windrichting een bovengrens van de golfparameter als functie van de herhalingstijd.
5. De functie uit stap 4 wordt vergeleken met de statistiek uit de voorgaande paragrafen. Als de lijn van de functie (gedeeltelijk) onder de lijn van de statistiek ligt, dan zullen fysische begrenzungen naar verwachting in de praktijk van invloed zijn onder extreme condities en een reducerend effect hebben op de afgeleide statistiek.

SWAN-berekeningen zijn uitgevoerd met de standaardinstellingen die ook voor het afleiden van de HR2006 voor de Hollandse Kust zijn gebruikt (zie hoofdstuk 6 en WL/Haskoning, 2005).

Voor de SWAN-berekeningen zijn statistieken van windsnelheid en waterstand nodig. Voor de golfstations op diep water zijn deze statistieken niet of onvoldoende beschikbaar. Daarom zijn in stap 1 statistieken van nabijgelegen stations gebruikt (zie Tabel 5.7).

Tabel 5.7 Keuze van stations voor wind- en waterstandstatistiek

golven	wind	waterstand
SON	Terschelling west	Huibertgat
ELD	Texel	Den Helder
YM6	IJmuiden	IJmuiden
EUR	Hoek van Holland	Hoek van Holland
SCW	Vlissingen	Vlissingen

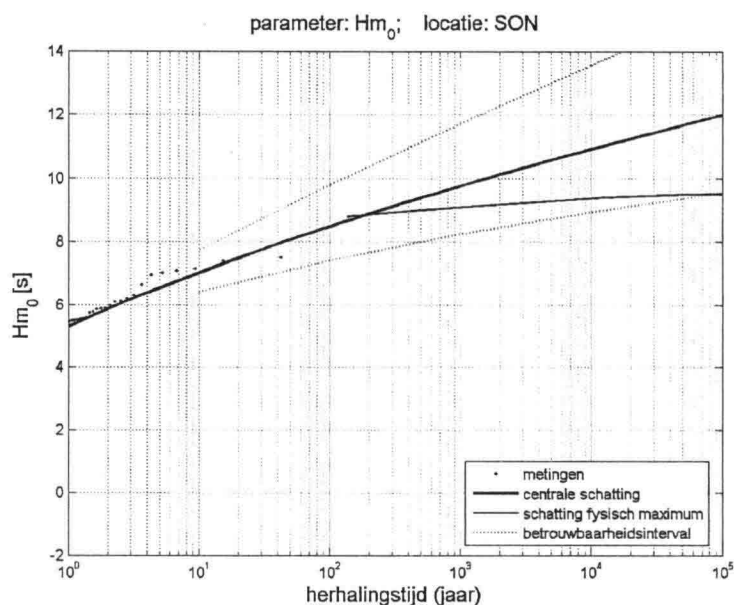
Resultaten

De effecten van de fysische begrenzungen verschillen sterk per locatie. Bij locatie EUR (Europlatform) is er bijvoorbeeld alleen een effect waarneembaar voor parameter T_p , en dan alleen maar bij windrichtingssector 300 graden. De omni-directionele statistiek van EUR blijft voor alle golfparameters onveranderd. De grootste effecten van fysische begrenzungen worden waargenomen bij locatie SON, noordoostelijk van Schiermonnikoog. Voor alle windrichtingen en golfparameters spelen de fysische begrenzungen een rol en hebben ze een reducerend effect op de berekende statistiek. Figuur 5.14 geeft het voorbeeld van golfhoogte-parameter H_{m0} . De grafiek van het fysisch maximum ligt duidelijk onder de centrale schatting van de statistiek. Voor de golfparameters $T_{m-1,0}$ en T_p komen de berekende fysische bovengrenzen voor een aantal herhalingstijden zelfs lager uit dan de ondergrens van het berekende betrouwbaarheidsinterval en soms zelfs

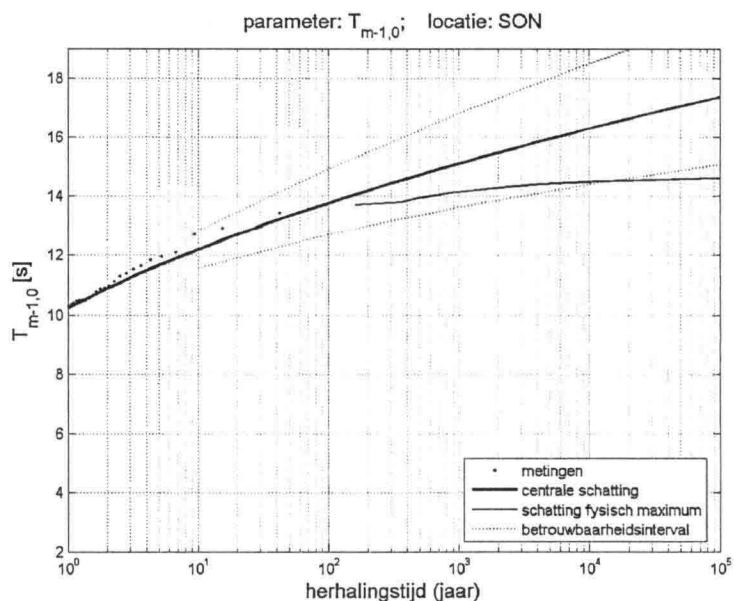
¹⁸ ZUNO = ZUIDelijk NOordzee modelschematisatie ten behoeve van het WAQUA waterbewegingsmodel van rijkswaterstaat, zie (ZUNO, 2003).

lager dan gemeten waarden (Figuur 5.15). Hieruit blijkt dat de periode door SWAN nog niet goed wordt bepaald. Voor deze parameter is er meer vertrouwen in de statistische extrapolatie dan in de berekende begrenzing.

In het kader van de HR2006 is op advies van ENW-rand de statistiek zonder berekende fysische begrenzingsen gehandhaafd, behoudens voor de golfhoogte H_{m0} bij SON, omdat de begrenzing daar duidelijk met een dieptelimiet samenhangt en we H_{m0} uit SWAN wel vertrouwen.



Figuur 5.14 Statistiek en bovengrenzen voor parameter H_{m0} bij locatie SON.



Figuur 5.15 Statistiek en bovengrenzen voor parameter $T_{m-1,0}$ bij locatie SON.

6. Vertaling van waterstanden en golven op diep water naar de waterkering

6.1 Inleiding

Voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden zijn de condities aan de teen van de dijk van belang. Aangezien de marginale statistiek van waterstanden op enkele locaties langs de kust, en die van golven op relatief diep water (orde 20 m waterdiepte; zie hoofdstuk 4 en 5) gegeven is, moet er zowel voor de waterstand als golven een vertaalslag gemaakt worden naar de teen van de dijk. Volgens de rekenprocedure (zie hoofdstuk 3) moet er bij elke opgeschaalde conditie op diep water, een bijbehorende conditie bij de waterkering worden bepaald. Er is hiertoe een standaard transformatiematrix voor de golven gemaakt, waarmee de vertaling voor elke conditie te maken is via interpolatie.

Dit hoofdstuk beschrijft deze vertaalslag van condities in de meetstations naar condities voor de harde waterkeringen. Paragraaf 6.2 beschrijft de interpolatieroutine voor de waterstand. Paragraaf 6.3 beschrijft vervolgens de uitgevoerde berekeningen voor de transformatiematrix met het golfmodel SWAN.

6.2 Vertalen van waterstanden naar de waterkering

6.2.1. Methode

Een conditie op diep water bestaat uit een waterstand, een windsnelheid en -richting, en (voor de Hollandse kust) de golfperiodemaat. Dit zijn de stochastische variabelen die worden gebruikt in de probabilistische methode (zie paragraaf 2.3.4). In deze paragraaf wordt beschreven hoe de waterstand bepaald wordt voor de kering.

De meetstations waarvan de marginale *waterstand* statistiek beschikbaar zijn, zijn alle kuststations. De waterstand uit de diep water conditie die vertaalt moet worden is feitelijk dus een waterstand bij het kuststation. Impliciet zit hier de aanname onder dat het verschil tussen de waterstand ter plaatse van het waterstandsmeetstation aan de kust en die bij het golfmeetstation geen effect heeft op de vertaling van de golfcondities vanaf het golfmeetstation naar de harde waterkering.

Deze aanname is geldig omdat de golfhoogte volledig bepaald wordt door het ondiepe water vlak voor de waterkering, en de golfperiode nauwelijks beïnvloed wordt door een klein verhang in het waterstandsveld. Wel moet er altijd voor worden gezorgd dat bij een diepwater locatie (golfmeetlocatie) een relevant (nabijgelegen) kuststation voor wind en waterstanden wordt gekozen. Van belang is om bij het vertalen van een diep water locatie naar de waterkering een zorgvuldige keuze te maken in de toedeling van kustgedeelten te maken aan een diepwater locatie. Zo wordt de Helderse Zeewering ‘opgehangen’ aan de diepwater locatie Eierlandse Gat, en het Flauwe werk aan Europlatform

De waterstand bij een willekeurige harde waterkering is uiteraard niet geheel gelijk aan die in het waterstandsmeetstation. Waterstandsverschillen tussen het meetstation en die vlak voor de harde waterkering zijn wél van belang. Daarom wordt hiervoor een vertaling gemaakt op basis van interpolatie tussen de waterstanden in diverse nabijgelegen meetstations. Er is een procedure ontwikkeld waarbij de diverse regio's (Westerschelde, Oosterschelde, Zeeuwse en Hollandse kust) onderverdeeld zijn in deelgebieden. Voor alle harde waterkeringen binnen één deelgebied wordt de waterstand berekend op basis van de waterstand in dezelfde drie meetstations (“steunpunten”).

De berekening van de waterstand aan de teen van de dijk wordt in drie stappen bepaald:

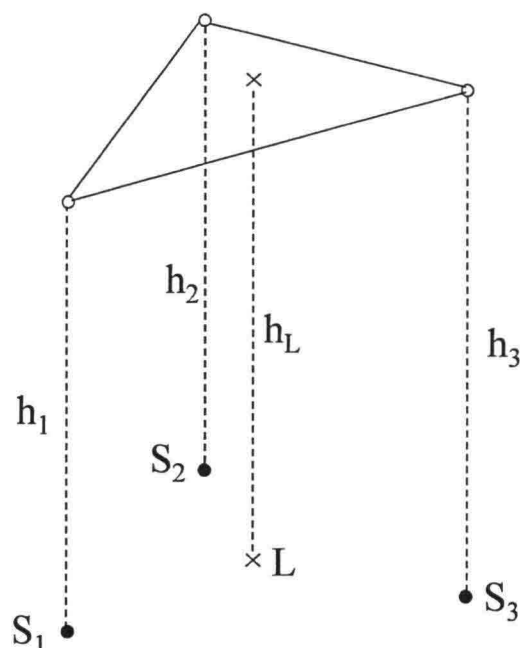
1. bepalen van de waterstand in de drie steunpunten;
2. interpolatie tussen de steunpunten; en
3. correctie voor verschillen met het toetspeil.

Stap 1: bepalen van de waterstand in de drie steunpunten

De rekenprocedure voor het bepalen van de waterstand aan de teen van de dijk gaat uit van het principe dat de overschrijdingsfrequentie van de waterstand in het meetstation uit de te vertalen conditie ook van toepassing is op de andere steunpunten. De waterstand in deze steunpunten volgt dan direct uit hun respectievelijke marginale verdelingsfuncties.

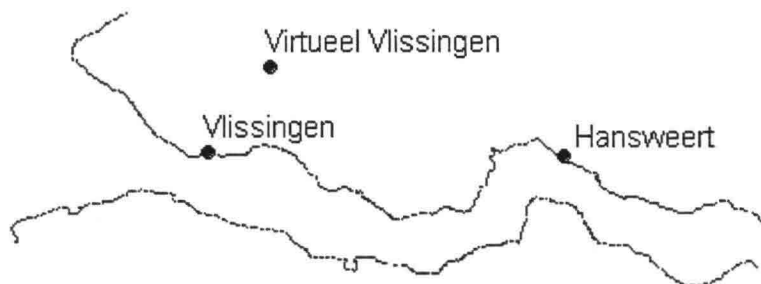
Stap 2: interpolatie tussen steunpunten

Tussen de berekende waterstanden in de drie steunpunten wordt vervolgens een driehoeksinterpolatie toegepast om de waterstand aan de teen van de dijk te berekenen. Figuur 5.2 geeft dit interpolatieproces schematisch weer.



Figuur 6.1 Schematische weergave van de schatting van waterstand h_L in locatie L op basis van interpolatie van waterstanden h_1 , h_2 , en h_3 , in de drie steunpunten S_1 , S_2 , en S_3 . De waterstand in locatie L volgt dan door vanuit L een lijn verticaal omhoog te trekken totdat deze het vlak raakt. De hoogte van de lijn, h_L , is de geschatte waterstand in locatie L .

De keuze van de drie steunpunten wordt mede bepaald door de wens om het verloop van de basispeilen uit (RIKZ, 1995a) zo goed mogelijk te reproduceren. In een aantal gevallen is daarbij gebruik gemaakt van zogenoemde “virtuele stations”. Een voorbeeld daarvan is het virtuele station in de Westerschelde ten noordoosten van Vlissingen (zie Figuur 5.3). De “waterstand” in dit virtuele station wordt onder alle omstandigheden gelijk gesteld aan de waterstand in Vlissingen. De waterstand in Hansweert is in de regel hoger dan in de andere twee steunpunten. Het gevolg is dat de waterstand een stijgende oriëntatie heeft in oost-zuidoostelijke richting, loodrecht op de lijn tussen Vlissingen en het virtuele station. Deze oriëntatie is in lijn met het verloop van de basispeilen 1985 (RIKZ, 1995a).



Figuur 6.2 Drie steunpunten ter bepaling van de waterstand in de regio Westerschelde.

Stap 3: correctie voor verschillen met het toetspeil

Als de bovenstaande berekening wordt uitgevoerd voor de normfrequentie (bijvoorbeeld 1/4.000 per jaar in de Westerschelde) dan hoort de berekende waterstand in theorie gelijk te zijn aan het toetspeil dat bepaald is volgens interpolatie op basis van isolijnen als bv. gegeven in Figuur 5.3 (zie paragraaf 5.5.2¹⁹). In de praktijk kunnen echter kleine verschillen ontstaan doordat het toetspeil op een willekeurige locatie niet berust op lineaire interpolatie tussen de meetstations, maar op een op fysica gebaseerde interpolatie (RIKZ, 1993c), en dus op een andere wijze tot stand is gekomen dan volgens de rekenmethode van stap 1 en stap 2. Daarom wordt in de rekenprocedure een correctie toegepast, opdat de waterstand van de dijk *bij de normfrequentie* gelijk is aan het toetspeil.

Een overzicht van de steunpunten is gegeven in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Steunpunten voor Interpolatie in de diverse deelgebieden.

nr	Oosterschelde	Westerschelde	Hollandse kust
1	Roompot buiten	Vlissingen	Vlissingen
2	Roompot bekken	Hansweert	OS 11
3	Burghsluis		Hoek van Holland
4	Wemeldinge		IJmuiden
5	Marollegat		Den Helder
6	Stavenisse		Terschelling West
7	Philipsdam west		Den Oever
8	Colijnsplaat		Harlingen
9	Zeelandbrug		

¹⁹ Het betreft in die figuur het basispeil maar dergelijke figuren zijn ook beschikbaar voor de toetspeilen.

6.2.2. Alternatieve aanpak voor waterstanden voor de Oosterscheldekering

Gedurende extreme stormgebeurtenissen zal in de Oosterschelde de (gesloten) stormvloedkering van grote invloed zijn op waterstanden en golfcondities. Dit heeft ook consequenties voor het probabilistische rekenmodel omdat er additionele invloeden zijn die zó relevant zijn dat ze in het belastingmodel opgenomen moeten worden. Daarom wijkt het belastingmodel voor de Oosterschelde significant af van de overige gebieden. Het belastingmodel is gebaseerd op een studie van (Stroeve, 2000) en het bevat vier additionele stochastische variabelen (stochasten) in vergelijking met het belastingmodel van de overige regio's:

1. *Onnauwkeurigheid van de waterstandsvoorspelling.* De stormvloedkering wordt gesloten op basis van de voorspelling met het 1-dimensionale hydrodynamische model IMPLIC van de waterstand direct buiten de kering. Eventuele fouten in deze voorspelling hebben gevolgen voor het sluitingsregime en daarmee ook op de resulterende waterstand. De onnauwkeurigheid is verondersteld normaal verdeeld te zijn met een standaardafwijking van 0.25 meter.
2. *De stormduur.* Deze is verondersteld lognormaal verdeeld te zijn met een gemiddelde van 54.3 uur en een standaardafwijking van 18.8 uur.
3. *Het faseverschil tussen getij en maximale windopzet.* Deze is verondersteld uniform verdeeld te zijn tussen -6.208 en 6.208 uur.
4. *Het wel/niet inzetten van de 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. Bij deze zogenaamde noodsluiting zullen de waterstanden in het Oosterschelde- bekken hoger uitvallen dan bij de strategiesluiting.

Zoals beschreven in paragraaf 3.4 maakt de methode De Haan bij het opschalen gebruik van waargenomen stormgebeurtenissen. Het probleem van de laatste stochast (noodsluiter) is dat hiervan geen meetgegevens zijn voor de hele meetreeks, simpelweg omdat de kering pas later in gebruik is genomen. Voor alle vier de extra stochasten van het model van de Oosterschelde geldt bovendien dat deze niet asymptotisch afhankelijk zijn van de wind en de waterstand. Het gevolg is dat deze vier stochasten niet op dezelfde wijze binnen de methode De Haan opgenomen kunnen worden als de windsnelheid en de waterstand. Daarbij komt dat het opschalen van variabelen als het faseverschil en de noodsluiter niet realistisch is.

Om deze variabelen toch op probabilistische wijze mee te nemen voor elke stormgebeurtenis uit de meetreeks is met de Monte Carlo methode een trekking gedaan uit de afzonderlijk kansverdeling van deze vier stochasten. Deze trekkingen worden vervolgens beschouwd als de "werkelijk" opgetreden waarde gedurende die stormgebeurtenis.

Op basis van de metingen van wind en waterstand en de trekkingen van de vier additionele stochasten worden vervolgens voor elke

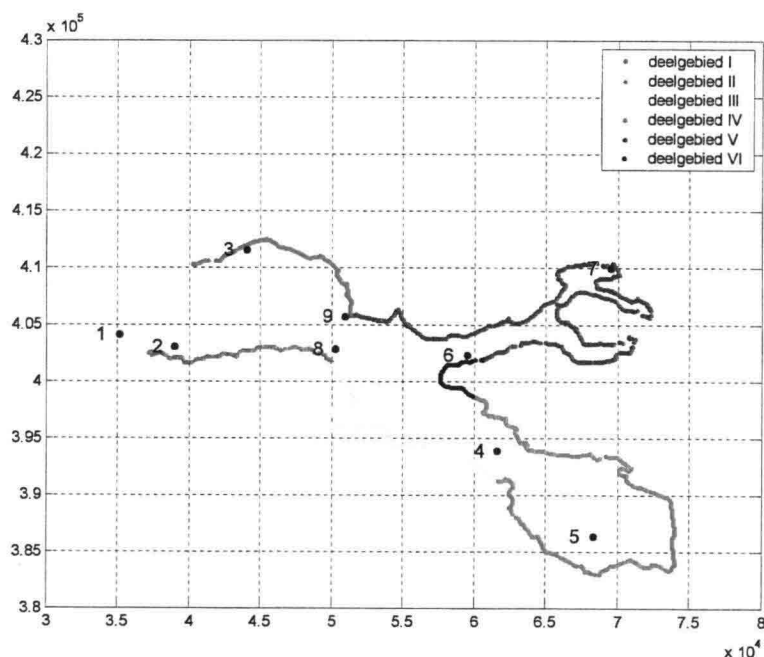
stormgebeurtenis de lokale waterstanden in de Oosterschelde bepaald op basis van een database met rekenresultaten van het model IMPLIC. De invoerparameters van IMPLIC zijn:

1. windsnelheid;
2. windrichting;
3. maximale waterstand buitenzijde kering;
4. duur windopzet;
5. faseverschil tussen getij en opzet;
6. beheer van de stormvloedkering (inclusief noodsluiter bij falen van de reguliere sluis).

Bovenstaande lijst bevat zes van de zeven stochasten van het model Oosterschelde. De zevende stochast, onnauwkeurigheid van de waterstandsvoorspelling, is niet als invoerparameter in te voeren in IMPLIC. Om toch rekening te houden met de gevolgen van de onnauwkeurigheid in de waterstandsvoorspelling is de waarde van de Monte Carlo trekking opgeteld bij de waarde van de buitenwaterstand, die als invoer voor IMPLIC dient.

De uitvoer van IMPLIC is beschikbaar voor 9 locaties in het Oosterscheldegebied en betreft de maximale waterstand gedurende een stormgebeurtenis, als functie van de bovenstaande 6 (feitelijk dus 7) variabelen. De 9 locaties staan in Tabel 6.1 en worden toegepast in de interpolatiemethode, als beschreven in paragraaf 6.2.1.

Vervolgens is dezelfde methode als in paragraaf 6.2.1 toegepast. Tabel 6.1 geeft in de 1^e kolom een overzicht van de steunpunten voor de Oosterschelde. Deze steunpunten van de Oosterschelde zijn dus geen meetstations, maar uitvoerlocaties van het rekenmodel IMPLIC. Ter illustratie van het interpolatieproces toont Figuur 6.3 de indeling in deelgebieden voor de Oosterschelde. Tabel 6.2 geeft per deelgebied van de Oosterschelde aan welke steunpunten HYDRA-K hanteert.



Figuur 6.3: Indeling in deelgebieden in de Oosterschelde. Zie voor een overzicht van de 9 afgebeelde locaties.

Tabel 6.2 Steunpunten per deelgebied in de Oosterschelde (zie Figuur 6.3)

gebied	steunpunten		
I	2	3	9
II	2	8	9
III	4	8	9
IV	4	5	6
V	6	7	9
VI	4	6	9

6.3 Vertalen van golven van diep water naar de waterkering met het golfmodel SWAN

6.3.1 Inleiding, aanpak en uitgangspunten

De transformatiematrix voor het maken van de vertaalslag van wind, waterstand en golfcondities op diep water naar golfcondities aan de teen van de waterkering, bestaat uit een grote hoeveelheid berekeningen, uitgevoerd met het golfmodel SWAN. De transformatiematrix is in feite een discrete overdrachtsfunctie. Doel is om met de matrix een zodanig groot domein aan diep water condities op te spannen, dat alle relevante opgeschaalde stormcondities hiermee kunnen worden vertaald naar de waterkering. In deze paragraaf beschrijven we de details van deze berekeningen.

Er zijn berekeningen gemaakt voor drie gebieden, ieder met eigen uitgangspunten. Hiertoe is gekozen omdat er bij de start van het project alleen middelen waren voor het uitvoeren van nieuwe berekeningen langs de Hollandse kust. In het vervolg van het hoofdstuk zullen de drie gebieden dan ook regelmatig apart omschreven worden. De aanpak voor de Hollandse kust is speciaal opgesteld voor het toetsen van waterkeringen, en momenteel de meest volledige; de aanpak voor de Zeeuwse estuaria is opgesteld voor het ontwerp van steenbekledingen in Zeeland; en tenslotte de aanpak voor de Oosterscheldekering, die is gebaseerd op een beperkt toepassingsgebied. De aanpak en uitgangspunten van elk van de drie matrices geven tegelijkertijd de verschillen en overeenkomsten weer, en worden hieronder gegeven.

Hollandse kust

Er zijn 504 berekeningen uitgevoerd, waarmee een fijnmazige transformatiematrix is verkregen (zie Haskoning/WL, 2005). Er is een representatieve modellering gekozen voor toetsing van waterkeringen in de periode (2006-2011). Hiervoor is bij het maken van de modelbodem uitgegaan van een verwachtingswaarde over een recente periode van 10 jaar. Deze geeft zo een actueel beeld van het gemiddelde van een dynamisch systeem. Er is gekozen om de spreiding om dit gemiddelde te verwaarlozen. De golfberekeningen zijn uitgevoerd met de SWAN productieversie 40.41AB. De rekenresultaten zijn vervolgens gecorrigeerd aan de hand van hindcaststudies van de metingen bij Petten

Zeeland

De berekeningen toegepast voor de harde keringen in de Zeeuwse estuaria (Westerschelde en Oosterschelde) en de Zeeuwse Noordzeekust zijn gebaseerd op (Alkyon, 1997; 1998). Deze berekeningen zijn destijds primair gemaakt ter bepaling van ontwerpwaarden voor projectbureau Zeeweringen. Er zijn 288 berekeningen uitgevoerd.

Omdat de berekeningen opgezet zijn voor ontwerpdoeleinden, is er in diverse uitgangspunten een niet goed kwantificeerbare veiligheidsmarge ingebouwd. Zo zijn diverse zandplaten en schorren niet gemodelleerd volgens de huidige situatie, maar op basis van prognoses voor de situatie medio 2050-2060. Daartoe is de bodem verlaagd met 0,5 tot 1,0 m.

De golfberekeningen zijn uitgevoerd met de SWAN productieversie 30.62. De rekenresultaten zijn vervolgens gecorrigeerd aan de hand van hindcaststudies van de metingen in de Westerschelde (zie paragraaf 6.3.7).

Oosterscheldekering

De oude database met gegevens voor de Zeeuwse wateren bevatte geen uitvoer voor de schuiven in Oosterscheldekering. Aangezien het hier een belangrijk, maar zeer beperkt toepassingsgebied betreft is een toegesneden omvang van de transformatiematrix gemaakt. Er zijn 24 berekeningen uitgevoerd, geconcentreerd op de belangrijke windrichtingen en windsnelheden voor de Oosterscheldekering.

Bij deze berekeningen is een recente bodemligging van het buitengebied toegepast. Zoeken naar een gemiddelde bodemligging, zoals voor de Hollandse kust, is hier niet nodig omdat het hier geen waterkering betreft waarbij de golfaanval volledig wordt bepaald door de locale vooroever.

De golfberekeningen zijn uitgevoerd met de SWAN productieversie 40.41AB (WL, 2006). De rekenresultaten zijn vervolgens gecorrigeerd aan de hand van hindcaststudies van de metingen bij Petten

Elk van de drie series berekeningen wordt vastgelegd met het beschrijven van de onderdelen:

- rekenrooster en bodem;
- aanpak voor wind, stroming, en waterstandsvelden;
- uitvoerpunten, obstakels, fysische en numerieke instellingen;
- definitie van de transformatiematrix: aantal windsnelheden en -richtingen en waterstanden;
- golfrandvoorwaarden op diep water.

Deze worden achtereenvolgens in de volgende paragrafen beschreven. Eerst geeft paragraaf 6.3.2 een korte beschrijving van het numerieke model SWAN. Paragraaf 6.3.3 beschrijft het gebruikte rekenrooster en de bodem. Paragraaf 6.3.4 beschrijft de globaal de aanpak van de wind, waterstands en stromingsvelden, de uitvoerpunten en instellingen. Paragraaf 6.3.5 geeft de definitie van de transformatiematrix. Paragraaf 6.3.6 beschrijft de golfrandvoorwaarden op diep water. Paragraaf 6.3.7 beschrijft de correcties die toegepast worden op de berekende golfparameters door vergelijking met metingen. Paragraaf 6.3.8, ten slotte, beschrijft de database KUSTDB2006 waar de rekenresultaten van SWAN in zijn opgeslagen.

Details van de aansturing zijn beschreven in (RIKZ, 2006b).

6.3.2. Het golfmodel SWAN

Inleiding

SWAN (acroniem voor Simulating WAVes Nearshore) is een wereldwijd geaccepteerd stochastisch golfmodel voor het verkrijgen van realistische schattingen van golfparameters in kustgebieden, op meren en in estuaria voor gegeven wind-, bodem- en stromingscondities. Vanwege de state-of-the-art formuleringen op zowel numeriek als fysisch vlak en de validatie aan de hand van een uitgebreide verzameling cases wordt het in vele projecten en door vele gebruikers in binnen- en buitenland toegepast.

Het golfmodel is ontwikkeld door de Technische Universiteit Delft en staat uitgebreid beschreven in Booij et al. (1999) en in de gebruikershandleiding (SWAN user manual, 2004). Zijlema en Van der Westhuysen (2005) beschrijven de relevante numerieke details.

Het model is gebaseerd op de actie-balans vergelijking, of energie-balans vergelijking bij het ontbreken van stroming, met bron- en puttermen. SWAN is een derde-generatie golfmodel met eerste-,

tweede- en derde-generatie opties. Definities van eerste, tweede en derde generatie golfmodellen zijn gegeven in o.a. Young (1999). Het verschil tussen deze 3 generaties van modellen zit in de beschrijving van mechanismen van golfgeneratie en -dissipatie. In eerste en tweede generatie modellen worden deze mechanismen hetzij empirisch, hetzij parametrisch gemodelleerd. Derde generatie modellen als SWAN brengen deze mechanismen middels brontermen expliciet in rekening.

De golfprocessen in SWAN

In SWAN worden processen als golfvoortplanting in ruimte en tijd, generatie (opwekking) en dissipatie (afname) van golfenergie weergegeven. De golfvoortplantingsprocessen in SWAN zijn:

- lineaire voortplanting in geografische ruimte;
- refractie als gevolg van ruimtelijke variaties in bodem en stromingsveld;
- shoaling als gevolg van ruimtelijke variaties in bodem en stromingsveld;
- blocking en reflectie op tegenstroming; en
- transmissie door en (partiële) reflectie tegen obstakels.

Met de meest recente versie (40.41AB) is het ook mogelijk diffractie te modelleren. Echter, de berekening van diffractie voor een willekeurige geometrie is gecompliceerd en kost veel rekentijd.

Met behulp van bron- en puttermen worden de volgende golfgeneratie en dissipatie processen gemodelleerd in SWAN:

- generatie door wind;
- dissipatie door whitecapping (breken van golven op steilheid);
- dissipatie door diepte-geïnduceerd breken; en
- dissipatie door bodemwrijving.

Niet-lineaire wisselwerking tussen golfcomponenten wordt eveneens gemodelleerd met behulp van brontermen. De fysische betekenis van de interacties is dat resonante groepen van golfcomponenten energie uitwisselen, waardoor energie over het golfspectrum (zie paragraaf 4.5.1 voor een toelichting op het begrip “spectrum”) wordt herverdeeld. In relatief diep water is de zogenaamde vier-golf wisselwerking (quadruplet golf-golf interactie) belangrijk. Deze wisselwerkingen zorgen er o.a. voor dat golven langer worden wanneer jonge zeegang zich als gevolg van toenemende wind ontwikkelt. Deze bronterm verschuift de golfenergie in het algemeen naar lagere frequenties. In ondiep water zijn de zogenaamde drie-golf wisselwerkingen (triad golf-golf interacties) belangrijk. Deze wisselwerkingen resulteren in sub- en superharmonische golfcomponenten. Deze bronterm verschuift de golfenergie in het algemeen naar hogere frequenties. Dit heeft weer effect op de processen als generatie en dissipatie van golfenergie.

SWAN-berekeningen worden standaard uitgevoerd met de aanname van stationaire toestand, maar kan ook voor niet-stationaire toestand doorgerekend worden. Stationair betekent dat er geen verandering in

de tijd plaatsvindt en geldt dus alleen in situaties waarbij de tijd die een golf nodig heeft om het rekendomein te doorlopen klein is ten opzichte van de tijdschaal van de geofysische condities (veranderingen in golfrandvoorwaarden, wind, getij, stormopzet). De aanname van een stationaire toestand geldt niet aan het begin of einde van een storm, maar kan wel worden toegepast op het hoogtepunt, waar de tijdsvariaties van wind en golfrandvoorwaarden klein zijn.

SWAN-berekeningen kunnen op een kromlijinig numeriek rekenrooster worden uitgevoerd.

Calibratie

Voor het SWAN-model bestaan standaardinstellingen voor diverse parameters in de formuleringen van brontermen. In de brontermen voor wind, whitecapping en vier-golf wisselwerking (quadruplets) zijn waarden voor de parameters bepaald aan de hand van diep-water golfgroeikrommen met zowel oneindige als beperkte strijklengte. Voor diepte-beperkte situaties is dit ook gedaan voor de brontermen die bodemwrijving, diepte-geïnduceerd breken en drie-golf wisselwerkingen modelleren. Hiervoor zijn ook gecontroleerde laboratoriumexperimenten beschouwd. De SWAN user manual (2004) geeft een overzicht van de standaardinstellingen.

Alkyon (2003; 2004a) heeft een uitgebreide calibratiestudie uitgevoerd op een voorloper van de vigerende SWAN-versie, te weten versie 40.20. Voor de calibratie is gebruik gemaakt van golfwaarnemingen tijdens de storm van 26 en 27 oktober 2002 in het kustgebied nabij Petten, in het Slotermeer en in de Westerschelde. De relevante parameters voor de calibratie zijn gekozen op basis van een gevoeligheidsstudie van SWAN 40.20 met betrekking tot numerieke en fysische instellingen voor genoemde drie veldstudies, aangevuld met een testsituatie in een golfgoot en een academische test voor de situatie van door strijklengtebeperkte golfgroei. De in deze studie bepaalde instellingen zijn geverifieerd aan verschillende veldmetingen in dezelfde storm. De gevoeligheidsanalyse geeft tevens aan dat de fysische instellingen voor whitecapping, vier-golf wisselwerkingen en diepte-geïnduceerd breken een significant effect hebben op de resultaten.

De studie van Alkyon (2004a) geeft ook een vergelijking van modeluitkomsten met metingen voor verschillende SWAN versies die laatste jaren zijn gebruikt. Voor de HR2006 is deze vergelijking herhaald door (Haskoning/WL, 2005). De verschillen tussen modelresultaten en metingen leiden tot zgn. correctiefactoren die verder worden toegelicht in paragraaf 6.3.7.

6.3.3. Rekenroosters en bodems

Hollandse kust

Het gehanteerde kromlijnige rekenrooster voor de Hollandse kust is een verfijnde versie van het zogenaamde “kuststrookmodel”. Het rooster bevat 1980 cellen kustlangs en 768 cellen kustdwars. In totaal zijn er 1.523.389 roosterpunten waarvan 872.645 niet-actieve (d.w.z.

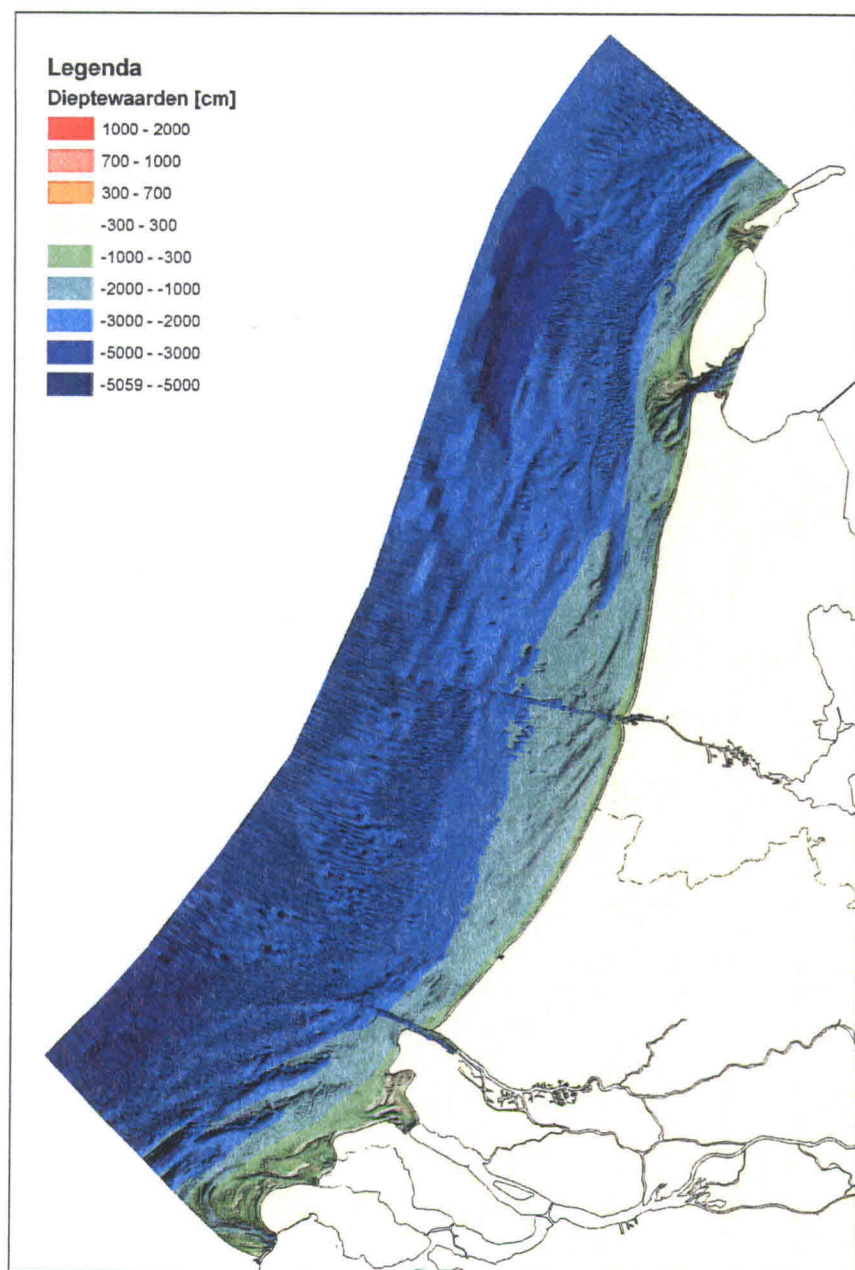
permanent droge) roosterpunten en 650.744 actieve roosterpunten. Voor de Zeeuwse kust en estuaria is het kromlijnige rekenrooster “kustzuid-fijn” gebruikt. Dit rooster bevat 840 cellen in Noord-Zuid richting en 1180 cellen in West-Oost richting. In totaal zijn er 993.221 roosterpunten waarvan 399.334 niet-actieve roosterpunten en 593.887 actieve roosterpunten.

Voor de Hollandse kust is de variatie in de bodemligging ten gevolge van (quasi-)cyclisch morfologisch gedrag zo groot dat de voorkeur is gegeven aan het gebruik van een “gemiddelde” bodemdiepte over een recente periode van 10 jaar (1994-2003).

De schematisatie van de bodem voor de Hollandse kust (ZUNO, 2003) is opgebouwd uit (RIKZ, 2006b):

- een schematisatie voor het diepere kustzone gebaseerd op vaklodingen uit 1999. Deze zone loopt ongeveer van de -2m à -4m NAP lijn door tot ongeveer -20m NAP.
- aanvullingen uit bodemgegevens van TNO-NITG/Hydrografische Dienst van -20m NAP tot de offshore rand van het rekenrooster.
- een schematisatie voor de ondiepe kustzone van de voetzeewering of duinvoet tot het zeewaartse eind van de kribvakken. Voor de zone zonder kribvakken is de lijn die het einde van de kribvakken verbindt kustlangs doorgetrokken tot de volgende kribvakken. Deze lijn loopt op ongeveer -2m à -4m NAP. In deze zone is een middeling uitgevoerd van de diepte over een periode van 10 jaar.

De deelschematisaties zijn samengevoegd tot één bodem met behulp van de zogenaamde applicatie “MARIA” (RIKZ, 2005b), resulterend in de bathymetry in Figuur 6.4.



Figuur 6.4 Toegepast bodemprofiel voor berekeningen Hollandse kust.

Zeeland

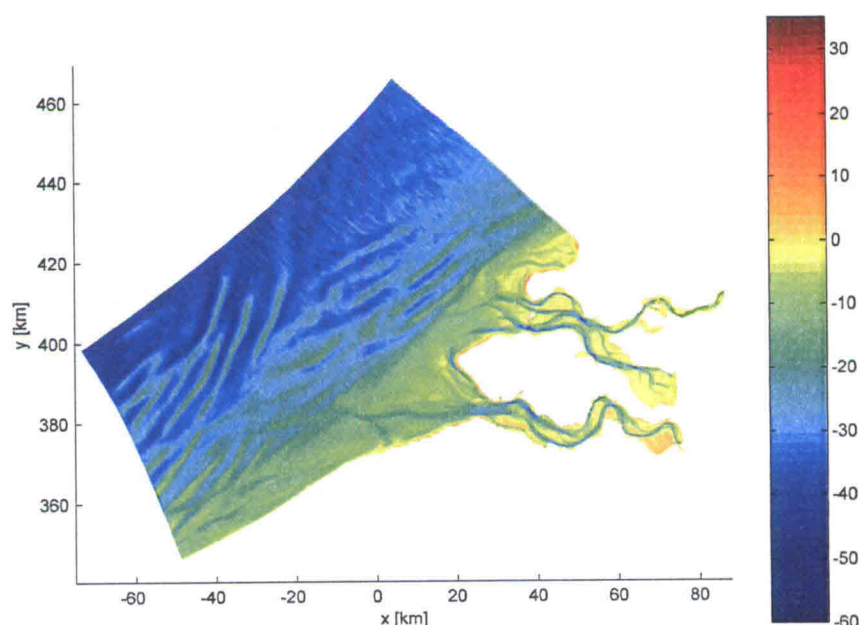
Voor Zeeland zijn oude berekeningen gebruikt, bedoeld voor het ontwerpen van Zeeweringen (Alkyon, 1997; 1998). Er zijn diverse ingrepen in de modelschematisatie toegepast om een golfbelasting op de waterkering te realiseren die zwaarder is dan in werkelijkheid verwacht mag worden. De bodemdpte is bijvoorbeeld ter plaatse van diverse schorgebieden kunstmatig met 0,5 m verdiept, en diverse platen zijn met 1 m verdiept. In de betreffende studie zijn er verschillende geneste rechthoekige rekenroosters gebruikt.

Oosterscheldekering

Voor de Oosterscheldekering is de bodem opgebouwd uit:

- de meest recente bodemligging voor het hele gebied verkregen uit vaklodingen, d.w.z. voor Oosterschelde een samenstelling uit 2000/2001 en 1997 (voor Mastgat en Zijpe), voor de Voordelta uit 2004 aangevuld met Jarkusraaien, voor de Westerschelde uit 2003 en voor het mondingsgebied een samenstelling van 2001, 2002 en 2003, aangevuld met Jarkusraaien.
- de gemiddelde bodemdiepte over de jaren 1999-2003 voor ondiepe vooroevers in zes gebieden in de Westerschelde en voor de ondiepe vooroever langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen, waar het bodemniveau groter is dan -5m NAP.

Ook hier is de applicatie MARIA toegepast om een samengestelde bodem te construeren (zie Figuur 6.5).



Figuur 6.5 Toegepast bodemprofiel voor berekeningen Zeeuwse wateren.

6.3.4. Overige uitgangspunten, uitvoerpunten en instellingen

Aanpak voor stroming, waterstand en wind

Er is vanuit gegaan dat het effect van stroming nihil is. In kustgebieden is deze voornamelijk kustlangs georiënteerd en heeft daarbij een gering effect op de golven. In de berekeningen is het effect van stroming niet meegenomen.

De waterstanden zijn ruimtelijk uniform verondersteld. In werkelijkheid zal dit niet het geval zijn. Bij de golfmeetlocaties op diepwater zal de waterstand lager zijn dan aan de kust, bij zware noordwesterstorm. In paragraaf 6.2 is al aangegeven op welke wijze ervoor wordt gezorgd dat de lokale waterstand nabij de waterkering in overeenstemming is met de lokale waterstandsstatistiek. Er is vanuit gegaan dat de lokale waterstand leidend is voor een realistische

schatting van de lokale golfcondities: de golfhoogte wordt vooral door de lokale diepte bepaald, en de golfperiode is in het toepassingsgebied niet zo afhankelijk van het feit dat de waterstand in werkelijkheid niet geheel ruimtelijk uniform is.

Voor iedere combinatie van windrichting en windsnelheid zijn ruimtelijk variërende windsnelheidsvelden geconstrueerd. Voor de Hollandse kust is dit gebeurd aan de hand van statistische gegevens in drie meetlocaties: Texel, YM6 (IJmuiden) en Hoek van Holland. De windsnelheid op land wordt eerst opgeschaald naar een windsnelheid op zee middels een '*open water factor*' volgens een methode beschreven door Verkaik et al. (Verkaik, 2002; Haskoning/WL, 2005). De windrichting is voor ieder windsnelheidsveld constant. Voor de windsnelheid is uitgegaan van volledige ruimtelijke afhankelijkheid, d.w.z. overal geldt dezelfde frequentie. De ruimtelijke variatie in de windsnelheid die zo ontstaat, geeft een significant verschil in windsnelheid tussen Noord en Zuid.

Voor de Zeeuwse kust is de oriëntatie voornamelijk Oost-West. In het buitengebied zijn daarvoor constante windsnelheden aangehouden. De waarden in het binnengebied; landwaarts van de Oosterscheldekering en de lijn Vlissingen-Breskens, zijn als gevolg van land-zee overgangen 1m/s lager genomen. De windrichtingen zijn over het hele gebied constant. Deze aanpak komt overeen met de aanpak van Alkyon (1997, 1998) voor berekeningen in de Westerschelde en Oosterschelde.

Uitvoerlocaties van SWAN

Voor de Hollandse Kust zijn uitvoerlocaties gedefinieerd op ca. 100 m afstand (loodrecht) van een referentielijn²⁰. Deze referentielijn betreft de kruin in geval van harde keringen. De uitvoerpunten zijn zodanig gekozen dat ze niet op een te steile helling liggen en dat er minimaal twee natte cellen landwaarts van het uitvoerpunt liggen. Na afloop van alle berekeningen is geconstateerd dat voor de harde keringen enkele locaties droogvielen voor maatgevende condities (met een waterstand van minimaal 4m). Het is echter niet zo dat er daardoor uitvoerinformatie mist voor een heel dijkvak. Het gaat om slechts een aantal, veelal geïsoleerde droge uitvoerpunten.

Verder zijn loodrecht op de kust raaien gedefinieerd met een onderlinge afstand van ca. 250 m. Langs deze raaien zijn raaipunten gedefinieerd tot ongeveer de -20m+NAP lijn. Ook voor deze locaties genereert SWAN uitvoer. Bovendien wordt langs de contouren van -20m+NAP, -10m+NAP en -5m+NAP, rond de havendammen van Europoort, Scheveningen en IJmuiden, bij bijzondere constructies (Haringvlietdam, uitwateringssluys Katwijk) en op bestaande meetlocaties (o.a. EUR, ELD, YM6) uitvoer gegenereerd.

Voor Zeeland is de definitie van uitvoerpunten door (Alkyon, 1998) aangehouden betreffende uitvoerlocaties in de estuaria. De

²⁰ Aangenomen is dat de golfparameters in de laatste 100m naar de teen van de dijk niet meer veranderen. Bovendien gegenereert het model in dit gebied geen betrouwbare uitvoer waardoor deze aanname gebruikt diende te worden.

uitvoerpunten liggen ongeveer 50m uit de teenlijn. Als deze niet bestaat is gekeken naar de kruinlijn. Indien dit snijpunt op land blijkt te liggen, is het snijpunt 50m van de land/water grens gekozen. Dit geldt ook voor de uitvoerpunten voor de verbindende waterkeringen Brouwersdam, Oosterschelde en Veerse Gatdam.

Fysische en numerieke instellingen

De volgende golfprocessen zijn meegenomen in de SWAN-berekeningen ten behoeve van HR2006, met bijbehorende formuleringen:

- Windgedreven golfgeneratie, dissipatie door whitecapping en niet-lineaire wisselwerking door quadruplets volgens derde generatie instellingen volgens (Komen et al., 1984)
- dieptegeïnduceerde breking volgens de instelling van (Battjes-Janssen, 1978);
- bodemwrijving volgens JONSWAP formulering (Hasselmann et al., 1973). Voor de bodemwrijvingscoëfficiënt is de aanbevolen waarde uit de handleiding van SWAN gevolgd: voor piekperioden groter dan 10 seconden is een waarde van $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ aangehouden en voor piekperioden kleiner dan 10 seconden een waarde van $0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ (Holthuijsen et al., 2004). Toepassing van de standaard waarde van $0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ voor langere perioden zou leiden tot een onderschatting van de golfhoogte;
- Triad golf-golf wisselwerking is meegenomen volgens de LTA formulering.

Voor de berekeningen voor de Hollandse kust in het kader van HR2006 is enigszins afgeweken van de default instellingen van de fysische parameters (Haskoning & WL, 2005).

Ten eerste is de suggestie van Rogers et al. (2002) overgenomen door meer gewicht toe te kennen aan het relatieve golfgetal in de whitecapping formulering. Door deze aanpassing wordt de waarde van de $T_{m-1,0}$ veel realistischer doordat een sterkere dissipatie van hoogfrequente energie plaats vindt, wat leidt tot hogere golfperiodes meer in overeenstemming met metingen.

Daarnaast is er voor gekozen om het effect van drie-golf wisselwerkingen (*triad wave-wave interactions*) niet mee te nemen door de betreffende bronterm te deactiveren. De reden hiervoor is dat diverse onderzoeken laten zien dat de LTA formulering zoals deze in SWAN drie-golf wisselwerkingen modelleert tot onderschattingen leidt van de golfperiode in de ondiepe kustzones.

Tenslotte is het convergentie criterium aangepast. SWAN rekent iteratief naar een oplossing toe. Zoals o.a. in Zijlema en Van der Westhuijsen (2005) is aangetoond, is het standaard convergentie criterium in SWAN niet altijd toereikend. Het standaard criterium is het zogenaamde 2%-criterium. Dit houdt in dat in minder dan 2% van de (natte) roosterpunten is voldaan aan de eis dat de relatieve verandering in zowel de significante golfhoogte als de golfperiode T_{m01} van de ene naar de volgende iteratie kleiner is dan 2%. Alkyon (2003) heeft voorgesteld het 1%-criterium te hanteren. Dit is overgenomen in de berekeningen voor de Hollandse kust (Haskoning

& WL, 2005) en voor Zeeland (WL, 2006). Het betreffende versienummer is SWAN 40.41.

De berekeningen voor Zeeland uit (Alkyon, 1997, 1998) zijn gebaseerd op een oudere versie van SWAN (30.62). Hierbij zijn wel de standaard instellingen gebruikt.

6.3.5. Definitie van de transformatiematrix

De afmetingen van de transformatiematrices bepalen welke berekeningen er uitgevoerd worden. Deze aantallen verschillen per gebied en worden hieronder dus ook apart benoemd.

Hollandse kust

Haskoning & WL (2005) hebben voor in totaal $6 \times 7 \times 6 = 252$ combinaties van windsnelheid, windrichting en waterstand (zie Tabel 6.3) golfcondities op offshore meetlocaties met SWAN versie 40.41AB vertaald naar uitvoerpunten langs de *Hollandse kust*. De windsnelheden variëren langs de kust (zie paragraaf 6.3.4). Ze zijn in de Tabel 6.3 opgenomen voor het station ELD. Daarmee liggen de windvelden vast. Deze 252 berekeningen zijn uitgevoerd voor 2 waarden van de golfperiode. In totaal zijn zo 504 berekeningen uitgevoerd. De waarden van de golfperiode en golfhoogte zijn niet opgenomen in deze tabel omdat ze afhankelijk zijn van de andere condities. In het vervolg van deze paragraaf is beschreven hoe deze waarden zijn bepaald.

Zeeland

Voor de *estuaria van Wester- en Oosterschelde en voor de Zeeuwse Noordzeekust* zijn oude berekeningen hergebruikt van Alkyon (1997, 1998). Voor deze gebieden zijn 7 windsnelheden, 14 windrichtingen en 3 waterstanden gebruikt. Voor de Oosterschelde is er een extra waterstand rond het sluitpeil toegevoegd. Niet alle combinaties zijn doorgerekend: voor de Westerschelde bevat de database 216 sommen, voor de Oosterschelde 288 sommen. De golfcondities offshore zijn bepaald op basis van volledige correlatie met de windsnelheden.

Oosterschelddekering

WL (2006) heeft voor 24 condities eveneens SWAN-berekeningen uitgevoerd voor de *Oosterschelddekering*. In tegenstelling tot de combinaties voor de Hollandse kust betreft dit alleen extreme condities omdat de middelen ontbraken om de algemene aanpak volledig uit te werken. Er is gekozen voor het opstellen van een matrix met golfberekeningen voor vier windrichtingen en 2 windsnelheden rond de 25 m/s en 35 m/s. Dit leidt tot 8 combinaties die staan vermeld in Tabel 6.4. Tezamen met de drie beschouwde waterstanden van 2, 4 en 6 m+NAP levert dit $8 \times 3 = 24$ condities op. De waarden van de golfperiode en golfhoogte zijn niet opgenomen in deze tabel omdat ze afhankelijk zijn van de andere condities. In het vervolg van deze paragraaf is beschreven hoe deze waarden zijn bepaald.

Tabel 6.3 Invoerwaarden van de windrichting, windsnelheid en waterstand voor SWAN berekeningen voor de Hollandse kust

Windsnelheid (m/s)	Windrichting t.o.v. Noorden (°)	Waterstand (m+NAP)
15	0	1
20	30	2
25	210	3
30	240	4
35	270	5
40	300	6
	330	

Tabel 6.4 Combinaties van windrichting en windsnelheid voor de SWAN berekeningen voor de Oosterscheldekering

windrichting [°N]	windsnelheid (1/4000jr) [m/s]	windsnelheid (1/10000jr) [m/s]
180	24	29
240	32	37
270	34	39
315	29	34

Bepaling golfperiode en golfhoogte in de offshore meetlocaties

Voor de Hollandse kust en de Oosterscheldekering is zorgvuldig nagegaan welke golfcondities behoren bij de gegeven waterstanden, windsnelheden, en -richtingen.

Hoge windsnelheden kunnen optreden bij zeer hoge waterstanden tijdens storm, maar net zo goed met lagere waterstanden. Het is mogelijk dat de hoogste windsnelheid samenvalt met laagtij. Toch kunnen er dan hoge golfperiodes en golfhoogten optreden, omdat de offshore randvoorwaarden op diep water worden gegeven. Er is daarom gekozen voor een koppeling van de golfperiode aan de windsnelheid en –richting. Er is dus geen koppeling met de waterstand gelegd. Elke berekening met een hoge windsnelheid gaat dus gepaard met hoge golfperiodes en golfhoogten op de diepwaterrand van het SWAN model, ongeacht de waterstand.

Voor de Hollandse kust (waar de golfperiode stochastisch wordt meegenomen) maakt de precieze keuze van de golfperiodes waarvoor SWAN berekeningen worden uitgevoerd niet uit. Er dienen bij gelijkblijvende andere grootheden 2 waarden te worden doorgerekend op een relevant niveau.

Voor de Oosterscheldekering ligt dat anders. Daar is de golfperiode deterministisch gekoppeld aan de wind, en moet de op te leggen golfhoogte en golfperiode daar dus bij aansluiten. Bij hogere windsnelheden horen hogere golfhoogten en golfperiodes. Bij volledige afhankelijkheid zou de relatie eenduidig zijn: de frequentie van de windsnelheid is dan gelijk aan die van de golfparameters. Omdat wind en golven ook niet volledig afhankelijk zijn moet er een combinatie van golfhoogte en golfperiode worden afgeleid met de grootste kans van optreden bij gegeven windsnelheid en –richting. De gezochte golfparameters worden bepaald met de rekenmodule

“diepwaterrandvoorwaarden”, die onderdeel uitmaakt van HYDRA-K. In het volgende wordt de procedure globaal toegelicht. Details zijn beschreven in (HKV, 2005b).

Het afleiden van de diepwaterrandvoorwaarden voor golfperiode en golfhoogte voor de harde waterkeringen vindt in twee stappen plaats:

1. Eerst wordt de *golfperiode* ($T_{m-1,0}$) bepaald die de grootste kans van optreden heeft, gegeven de windsnelheid en windrichting. Voor de Hollandse Kust worden er twee waarden (het meest waarschijnlijke en de meest waarschijnlijke minus 10%) bepaald omdat de golfperiode daar probabilistisch wordt afgehandeld.
2. Vervolgens wordt een deterministische relatie gelegd tussen de golfperiode uit stap 1 en de daarmee corresponderende significante golfhoogte (H_s) en piekperiode (T_p).

Stap 1: Bepaling golfperiode passend bij de wind

Bij de windsnelheden ter plaatse van de golfmeetlocaties is bij elke windrichting op basis van bestanden met simultane waarnemingen (paragraaf 4.7) de golfperiode, $T_{m-1,0}$, met de grootste kans van optreden afgeleid. Hiervoor is een module in HYDRA-K gebruikt. Per windrichtingssector worden tot maximaal 50 simultane waarnemingen (met maar 1 waarneming per stormgebeurtenis) geselecteerd, en wordt een schatting van de spreiding van de golfperiode gemaakt. Op basis van het gemiddelde en de spreiding wordt een relatie gelegd tussen de windsnelheid en de golfperiode. Deze relatie wordt geacht ook geldig te zijn buiten het bereik van de metingen, d.w.z. voor extreem hoge windsnelheden. Zie voor details (HKV, 2005b). Het resultaat verschilt niet veel van dat bij volledige afhankelijkheid tussen windsnelheid en golfperioden.

Voor met name oostelijke windrichtingen zijn er soms weinig of geen waarnemingen waardoor er geen goede schatting van de spreiding gemaakt kan worden. In dat geval wordt de windsnelheid en de golfperiode aan elkaar gekoppeld middels de marginale verdelingen onder de aanname van volledige correlatie van de parameters. Bijvoorbeeld, als voor windrichtingssector 90° een windsnelheid van 20 m/s een overschrijdingsfrequentie heeft van 1/100 per jaar, dan wordt deze windsnelheid gekoppeld aan de golfperiode die bij dezelfde windrichting eveneens een overschrijdingsfrequentie heeft van 1/100 per jaar.

Stap 2: Relatie golfperiode met de piekperiode en golfhoogte

Vervolgens wordt er bij elke uit stap 1 gevonden waarde voor de golfperiode een golfhoogte gezocht. Voor de relatie tussen golfperiode en golfhoogte wordt hierbij uitgegaan van volledige afhankelijkheid. Dat betekent dat de golfperiode met een marginale overschrijdingsfrequentie van, bijvoorbeeld, 1/100 per jaar wordt gekoppeld aan de golfhoogte en piekperiode met dezelfde overschrijdingsfrequentie van 1/100 per jaar. Ten behoeve van deze

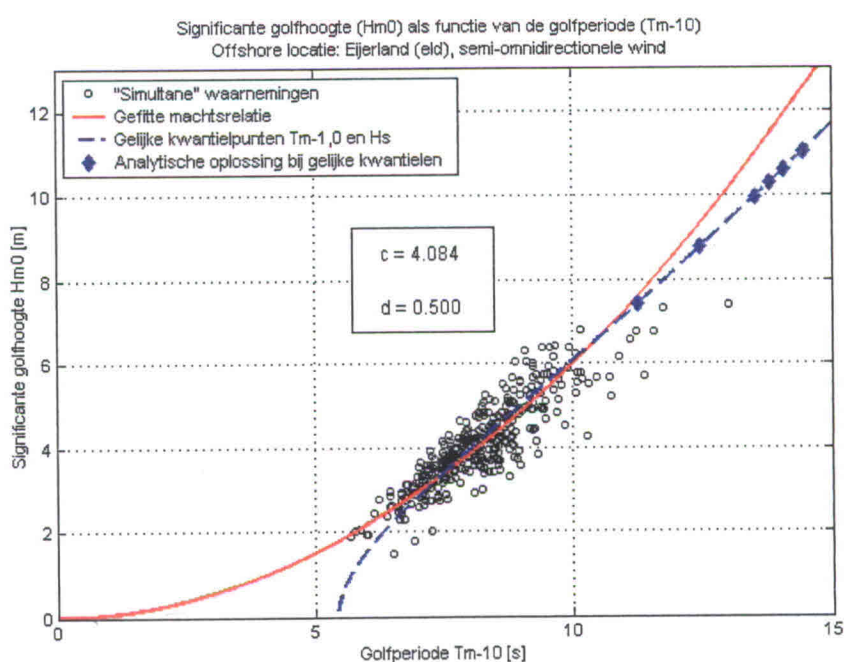
optie is een analytische relatie afgeleid op basis van de Weibull-verdeling van de betreffende grootheden (HKV, 2005b, bijlage A).

Voor zeer lage waarden van de golfperiode wordt met die relatie geen realistische waarde gevonden voor de golfhoogte. Dat gebied is ook niet van belang, maar voor de volledigheid is in dat gebied uitgegaan van gelijkblijvende golfsteilheid. Op basis van de maxima van golfhoogte en golfperiode gedurende de gemeten stormen is een puntenwolk in Figuur 6.6 gegeven. Middels regressie-analyse is de resterende vrijheidsgraad (c resp. e) bepaald, waarbij de volgende formules zijn gehanteerd:

$$H_s = \left(\frac{T_{m-1,0}}{c} \right)^{1/d} \quad \text{en} \quad T_p = e \cdot T_{m-1,0} \quad (6.1)$$

met voor d een waarde van 0,5 om aan gelijkblijvende golfsteilheid te voldoen.

In Figuur 6.6 zijn, als voorbeeld voor de locatie ELD, de puntenwolk en allebei de benaderingen gegeven. De relatie voor volledige afhankelijkheid wordt toegepast vanaf het snijpunt bij de laagste golfhoogte van beide lijnen. Overigens is het verschil tussen beide benaderingen niet groot.



Figuur 6.6 Afgeleide relaties tussen golfhoogte en golfperiode bij locatie ELD, op basis van regressie (machtsrelatie 4.5) en de analytische relatie op basis van gelijke overschrijdingsfrequenties (bron: HKV, 2005b).

Toepassing

Voor elke berekening met het golfmodel SWAN die in het kader van de HR2006 zijn uitgevoerd zijn op basis van de bovenstaande relaties de spectrale golfperiode, $T_{m-1,0}$, de piekperiode, T_p en de significante golfhoogte, H_s , bepaald uit de windrichting en windsnelheid. Deze waarden gelden ter plaatse van de golfmeetlocaties op diep water.

Bijlage A bevat voor 5 meetlocaties (ELD, EUR, YM6, SCW en SON) twee tabellen met resulterende diepwaterrandvoorwaarden.

6.3.6. Golfrandvoorwaarden op de modelrand

De modelrand van SWAN ligt soms ver van de offshore golfmeetlocaties. Op deze golfmeetlocaties worden uit de statistiek na opschaling volgens de methode de Haan de golfparameters gekozen. Er moet daarna nog een vertaling gemaakt worden van de waarden van de diverse invoerparameters in de transformatiematrix naar de waarden die langs de modelrand worden opgelegd.

Ook voor de werkwijze bij het bepalen van de golfrandvoorwaarden op de modelrand moet onderscheid gemaakt worden tussen de beschouwde gebieden. Voor de berekeningen voor Zeeland is de werkwijze eenvoudig geweest: de gewenste golfparameters uit de transformatiematrix zijn direct (dus zonder vertaling) op de modelrand aangeboden (Alkyon, 1997, 1998). Hier wordt daarom alleen ingegaan op de werkwijze voor de andere 2 gebieden: de Hollandse kust en de Oosterscheldekering. Voor beide is de werkwijze identiek geweest.

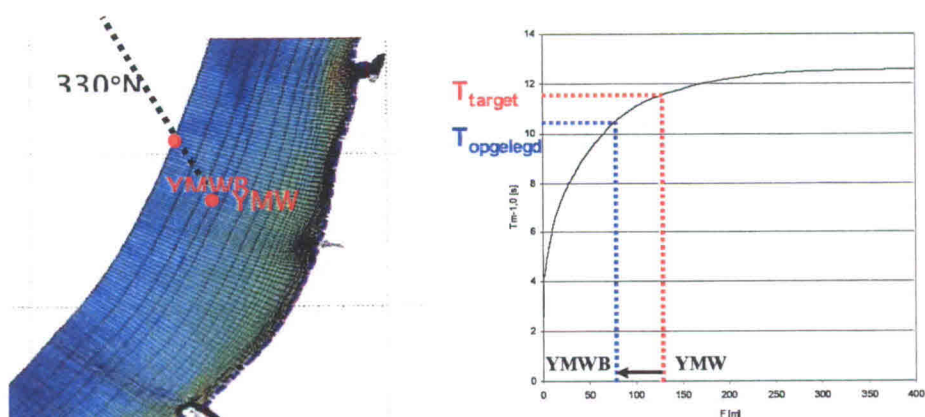
Hollandse kust en Oosterscheldekering

De golfmeetlocaties, dus de offshore locaties vanwaar de golfgegevens naar de kust moeten worden vertaald, liggen in het modelgebied. Op deze locaties moeten de in paragraaf 6.3.5 gegeven condities worden opgelegd. Het model moet echter worden aangestuurd met condities op de modelrand. Er is daarom een methode afgeleid om golfrandvoorwaarden te bepalen voor de offshore rand en de zijranden, die resulteert in minimale randeffecten en minimale verschillen tussen met SWAN berekende golfparameters in de offshore locaties en de gewenste golfparameters volgens de tabellen in bijlage A.

De methode is ontwikkeld op basis van golfgroeikrommen (Groeneweg & Van Vledder, 2005) en is generiek toepasbaar. Onder randeffecten wordt verstaan de sterke variatie van het spectrum over een korte afstand vanaf de rand van het rekendomein. Deze effecten zouden optreden wanneer het op de rand opgelegde spectrum sterk verschilt van het (evenwichts)spectrum dat SWAN nabij de rand genereert.

De methode voor het afleiden van de randvoorwaarden is gebaseerd op academische studies van golfgroeikrommen. Over een voldoende lang traject, zeg 1000 km, zijn ééndimensionale SWAN berekeningen uitgevoerd over een horizontale bodem voor gegeven windsnelheid en waterdiepte. Op basis van de Tabellen in Bijlage A is de gewenste waarde van de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ in het meetstation

bekend. Uit de met SWAN berekende golfgroei-kromme wordt de strijklengte bepaald die nodig is om de gewenste waarde van voor $T_{m-1,0}$ in het meetstation te bereiken. De afstand tussen de meetlocatie en het corresponderende randpunt wordt vervolgens afgetrokken van deze strijklengte. Het tweedimensionale spectrum behorend bij de resulterende strijklengte wordt opgelegd als randvoorwaarde in het randpunt. Figuur 6.6 geeft de methode schematisch weer voor een windrichting van 330°N . In deze figuur staan de meetlocatie YMW en bijbehorend randpunt YMWB afgebeeld. De golfgroei op de modelrand is overigens nagenoeg 'nul' zodat de periodemaat landwaarts in de SWAN 2D-berekening nauwelijks meer toeneemt.



Figuur 6.6 Schematische weergave van golfgroei-kromme aanpak ter bepaling van golfrandvoorwaarden.

Met deze aanpak kan ofwel de significante golfhoogte ofwel een golfperiodemaat correct worden bepaald op de offshore meetlocatie. Het bleek echter in de regel niet mogelijk om beide op alle locaties voldoende nauwkeurig te krijgen. Voor de kust zijn golven diepte-gelimiteerd op de locaties waar hydraulische randvoorwaarden moeten worden afgeleid, als gevolg van diepte-geïnduceerd breken. Dit betekent dat de golfhoogte aan de kust significant lager is dan offshore, en nauwelijks meer afhangt van de variatie offshore. De variatie in golfperiode is veel minder groot, maar die is wél van directe invloed op de periode vlak voor de waterkering. Om deze reden is ervoor gekozen om de gemiddelde periode $T_{m-1,0}$ als doelvariabele te beschouwen in de methode voor het bepalen van de randvoorwaarden, en niet de significante golfhoogte. Ook had deze periodemaat de voorkeur boven de andere beschikbare periodematen.

Berekeningen hebben aangetoond dat de methode goede resultaten (afwijking in $T_{m-1,0} < 5\%$) geeft voor windrichtingen behorend bij maatgevende condities. Voor extreme windsnelheden (35 m/s en hoger) was SWAN niet in staat om de corresponderende golfperioden conform de gewenste waarden te reproduceren. Om die reden is in de 1-D SWAN aanpak de diepere Noordzeebodem voor enkele gevallen

verdiept om de randcondities conform de gewenste waarden af te leiden.

Een uitgebreide beschrijving van deze methode is gegeven in Haskoning/WL (2005).

6.3.7. Correcties resultaten op basis van hindcast berekeningen

Inleiding

Een numeriek model is een schematisatie van de werkelijkheid, en er is daarmee sprake van onnauwkeurigheden. Daarom is het resultaat van berekeningen met SWAN ook niet voor elke situatie volledig in overeenstemming met metingen. Zo is bekend dat met de huidige 3^e generatie-mode in combinatie met surfbreking, triad wave-wave interactions en bodemwrijving, zoals toegepast in SWAN, de golfperiodematen $T_{m-1,0}$ en T_p structureel onderschat worden (Rogers et al., 2002, Van der Westhuysen et al., 2006). Daarom worden correcties toegepast op de met SWAN berekende golfperioden voor locaties langs de Hollandse kust en langs de keringen in de Zeeuwse wateren. Deze correcties zijn gebaseerd op vergelijkingen tussen simulaties en metingen (hindcasts).

Een eerder toegepaste correctie op de golfperiode zoals die met SWAN 30.62 werd verkregen door Alkyon (1997, 1998) was om 1 seconde toe te voegen aan de berekende piekgolfperiode T_p in de Oosterschelde (Kamsteeg et al., 2001). De geconstateerde onderschatting van ongeveer 10% van T_p is eerder waargenomen in uitgevoerde golfberekeningen in de Westerschelde, zoals gerapporteerd in Kamsteeg et al. (1998). Hoewel de absolute periode-correctie van 1 seconde karakteristiek is voor een aantal locaties in estuaria, geldt dit niet voor de gesloten Nederlandse kust. De achterliggende reden is dat daar andere fysische processen, zoals breken en niet-lineaire wisselwerkingen, een rol spelen dan in een estuarium met bijvoorbeeld doordringing van deining. Sinds een aantal jaren is het gebruikelijk de golfperiode-maat $T_{m-1,0}$ te gebruiken voor het beoordelen van de hoogte van dijken. Op basis van een eerste verkenning werd voor de CRASH-actie in 2003 voor de Hollandse Kust een correctiefactor van 1.2 toegepast, d.w.z. de door SWAN 30.62 berekende $T_{m-1,0}$ dient met 20% vermeerderd te worden (RIKZ, 2003).

Recentelijk hebben Alkyon (2005a) en WL (2005b) op basis van hindcaststudies correctiewaarden afgeleid voor resultaten verkregen met versie 40.41 voor Petten respectievelijk de Oosterschelde en Westerschelde. Het verschil in deze versie met eerdere instellingen is met name de keuze van een andere whitecapping formulering (Rogers et al, 2002), en het deactiveren van triad wave-wave interactions in het model (zie ook paragraaf 5.3.5). De correctiefactoren van deze laatste SWAN-berekeningen voor HR2006 worden hieronder besproken.

Hollandse kust

Alkyon (2005a) heeft SWAN versie 40.41 gebruikt om een hindcast uit te voeren voor 21 tijdstippen in 5 stormen, verdeeld over 1995 en 2002. Hierbij is op een kromlijinig rooster een groot deel van de gesloten Hollandse kust doorgerekend, waarbij de focus lag op Petten. Zijlema (2006) heeft geconstateerd dat de metingen van 1995 te onbetrouwbaar zijn om daarmee correctiefactoren af te leiden. Daarnaast kunnen gootmetingen ook niet direct worden gebruikt omdat de aansturing van deze berekeningen structureel anders is dan voor HR2006). Om deze reden heeft Zijlema (2006) de correctiefactoren die in HR2006 zullen worden toegepast afgeleid uit vergelijking tussen SWAN en veldmetingen bij Petten (feb/okt 2002). Uit deze vergelijking is gebleken dat er ongeveer 10% overschatting is geconstateerd van de berekende golfperiode $T_{m-1,0}$ bij de locaties op enkele honderden meters van de kruin van de dijk. Dit geldt ook voor de periodemaat T_{m02} die met ongeveer 35% wordt overschat (deze periodemaat wordt overigens niet of nauwelijks gebruikt bij de toetsing). Daarentegen worden de significante golfhoogte en de piekperiode T_{pm} door SWAN vrij goed berekend.

De correctie van de resultaten van de SWAN berekeningen voor de Hollandse Kust ten behoeve van HR2006 bestaat uit het naar beneden bijstellen van zowel $T_{m-1,0}$ als T_{m02} met respectievelijk 10% en 25% (deze laatste waarde is als maximum gesteld). De correctiefactoren welke in de database KustDB2006 voor de nieuwe SWAN berekeningen zullen worden gebruikt zijn dan respectievelijk 0.909 en 0.80.

Zeeland

Door Haskoning (2003) en RIKZ (2003) zijn hindcast studies uitgevoerd voor de Westerschelde. Hiervoor is SWAN versie 30.62 gebruikt en zijn dezelfde instellingen (betreffende triads en whitecapping) en modelaansturing toegepast als voor de berekeningen door Alkyon (1997) ten behoeve van de HR2001. Met deze instellingen is aangetoond dat deze versie van SWAN de golfperiode en, in enkele gebieden, ook de golfhoogte onderschat. De onderschattingen zijn toe te wijzen aan specifieke probleemgebieden en zijn niet uniform voor het gehele rekengebied.

WL (2005b) heeft correctiefuncties afgeleid uit de gemeten en berekende golfparameters H_{m0} , T_{pb} en $T_{m-1,0}$ voor de hindcast studie van Haskoning (2003). Voor deze correctiefuncties is de correctie afhankelijk van ruimtelijk variërende, schaalbare parameters. Deze functies zijn vervolgens toegepast op alle uitvoerlocaties in de Westerschelde en Oosterschelde en voor alle condities die in het kader van HR2001 zijn doorgerekend. Deze worden in HR2006 immers hergebruikt voor de estuaria en de verbindende waterkeringen in Zeeland.

In zowel de Oosterschelde als de Westerschelde zijn in het kader van HR2006 correctiewaarden bepaald die voor de extreme situaties leiden tot een verhoging van 5 tot 10 procent in de significante golfhoogte in vergelijking met de waarden in die in het kader van HR2001 zijn afgeleid. De gemiddelde golfperiode, $T_{m-1,0}$, wordt met 2 tot 6 procent

opgehoogd en de piekperiode, T_{pb} , met 5 tot 13 procent. De gecorrigeerde waarden zijn gebruikt voor het afleiden van de HR2006 voor de Westerschelde en de Oosterschelde.

Oosterscheldekering

Voor de Oosterscheldekering zijn de nieuwe rekenresultaten uit WL (2005d) gebruikt en zullen de correctiefactoren zoals afgeleid voor de Hollandse Kust worden toegepast.

6.3.8. Database KustDB2006

Inleiding

Om de vertaalslag van wind, waterstand en golfcondities op diep water naar golfcondities aan de teen van de kering te maken, gebruikt HYDRA-K een grote hoeveelheid rekenresultaten van het golfmodel SWAN. Deze resultaten staan opgeslagen in een database, genaamd KustDB2006. Deze database is de opvolger van RAND2001 dat in het kader van het Hydraulische Randvoorwaardenboek 2001 is geproduceerd. Rand2001 is voor hergebruik bij enkele toepassingen aan KustDB2006 toegevoegd. Behalve resultaten van SWAN bevat de nieuwe database ook de relevante gegevens van de keringen zoals het profiel, de oriëntatie, de locatie en gegevens omtrent de bekleding.

De belangrijkste taken van KustDB2006 zijn:

- gestructureerde opslag van de SWAN rekenresultaten, zowel SWAN uitvoerpunten, raaien en spectra;
- gestructureerde opslag van SWAN correctiefactoren;
- toepassen van SWAN correctiefactoren op de SWAN golfparameters;
- gestructureerde opslag van dijkgegevens, zoals geschematiseerd profiel, dijkorientatie etc.;
- uitvoeren van systematische controles van bijvoorbeeld de verhouding tussen waterdiepte en golfhoogte;
- uitvoeren van visuele inspecties van de SWAN resultaten;
- maken van MS Access bestanden, geschikt voor verwerking in HYDRA-K.

De laatste bullet geeft aan dat KustDB2006 *niet* direct gekoppeld is aan HYDRA-K. HYDRA-K maakt gebruik van uitsneden van KustDB2006, in de vorm van MS-Acces databases. Daartoe zijn in KustDB2006 twee exportmodules geïmplementeerd: één voor SWAN-resultaten en één voor gegevens van dijkprofielen.

Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van KustDB2006. Het beschrijft zowel de inhoud van de database als de tools die in KustDB2006 geïmplementeerd zijn. Voor de details verwijzen we de lezer naar (MX, 2004/2005a-c).

Controle van gegevens

Uit de vorige paragraaf blijkt al dat de KustDB2006 meer is dan alleen een opslagplaats voor meetgegevens en modelresultaten. Met name de

controle van deze gegevens is zeer belangrijk. Deze controles zijn/worden uitgevoerd met speciale controlescripts waarin taken beschreven staan die KustDB2006 uit moet voeren. Een aantal van deze scripts is standaard bijgeleverd, maar de gebruiker kan zelf ook scripts aanmaken. Na uitvoering van de controles worden de belangrijkste bevindingen opgeslagen.

Met name de fysische consistentie van modelgegevens komt uitgebreid aan bod in de controlescripts. In (WL, 2003) is een lijst opgesteld van relevante testen op fysische consistentie, die vervolgens middels scripts in de database zijn geïmplementeerd. Het betreft testen op:

- *De verhouding tussen de golfhoogte en de waterdiepte.* Deze kan niet te groot worden omdat golven dan zullen breken. De scripts bevatten een maximaal toegestane waarde die overigens gebiedsafhankelijk is.
- *Consistentie tussen de windsnelheid en de golfhoogte.* Een toename van de windsnelheid moet gepaard gaan met een toename van de golfhoogte.
- *Consistentie tussen de waterstand en de golfhoogte.* Een toename van de waterstand moet gepaard gaan met een toename van de golfhoogte.
- *De verhouding tussen de golfhoogte en de golflengte.* Deze kan niet te groot worden omdat golven dan zullen breken. De scripts bevatten een maximaal toegestane waarde die gebiedsafhankelijk is.
- *De verhouding tussen de golfperiode $T_{m0,2}$ en de piekperiode T_p .* Deze kan niet te groot worden. De scripts bevatten een maximaal toegestane waarde die overal gelijk is aan 0,93.
- *De verhouding tussen enerzijds de golfhoogte gedeeld door de waterdiepte en anderzijds de golfdissipatie D .* Deze mag niet te groot worden. De begrenzing is gebiedsafhankelijk.
- *Grote sprongen in de waarde van de golfhoogte voor naburige locaties.*
- *Droogvallende locaties.*

Op basis van deze controles is een beperkt aantal locaties op de “zwarte lijst” gezet. Dat wil zeggen dat de SWAN-resultaten van deze locaties als onbetrouwbaar worden gekenmerkt en niet gebruikt zullen worden voor het vaststellen van de nieuwe randvoorwaarden.

Deel III: Hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Waddenzee

7. Hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Waddenzee

7.1 Inleiding

De voorgaande hoofdstukken van dit rapport beschreven de methode waarmee ten behoeve van HR2006 met het rekenmodel HYDRA-K, de randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de Westerschelde, Oosterschelde en de Hollandse en Zeeuwse kust zijn berekend. De randvoorwaarden langs de Waddenzee zijn niet met HYDRA-K berekend. De reden voor deze keuze is dat er voor de Waddenzee momenteel nog onvoldoende metingen beschikbaar zijn om het golfmodel SWAN afdoende mee te kunnen ijken.

Voor harde waterkeringen langs de Waddenzee is daarom gekozen voor een alternatieve aanpak voor het bepalen van de golfrandvoorwaarden. In opdracht van RIKZ heeft Royal Haskoning in 2005 een inventarisatie gemaakt van de beschikbare randvoorwaarden van alle dijkvakken langs de Waddenzee (Haskoning 2005b,c). Een deel van deze randvoorwaarden is afkomstig uit het vorige randvoorwaardenboek, HR2001. De overige randvoorwaarden zijn afkomstig uit documenten van studies in het kader van dijkverbeteringen en golfonderzoeken uit de periode 1950 – 2004. In veel gevallen betreft het *ontwerprandvoorwaarden* die dus in het kader van HR2006 als *toetsrandvoorwaarden* beschouwd worden.

Indien er voor een locatie verschillende ontwerpwaarden zijn gevonden is telkens in overleg met de beheerders van de betreffende keringen bepaald welke ontwerpwaarden aangehouden moeten worden. In de meeste gevallen zijn de literatuurwaarden voor de waterstand hoger dan de toetspeilen in HR2001 aangezien zij waren gebaseerd op de basispeilen van de Deltacommissie die hoger waren dan de basispeilen 1985 (zie paragraaf 5.5.2; RIKZ, 1993b). Voor de toetspeilen in HR2006 geldt daarom veelal dat het toetspeil van de HR2001 slechts met een mogelijke klimaatcorrectie is vermeerderd. Voor waterstanden is dezelfde aanpak gekozen als voor de andere gebieden (zie paragraaf 4.5).

7.2 Inventarisatie van golfrandvoorwaarden en gevolg voor hydraulische randvoorwaarden

In totaal zijn 59 documenten geïnventariseerd van studies in het kader van dijkverbeteringen en golfonderzoeken (Haskoning, 2005b,c). Op basis van deze documentatie is een lijst opgesteld van de beschikbaarheid van de volgende ontwerpwaarden:

1. waterstand/toetspeil (h);
2. golfhoogte (H_s);

-
3. golfperiode/piekperiode (T_p);
 4. golfrichting (β); en
 5. 2%-golfoploop ($z_{2\%}$)

De inventarisatie van beschikbare ontwerpwaarden is per dijkkring gemaakt. Het betreft delen van de volgende dijkkringen:

- dijkkring 1: Schiermonnikoog
- dijkkring 2: Ameland
- dijkkring 3: Terschelling
- dijkkring 4: Vlieland
- dijkkring 5: Texel
- dijkkring 6: Groningen
- dijkkring 6: Friesland
- verbindende waterkering 1: de Afsluitdijk
- dijkkring 12 Wieringen
- dijkkring 13 Noord-Holland

Het vervolg van deze paragraaf bevat per dijkkring een overzicht van de belangrijkste bevindingen van de inventarisatie.

Dijkkring 1 Schiermonnikoog

Voor deze dijkkring was slechts één document beschikbaar, uit 1984. Het betreft een ontwerp van de (enige) Waddenzeedijk van Schiermonnikoog. De aanleiding van het maken van het ontwerp was dat de bestaande asfaltbekleding van de dijk niet meer voldeed aan de gestelde veiligheidseisen. De ontwerpwaterstand uit het bewuste document is 0,06 meter lager dan het toetspeil van HR2001. De toetspeilen uit HR2001 zijn voor HR2006 uiteindelijk alleen met 0,05m verhoogd voor klimaatverandering. De hydraulische randvoorwaarde voor golfhoogte is voor alle dijkvakken verhoogd ten aanzien van HR2001.

Dijkkring 2 Ameland

Voor Ameland zijn meerdere notities geïnventariseerd met als gevolg dat voor een aantal dijkvakken verschillende randvoorwaarden beschikbaar zijn. In samenspraak met het Wetterskip Fryslân is besloten om telkens de hoogste waarde voor de ontwerpwaterstand en de ontwerp golfhoogte te kiezen, omdat deze het best passen bij de huidige kruinhoogte van de waterkering. Het was niet mogelijk om een volledige vergelijking met HR2001 te maken omdat daarin de golfperiode en golfoploop voor deze dijkkring niet staan beschreven.

Dijkkring 3 Terschelling

Ook voor Terschelling zijn meerdere documenten geïnventariseerd en bleken er meerdere randvoorwaarden beschikbaar te zijn voor de verscheidene dijkvakken. In samenspraak met het Wetterskip Fryslân is besloten om 3 sets ontwerp randvoorwaarden op te nemen in het nieuwe Hydraulische Randvoorwaardenboek: twee sets voor het middenstuk van de Waddenzeekering en één set voor de beide uiteinden. Voor het middenstuk bevat de eerste set een relatief lage

waterstand en een relatief hoge golfbelasting, en de tweede set een omgekeerde combinatie.

Dijkkring 4 Vlieland

De ontwerpwaarde van de waterstand en de golfploop uit diverse documenten bleken beide hoger dan de corresponderende waarden in HR2001. Overigens staat in HR2001 geen waarde vermeld voor de golfhoogte, de golfperiode en de golfinvalshoek.

Dijkkring 5 Texel

Voor Texel waren meerdere documenten beschikbaar, op basis waarvan voor alle dijkvakken (23) ontwerpwaarden van de waterstand en de golfhoogte beschikbaar zijn. De golfinvalshoek is slechts voor enkele dijkvakken beschikbaar en de golfperiode en golfploop zelfs in het geheel niet. De ontwerpparameters voor de Waddenzeedijk van Texel zijn vrijwel allemaal hoger dan in HR2001. Alleen ter plaatse van de Eierlandsedijk en in het midden- en einddeel van de waterkering van de 30 polders is de ontwerp golfhoogte aanzienlijk lager in vergelijking met HR2001.

Dijkkring 6 Groningen

Voor Groningen zijn de randvoorwaarden voor de golfhoogtes in HR2001 ruimtelijk inconsistent met die van dijkkring 6 te Friesland. Oorzaak is dat voor Groningen (als enige gebied in de HR2001) de golfhoogtes niet waren afgeleid van ontwerpwaarden uit de literatuur. Daarom is voor HR2006 een hernieuwde literatuurinventariatie voor Groningen uitgevoerd (Haskoning 2005b,c). Alleen voor dijkvakken langs de noordkust van Groningen, tussen de Marnewaard en de Eemshaven zijn de ontwerpwaterstanden, ontwerp golfhoogtes, en ontwerp golfperiodes beschikbaar in de geïnventariseerde documenten. In het gebied rondom Delfzijl, tussen Hoogwatum en Termunterzijl, zijn ontwerpwaterstanden gevonden en ontwerpwaarden voor golfploop, maar niet voor de golfhoogte en golfperiode. Verder naar de Duitse grens is zelfs geen enkele nieuwe ontwerpwaarde gevonden. In deze dijkvakken (overigens samen slechts enkele km's) zijn golfhoogtes geschat door de fysische samenhang van het gebied in beschouwing te nemen en in te schatten met behulp van indicatieve SWAN berekeningen hoe het verloop dient te zijn. Voor Groningen zijn met name nieuwe randvoorwaarden voor de golfhoogte beschikbaar gekomen die in het algemeen hoger zijn dan in HR2001, en bovendien ruimtelijk consistent zijn met de golfhoogtes voor Friesland.

Dijkkring 6 Friesland

Voor de gehele Friese Waddenkust zijn waarden voor de golfhoogte en de waterstand gevonden in de literatuur. Uitzondering vormt het dijkvak 9.1 (9a) omdat het niet in HR2001 stond opgenomen. In overleg met Wetterskip Fryslân wordt dit dijkvak aan HR2006 toegevoegd. De golfhoogte, golfperiode en golfinvalshoek komen vrijwel overeen met HR2001. Opmerkelijk is de hydraulische randvoorwaarde voor golfhoogte bij Harlingen bijna een meter hoger is

dan in HR2001. De reden hiervoor is dat in HR2006 een locatie buiten de haven van Harlingen is gekozen.

Verbindende Waterkering 1: de Afsluitdijk

Voor de Afsluitdijk is een recent memo beschikbaar. Het memo beschrijft het afleiden van de nieuwe randvoorwaarden voor HR2006. De reden dat deze reeds beschikbaar zijn, is dat de normfrequentie van de Afsluitdijk in 2006 lager is dan in 2001 (1/10.000 per jaar in plaats van 1/1.430 per jaar) en dat toen de bijbehorende hydraulische randvoorwaarden zijn verstrekt. Het gevolg is dat alle randvoorwaarden langs de dijk stijgen ten opzichte van HR2001.

Dijkkring 12 Wieringen

Voor de dijkkring van Wieringen zijn ontwerpwaarden beschikbaar voor de waterstand en de golfhoogte, maar niet voor de golfperiode en golfinvalshoek. De ontwerpwaarden voor de waterstand op basis van de documenten zijn ruim 0.5m hoger dan het toetspeil die in HR2001 staat vermeld. De hydraulische randvoorwaarden oftewel de toetspeilen zijn daarentegen (net als in Friesland) afgezien van een kleine correctie voor zeespiegelstijging gehandhaafd. De gevonden ontwerpwaarden voor golfhoogte komen goed overeen met HR2001 wat betekent dat de hydraulische randvoorwaarden voor deze parameter vrijwel onveranderd zijn

Dijkkring 13 Noord-Holland (vakken 1-5)

Net als voor Wieringen geldt dat voor de dijkkring van Noord-Holland wel ontwerpwaarden van de waterstand en de golfhoogte beschikbaar zijn, maar niet voor de golfperiode en golfinvalshoek. De waterstand is telkens hoger dan in HR2001 maar dit leidt uiteindelijk niet tot aanpassingen van het toetspeil uitgezonderd klimaatcorrecties. Ook de golfhoogte is in de meeste gevallen onveranderd.

Totaaloverzicht

Tabel 7.1 geeft een overzicht van de beschikbaarheid van ontwerpwaarden langs de Waddenzee uit 59 bestudeerde documenten en de vergelijking met HR2001. Op enkele uitzonderingen na komen de ontwerpwaarden uit de diverse documenten niet lager uit dan de corresponderende waarden uit HR2001. De ontwerpwaarden voor waterstand, de golfperiode en de golfoploop vallen in de regel hoger uit in vergelijking met HR2001. Daarbij geldt overigens wel dat voor de golfperiode en golfoploop relatief weinig vergelijkingen gemaakt konden worden wegens gebrek aan gegevens. De golfhoogte en golfinvalshoek zijn doorgaans gelijk aan HR2001.

Ten aanzien van de beschikbaarheid in de diverse documenten is de waterstand (89% van alle dijkvakken) het best bekend, gevolgd door de golfhoogte (77%) De golfperiode is voor slechts 16% van de dijkvakken beschikbaar.

Tabel 7.1 *Overzicht van de beschikbaarheid van ontwerpwaarden langs de Waddenzee uit 59 bestudeerde documenten en de vergelijking met HR2001. Hogere ontwerpwaarden leiden overigens niet tot hogere randvoorwaarden in HR2006. De percentages zijn ten opzichte van het totaal aantal bekende dijkvakken (=100%).*

variabele	beschikbaarheid		resultaten notities vs. HR2001*		
	documenten	HR2001	hoger	gelijk	lager
Waterstand	89%	99%	95%	1%	3%
Golfhoogte	77%	98%	17%	79%	4%
Golfperiode	16%	99%	100%	0%	0%
Golfinvalshoek	51%	99%	6%	92%	2%
Golfoploop	17%	84%	100%	0%	0%
*Dit betreft percentages van de dijkvakken waarvoor een vergelijking mogelijk was					

7.3 Aanvullende berekeningen voor de golfhoogte

Uit de inventarisatie van de 59 documenten bleek dat voor 77% (nl. 117 van de 150) van de dijkvakken de ontwerpwaarde van de golfhoogte beschikbaar is. Gezien de belangrijke rol van de golfhoogte bij het toetsen van dijken is het noodzakelijk dat deze voor de overige 33 dijkvakken eveneens beschikbaar is.

Voor een deel van deze 33 dijkvakken is in (Haskoning 2005c) de golfhoogte herleid uit de beschikbare ontwerpwaarde van de golfoploop met gebruik van de zogenaamde “Delftse formule” voor golfoploop die ook gehanteerd wordt in het “Voorschrift Toetsen op Veiligheid” (VTV 2004). De Delftse formule berekent de 2%-golfoploop (d.w.z dié oploophoogte die door 2% van de golven gedurende een stormgebeurtenis wordt overschreden) *gegeven* de heersende golfhoogte aan de teen van de dijk. Echter, met relatief weinig wiskundige bewerkingen kan deze relatie geïnverteerd worden zodat de golfhoogte aan de teen van de dijk bepaald wordt uit de 2%-golfoploop.

De Delftse formule houdt geen rekening met de heersende golfinvalshoek. Impliciet gaat de formule daarmee uit van loodrechte golfaanval. Bij loodrechte golfaanval is de oploophoogte hoger dan voor andere invalshoeken. Omgekeerd is voor een gegeven oploophoogte de benodigde golfhoogte minimaal bij loodrechte aanval. Het gebruik van de Delftse formule op bovenstaande wijze resulteert dus in een *onderschatting* van de golfhoogte voor situaties waarbij de golfinvalshoek niet loodrecht is. Voor dié dijkvakken waar op bovenstaande wijze de Delftse formule is toegepast moet daarom bij de toetsing op kruinhoogte uitgegaan worden van *loodrechte golfaanval*. Dit zal ook worden aangegeven in HR2006.

Voor dijkvakken waar de ontwerpwaarden van de golfoploop en golfhoogte beide niet beschikbaar zijn, is laatstgenoemde afgeleid op basis van ruimtelijke interpolatie tussen omliggende dijkvakken

waarvoor de golfhoogte wél beschikbaar is. Daarbij zijn in de studie van (Haskoning, 2005c) enkele berekeningen met het golfmodel SWAN uitgevoerd als fysische referentie. Deze SWAN-berekeningen zijn geijkt aan de beschikbare ontwerpwaarden van de omliggende dijkvakken.

7.4 HR2006 versus HR2001

Op basis van de inventarisatie en aanvullende berekeningen is in (Haskoning, 2005) een lijst opgesteld met (voorgestelde) randvoorwaarden langs de Waddenzee voor HR2006. De resultaten voor de Waddenzee (harde keringen) zijn opgenomen in de langsfiguren (Figuur C.12-C.13) van bijlage C. Langs de as staan volgnummers (zie bijlage H) die de rondwandeling langs de dijkvakken weergeven. Deze rondwandeling start bij Groningen (volgnummers 1-38) en gaat *met de wijzers van de klok mee* via Friesland (39-82), Afsluitdijk (83-87), Wieringen (88-102), kop van Noord-Holland (103-107), langs de onderzijde van de waddeneilanden (108-148). De rondwandeling eindigt bij Schiermonnikoog (145-148).

In vergelijking met HR2001 ligt het toetspeil gemiddeld genomen ongeveer 6-7 centimeter hoger. Dit is hoofdzakelijk het gevolg van het feit dat bij elke toetsingsronde vijf jaar vooruit wordt gekeken. De verwachte veranderingen over de komende vijf jaar worden daarom meegenomen in het Randvoorwaardenboek. De verwachte zeespiegelstijging over deze periode van vijf jaar (van 2006 naar 2011) is gelijk aan 6-7 cm, maar wordt afgerond op een 10 cm toename in het randvoorwaardenboek.

Voor de golfhoogte zijn de verschillen minder structureel. Voor het merendeel van de dijkvakken, zo'n 60% (inclusief vakken zonder gegevens) of 79% (exclusief vakken zonder gegevens als in Tabel 7.1), is de ontwerpwaarde gelijk gebleven. Voor de overige circa 40%-incl. (of 21%-excl.) van de dijkvakken zijn nieuwe waarden afgeleid die gemiddeld zo'n 15 centimeter hoger zijn. De grootste verschillen zijn een daling van 0,20 meter en een stijging van 1,70 meter ten opzichte van HR2001. De grootste verschillen treden op bij dijkkring 12 (Wieringen, volgnummers 88-102 in Figuur C.13). De waarden uit de HR2001 zijn daar op het oog inconsistent: dijkvakken met een golfhoogte van 2,20 meter worden afgewisseld met dijkvakken met een golfhoogte van 50 centimeter. In HR2006 wordt deze hoogte over de hele linie gelijk aan 2,20 meter. Verder neemt de golfhoogte opvallend veel toe voor een aantal locaties bij Harlingen en de Waddenkust van Groningen. Voor de dijken langs de Eems-Dollard ontstaat een gevarieerd beeld, waarbij zowel afname als toename voorkomen. De nieuwe waarden vertonen hier een meer constant verloop dan in HR2001 het geval was. De nieuw bepaalde toetswaarden voor 2006 hebben met name voor dijkkring 12 en dijkkring 6 een fysisch realistischer verloop.

De golfperiode is hier verder niet in beschouwing genomen.

Deel IV: Methode ter bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor duinwaterkeringen

8. Hydraulische randvoorwaarden voor duinwaterkeringen

8.1 Inleiding

Voor het toetsen van duinwaterkeringen geldt het faalmechanisme duinafslag. Voor duinen is de vertaling van de veiligheidsnorm in een set hydraulische randvoorwaarden voor toepassing in een rekenregel van de VTV (VTV, 2004) anders tot stand gekomen dan voor de harde waterkeringen. De belangrijkste redeneren voor de verschillen in aanpak zijn:

anders

- Een duinwaterkering is vrijwel daadwerkelijk bezweken als het faalmechanisme optreedt. Het uitgangspunt uit de Wet op de Waterkeringen (WoW, 2002), dat een waterkering bij maatgevende omstandigheden nog 'volledig standzeker' moet zijn, heeft hier geen onderbouwing vanuit het waterkeringssysteem. Dit in tegenstelling tot bij de harde waterkeringen, waar er bij het falen door bv. teveel golfoverslag veelal nog reststerkte aanwezig is. Daarom is bij duinwaterkeringen de term van 'volledig standzeker' vertaald door het veiligheidsniveau met een factor 10 te verhogen (TAW, 1984).
- Statistische onzekerheden worden niet alleen gerepresenteerd door de invulling van de variabelen aan de belastingkant (waterstand, golven), maar ook door het gebruik van rekenwaarden voor de variabelen aan de sterktekant. Daar waar bij harde waterkeringen de gemiddelde waarden aan de sterktekant worden gebruikt (bijvoorbeeld de dikte van de bekleding op het talud), wordt voor duinwaterkeringen niet de gemiddelde korreldiameter, maar een "rekenwaarde" gebruikt (bv. het gemiddelde plus een deel van de standaardafwijking). Deze rekenwaarde wordt vastgesteld op basis van probabilistische berekeningen waar de korreldiameter als stochastische variabele fungeert. Ook aan de belastingkant zijn op basis van de probabilistische analyses rekenwaarden bepaald.

Om het toetsproces handzaam te houden is, net als voor harde waterkeringen, gebruik gemaakt van een zekere representatieve combinatie van de hydraulische belasting: een waterstand en bijbehorende golfkarakteristieken. Gekozen is voor dié combinatie van waterstand en golven die leidt tot dimensies van de duinwaterkering waarbij de kans op falen voor dat betreffende faalmechanismen gelijk is aan de veiligheidsnorm/10.

De rekenregel voor de veiligheid van duinwaterkeringen wordt medio 2007 gewijzigd, met name om de effecten van de golfperiode in rekening te brengen. In het kader van HR2006 is het daarom niet mogelijk geweest om kansberekeningen uit te voeren met de nieuwe rekenregel en is het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden conform de aanpak voor dijken niet mogelijk geweest. Daarom zijn de uitgangspunten ten aanzien van de rekenwaarden voor de belastingkant gebruikt uit (TAW, 1984). Concreet betekent dit dat gewerkt wordt

met de waterstand gelijk aan het rekenpeil en met de verwachtingswaarde van de golfcondities op diep water (-20 m NAP) bij dat waterniveau. De resulterende randvoorwaarden van HR2006 kunnen ten behoeve van de toetsing overigens wél gewoon als invoer dienen van de nieuwe rekenregel zodra deze gereed is. De reden hiervoor is dat de rekenwaarden aan de sterktekant zodanig worden afgeregeld dat het vereiste beoordelingsniveau wordt bereikt.

Met betrekking tot de praktische toepassing voor het afleiden van randvoorwaarden voor duinwaterkeringen is onderscheid gemaakt tussen enerzijds de Hollandse kust en de Waddeneilanden en anderzijds de duinen ten zuiden van de Maasvlakte, ook wel aangegeven met de Zeeuwse kust. De reden voor het verschil in aanpak ligt in de invloed van de Voordelta voor de Zeeuwse kust op de golf randvoorwaarden. De golfbelasting op de -20 m dieptelijn, die voor de Hollandse kust en de Waddeneilanden representatief wordt geacht, is te zwaar voor de veiligheidsbeoordeling van de Zeeuwse kust. Daarom is in het verleden voor het zuidelijk deel van onze kustlijn een vertaling gemaakt van de -20 m dieptelijn naar de een denkbeeldige locatie op diep water dicht bij de kust (Roelse, zie WWKZ-84.V319P). In het kader van HR2006 is voor de Zeeuwse kust een vertaalslag afgeleid met behulp van het golfmodel SWAN, gebaseerd op nieuwe berekeningen voor de duinen langs de Zeeuwse Noordzeekust.

Paragraaf 8.2 beschrijft de uitwerking van de methode voor de Hollandse kust en Waddenkust. Deze methode bevat de volgende stappen:

- a) Het afleiden van randvoorwaarden voor de hoofdstations op diep water (zie paragraaf 8.2.2, 8.2.3 en 8.2.4);
- b) Het bepalen van de randvoorwaarde voor elke Jarkus raai middels interpolatie (zie paragraaf 8.2.5).

De uitwerking voor de duinen ten zuiden van de Maasvlakte staat beschreven in paragraaf 8.3. Daar is een tussenstap toegevoegd, te weten de vertaling van diep water naar de kust met SWAN.

8.2 Hollandse kust en Waddengebied

8.2.1. Inleiding

In het kader van de HR2006 heeft WL | Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIKZ in eerste instantie geopteerd de methode Van Aalst (WWKZ-83G.218) opnieuw toe te passen, zij het met enkele aangepaste parameters. De aanpassingen waren bedoeld om de methode af te stemmen op de statistieken van de windsnelheid en de golfhoogte die gebruikt zijn voor de HR2006 ten behoeve van het toetsen van harde waterkeringen. Dit is gedaan om te garanderen dat dijken en duinen langs dezelfde veiligheidsmaatlat worden gelegd.

Na bovenbeschreven afstemming met de statistieken van wind en waterstand bleken de resulterende golf randvoorwaarden voor met name

Hoek van Holland onrealistisch laag. De oorzaak daarvan lag in het feit dat vooral de windstatistiek binnen de methode Van Aalst sterk aangepast moest worden. De windsnelheden in de oorspronkelijke methode Van Aalst bleken voor een aantal locaties onrealistisch hoog.

Daarom is besloten een empirische relatie tussen waterstand en golfhoogte af te leiden als alternatief voor de methode Van Aalst (RIKZ, 2006a). De gehanteerde relatie is gebaseerd op de relatie die bij de probabilistische berekeningen in het kader van de voorbereiding voor de TAW-leidraad duinafslag van 1984 is toegepast (Van de Graaff, 1984).

8.2.2. Relatie waterstand – golfhoogte

Deze paragraaf beschrijft het afleiden van een empirische relatie tussen waterstand en golfhoogte, ten behoeve van het bepalen van golfbrandvoorwaarden van duinen voor de Hollandse kust en Waddenkust (RIKZ, 2006a). *Deze relatie zorgt dat (bij benadering) de verdelingsfunctie gelijk is aan de verdelingsfunctie van de golfhoogte zoals deze voor dijken is afgeleid in WL (2004).*

De gehanteerde relatie is gebaseerd op de relatie die bij de probabilistische berekeningen in het kader van de leidraad duinafslag van 1984 is toegepast (Van de Graaff, 1984), die is afgeleid van de resultaten van Van Aalst (WWKZ-83G.218). Voor locatie Hoek van Holland is toen de volgende relatie gehanteerd voor de *verwachtingswaarde* van de golfhoogte, gegeven de waterstand:

$$\begin{aligned}\mu(H_s | h) &= 4.82 + 0.6h - 0.0063(7.0 - h)^{3.13} \quad [m]; \text{ als } h \leq 7 \\ &= 4.82 + 0.6h \quad [m]; \text{ als } h > 7\end{aligned} \quad (8.1)$$

waarin:

H_s	= golfhoogte
h	= waterstand
μ	= verwachtingswaarde (van de golfhoogte)

Verder is destijds aangenomen dat de golfhoogte normaal verdeeld is met een standaarddeviatie $\sigma(H_s) = 0,6$ m.

In algemene vorm is vergelijking (1) om te schrijven in:

$$\begin{aligned}\mu(H_s | h) &= a + bh - c(d - h)^e \quad [m] \quad ; \text{ als } h \leq d \\ &= a + bh \quad [m] \quad ; \text{ als } h > d\end{aligned} \quad (8.2)$$

hierin zijn a , b , c , d en e parameters die per locatie verschillend zijn. In deze paragraaf leiden we deze parameters af voor de locaties Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Eierland en Borkum. Het criterium dat we daarbij hanteren is dat de resulterende golfbelasting voor duinen en dijken (vrijwel) gelijk moet zijn. Voor dijken zijn in (WL, 2004) verdelingsfuncties voor de golfhoogte afgeleid ten behoeve van het rekenprogramma HYDRA-K, waarmee hydraulische randvoorwaarden van dijken worden bepaald. Voor duinen wordt géén gebruik gemaakt van deze verdelingen: de statistiek van de golfhoogte wordt voor duinen gekoppeld aan de waterstand. Echter, gegeven de statistiek van

de waterstand is het wel mogelijk om ook voor duinen de individuele statistiek van de golfhoogte af te leiden, nl. als volgt:

$$F_{duin}(H_s) = \int_h G_{duin}(H_s | h) f(h) dh = \int_h \Phi^{-1} \left(\frac{H_s - \mu(H_s | h)}{\sigma(H_s)} \right) f(h) dh \quad (8.3)$$

waarin:

- F_{duin} = kansverdelingsfunctie van de golfhoogte voor duinen
- G_{duin} = voorwaardelijke kansverdelingsfunctie van de golfhoogte voor duinen, gegeven de waterstand
- f = kansdichtheidsfunctie van de waterstand
- Φ = standaard normale verdelingsfunctie

Het doel is om de parameters a , b , c , d en e uit vergelijking (8.2) zo te kiezen dat de verdelingsfunctie voor de golfhoogte die uit vergelijking (8.3) volgt, (bij benadering) gelijk is aan de verdelingsfunctie van de golfhoogte zoals deze voor dijken is afgeleid. Om deze keuze te bepalen hebben is nodig:

1. de kansverdeling van de waterstand (zie vergelijking (8.3));
2. de kansverdeling van de golfhoogte voor dijken (om de vergelijking te kunnen maken)

De marginale *frequentieverdelingen* van de golfhoogte (voor dijken) en van de waterstand zijn beide beschreven met een conditionele Weibull verdeling:

$$F(X > x) = \rho \exp \left\{ - \left(\frac{x}{\sigma} \right)^\alpha + \left[\frac{\omega}{\sigma} \right]^\alpha \right\} ; x \geq \omega \quad (8.4)$$

waarin:

- F = overschrijdingsfrequentie;
- X = de stochast (waterstand of golfhoogte);
- x = mogelijke realisatie van stochast X ;
- α = vorm- of krommingparameter;
- σ = schaalparameter;
- ω = drempelwaarde, waarboven de statistieken zijn afgeleid;
- ρ = overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde ω .

Tabel 8.1 en Tabel 8.2 tonen de parameters van deze verdelingsfunctie voor de vijf locaties. Voor locatie Den Helder is in Tabel 8.2 niets ingevuld, omdat bij deze locatie geen golfstatistiek beschikbaar is. De golfstatistiek bij deze locatie wordt bepaald op basis van interpolatie tussen IJmuiden en Eierland:

$$H_{s, \text{Den Helder}} = \lambda H_{s, \text{IJmuiden}} + (1-\lambda) H_{s, \text{Eierland}} \quad (8.5)$$

De waarde $\lambda = 0.35$ is gekozen op basis van de afstanden van Den Helder tot IJmuiden en Eierland.

Tabel 8.1 Parameters van de omni-directionele verdelingsfunctie van de waterstand

par	Hoek van Holland	IJmuiden	Den Helder	Eierland	Borkum
ω	1.95	1.85	1.6	2.25	1.85
ρ	7.237	5.341	3.254	0.5	5.781
α	0.57	0.63	1.6	1.86	1.27
σ	0.0158	0.0358	0.9001	1.0995	0.535

Tabel 8.2 Parameters van de omni-directionele verdelingsfunctie van de golfhoogte

par	Hoek van Holland	IJmuiden	Den Helder	Eierland	Borkum
ω	3.60	3.77		3.89	3.42
ρ	8.33	8.33		8.33	8.33
α	2.57	2.29		1.87	1.79
σ	3.00	3.05		2.78	2.63

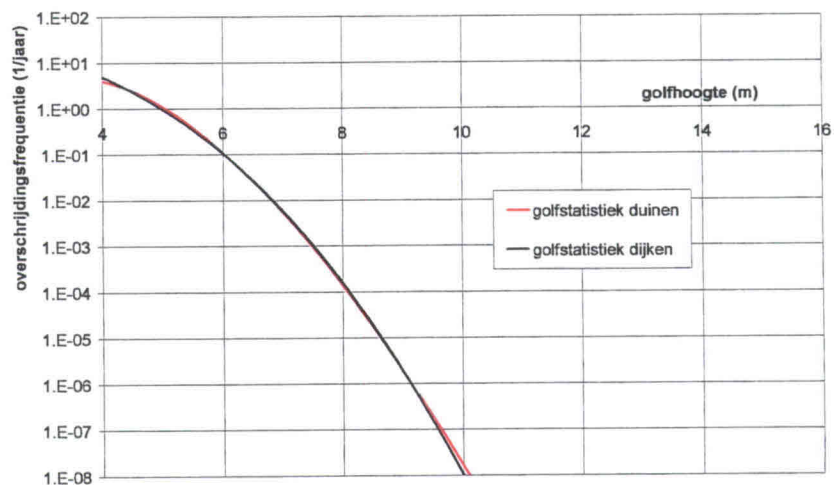
Resultaten van de fitprocedure

Bij het afleiden van de relatie tussen de waterstand en de verwachtingswaarde van de golfhoogte is voor alle locaties een standaarddeviatie van de golfhoogte aangenomen van 0,6 m. Verder zijn de parameters b en d uit vergelijking (8.2) voor alle locaties gelijk genomen aan de waarde uit vergelijking (8.1) (d.w.z. $b = 0.6$ en $d = 7$). Tabel 8.3 toont de resulterende parameterwaarden van vergelijking (8.2) voor alle locaties.

Tabel 8.3 Gefitte parameters a-e van vergelijking (8.2)

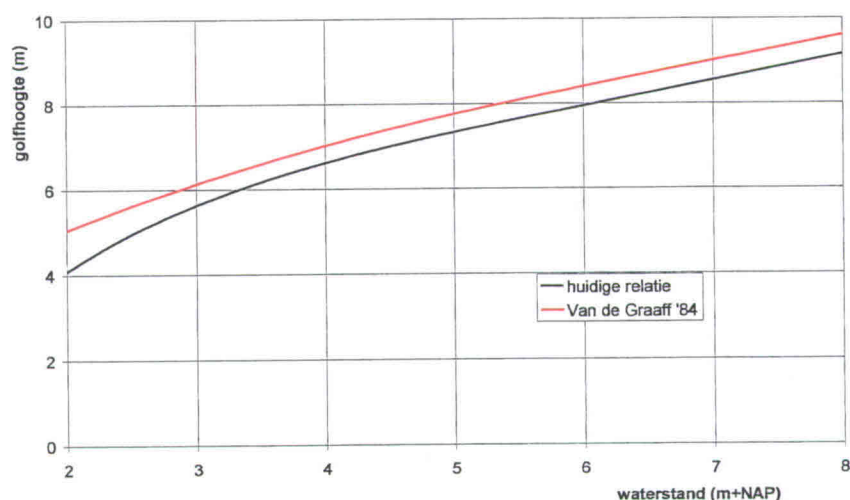
	Hoek van Holland	IJmuiden	Den Helder	Eierland	Borkum
a	4.35	5.88	9.43	12.19	10.13
b	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
c	0.0008	0.0254	0.68	1.23	0.57
d	7	7	7	7	7
e	4.67	2.77	1.26	1.14	1.58

Uit Figuur 8.1 blijkt dat er goede overeenstemming is tussen de resulterende marginale verdelingsfuncties voor Hoek van Holland van de golfhoogte (uit vgl. (8.3)) en de marginale verdelingsfunctie die in (WL, 2004) voor dijken. Ook voor de overige stations is dit het geval (RIKZ, 2006a). Figuren voor deze stations zijn gegeven in bijlage B.



Figuur 8.1 Vergelijking van de resulterende marginale statistiek voor duinen en de beschikbare statistiek voor dijken bij locatie Hoek van Holland.

Figuur 8.2 toont een vergelijking van de afgeleide relatie voor locatie Hoek van Holland met de relatie uit (Van de Graaff, 1984). Daaruit blijkt dat de verwachtingswaarde van de golfhoogte voor Hoek van Holland lager ligt dan destijds.



Figuur 8.2 Relatie waterstand – gemiddelde golfhoogte voor locatie Hoek van Holland; vergelijking tussen de afgeleide relatie en de uit (Van de Graaff, 1984).

8.2.3. Relatie golfhoogte – piekperiode

De piekperiode is voor alle locaties gekoppeld aan de golfhoogte op basis van *volledige correlatie*. Dit houdt in dat er is aangenomen dat een golfhoogte met een overschrijdingsfrequentie van, bijvoorbeeld, 1/1.000 per jaar altijd optreedt in combinatie met een piekperiode met diezelfde overschrijdingsfrequentie van 1/1.000 jaar. In (HKV, 2005)

is deze relatie in tabelvorm uitgewerkt, op basis van de statistiek van (WL, 2004).

8.2.4. Diepwaterrandvoorwaarden in de hoofdstations

Tabel 8.4 toont de resulterende waarden (waterstand is gelijk aan rekenpeil, golfhoogte, piekperiode) voor de vijf locaties. Het rekenpeil is daarbij de waterstand die gevonden wordt door bij het toetspeil tweederde van de decimeringshoogte op te tellen. Deze liggen op diep water en zijn uitgangspunt voor de toetsing. Voor de toetsing wordt voor het faalmechanisme duinafslag gebruik gemaakt van duinprofielen die doorlopen tot op diep water (e.g. de -20m lijn). In de volgende paragraaf wordt besproken hoe de rekenpeilen in de hoofdstations zijn bepaald, en hoe de ruimtelijke interpolatie is uitgevoerd.

Tabel 8.4 Resulterende waarden in 5 locaties

locatie	waterstand	golfhoogte	piekperiode
Hoek van Holland	5.6	7.71	12.29
IJmuiden	5.7	9.25	16.03
Den Helder	4.8	10.47	16.27
Eierlandse Gat	4.3	10.95	16.93
Borkum	4.6	10.62	19.38

8.2.5. Ruimtelijke interpolatie

Het toepassen van de empirische relatie tussen waterstand en golfhoogte geeft de beschikking over een statistische relatie tussen de waterstand en de golfhoogte voor 5 locaties: Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Eierlandse Gat en Borkum. Voor tussenliggende locaties is een vergelijkbare relatie bepaald op basis van (ruimtelijke) interpolatie langs de kust (HKV, 2006b; RIKZ, 2006a). In de Waddenzee is daarbij een extra steunpunt toegevoegd (locatie 5 in Figuur 8.5) om ervoor te zorgen dat de ruimtelijke interpolatie ongeveer de lijn van -20 m+NAP bodemdiepte volgt en niet dwars over de eilanden loopt.

De hydraulische randvoorwaarden bestaan uit een combinatie van waterstand, golfhoogte en piekperiode. De waterstand is in elk van de 6 diep water locaties gelijk gesteld aan het rekenpeil aan de kust. Op basis van de statistische relaties uit paragraaf 8.2.2 wordt de verwachtingswaarde van de golfhoogte bepaald, gegeven de situatie dat de waterstand gelijk is aan het rekenpeil. De piekperiode volgt uit de werkwijze beschreven in paragraaf 8.2.3.

Bij het koppelen van het rekenpeil aan de kust in elk van de 6 locaties op diep water is de volgende werkwijze gehanteerd:

- Het rekenpeil is constant verondersteld over een Jarkusraai.
- Rekenpeilen zijn bepaald door eerst de raaien te selecteren die door (of zo dicht mogelijk langs) de coördinaten van de 6 locaties op

diep water lopen. Vervolgens zijn voor deze raaien de punten langs de kust geselecteerd die op het uiteinde van deze raaien liggen (zie Tabel 8.5);

- Het rekenpeil voor die punten is afgelezen en gebruikt voor het afleiden van de gecombineerde statistiek in de hoofdstations.

Voor de Hollandse kust (1/10.000 per jaar), Texel (1/4.000 per jaar) en de overige Waddeneilanden (1/2.000 per jaar) worden verschillende normfrequenties gehanteerd. Interpolatie van randvoorwaarden tussen bijvoorbeeld locatie Den Helder (1/10.000 per jaar) en Eierland (1/4.000 per jaar) is daarom niet consistent. Daarom zijn voor de steunpunten die op de overgang liggen tussen twee verschillende normfrequenties rekenpeilen beschouwd die horen bij beide normfrequenties (zie Tabel 8.6). Voor bijvoorbeeld Den Helder is aldus een “rekenpeil” vastgesteld bij de normfrequentie van 1/4.000 jaar en deze is gebruikt om door interpolatie met ELD de randvoorwaarden voor Texel af te leiden.

Tabel 8.5 Locaties aan de kust die corresponderen met die waarvoor diepwaterstatistiek van golven beschikbaar is.

nr	locatie	X	Y
1	Hoek van Holland	58.748	450.830
2	IJmuiden	79.249	501.800
3	Den Helder	98.372	549.340
4	Eierlandse Gat	106.514	587.985
5	Steunpunt Waddenzee	150.000	621.230
6	Borkum	221.990	621.330

Tabel 8.6 Corresponderende raaien waarvan het rekenpeil is overgenomen.

nr	Locatie	kustraai	rekenpeil
1	Hoek van Holland	Hollandse kust, 11825	5.60
2	IJmuiden	Hollandse kust, 5750	5.70
3	Den Helder (1:10.000)	Hollandse kust, 308	4.80
	Den Helder (1:4.000)	Texel, 880	4.45
4	Eierlandse Gat (1:4.000)	Texel, 2901	4.35
	Eierlandse Gat (1:2.000)	Vlieland, 4000	4.20
5	Steunpunt Waddenzee	Terschelling, 1800	4.20
6	Borkum	Schiermonnikoog, 1000	4.65

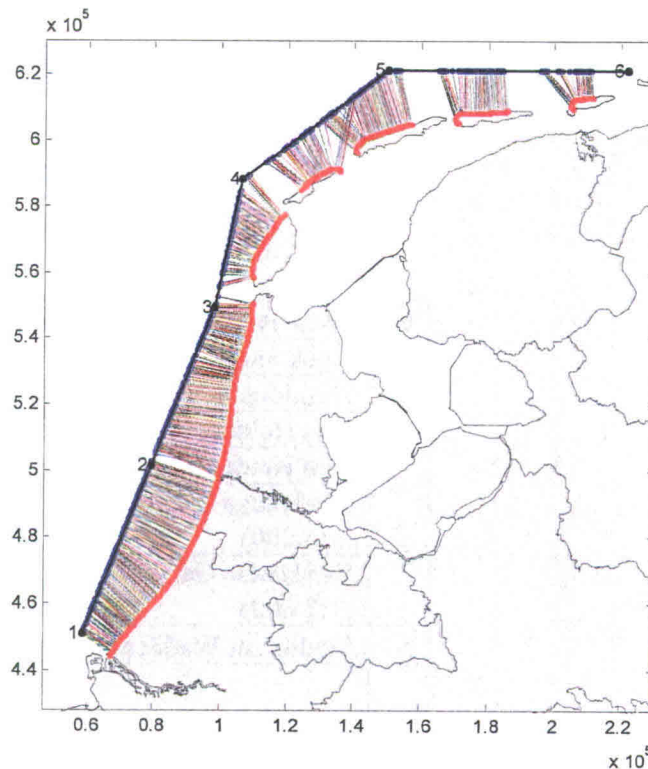
De significante golfhoogte voor het extra steunpunt in de Waddenzee is vastgesteld op basis van lineaire interpolatie tussen de 2 omliggende steunpunten (ELD en Borkum). De verhouding van de afstanden tot deze 2 punten is respectievelijk 0.43 tegen 0.57.

Figuur 8.5 geeft een schematische weergave van de methode van interpoleren tussen de 6 steunpunten. Elke duinraai wordt doorgetrokken tot deze één van de lijnen snijdt die getrokken is tussen de 6 punten op diep water. Vanuit het snijpunt van de twee lijnen wordt de afstand bepaald tot de 2 punten waartussen de lijn op diep water is opgespannen. Deze afstand is bepalend voor de vermenigvuldigingsfactoren van de interpolatie.

Voorbeeld: Stel dat een duinraai, D , snijdt met de lijn tussen Hoek van Holland (locatie 1 in Figuur 8.5) en IJmuiden (locatie 2 in Figuur 8.5) en dat de verhouding van de afstanden tot deze 2 punten gelijk is aan respectievelijk 0.3 (Hoek van Holland) tegen 0.7 (IJmuiden). Het rekenpeil, de significante golfhoogte en de golfperiode bij duinraai D worden dan als volgt bepaald:

$$X_D = 0.7 \times X_{\text{Hoek van Holland}} + 0.3 \times X_{\text{IJmuiden}} \quad (8.6)$$

Waarin X het rekenpeil, de significante golfhoogte of de golfperiode representeert.



Figuur 8.5 Grafische weergave van de ruimtelijke interpolatie. De nummers 1-6 geven de locaties weer van de hoofdstations op diep water(zie Tabel 8.5).

Voor bespreking van de resultaten zie verder hoofdstukken 9 en 10.

8.3 Bepalen van randvoorwaarden duinen ten zuiden van de Maasvlakte

8.3.1. Inleiding

Voor de Hollandse kust en Waddenkust zijn waterstanden en golfparameters rond de -20 m lijn gekozen ten behoeve van het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden. Voor de kust ten zuiden van de Maasvlakte is dit geen goede keuze vanwege de aanwezigheid aldaar van geulen, banken en ondiepe voorlanden. De waarden op de -20 m lijn zijn daardoor niet representatief voor de golfaanval op de Zeeuwse duinen. Ruim twee decennia geleden heeft Roelse de effecten van de bodemgeometrie op de golfcondities bepaald (WWKZ-84.V319P). In het kader van de HR2006 zijn vergelijkbare berekeningen uitgevoerd, maar dan met een meer geavanceerd rekenmodel (SWAN). Het bepalen van hydraulische randvoorwaarden voor de Zeeuwse duinenkust bestaat feitelijk uit twee delen:

1. het bepalen van een geschikt criterium om voor elke duinraai dié locatie (te noemen: randvoorwaardenlocatie) op zee te kiezen waar de golfparameters kunnen worden beschouwd als de representatieve hydraulische randvoorwaarden voor duinaanval; en
2. het bepalen van de relevante golfparameters (de hydraulische randvoorwaarden) in de in punt 1 gekozen locaties.

8.3.2. Aanpak

Voor een goed begrip van de wijzigingen in de aanpak wordt hier eerst kort samengevat hoe de golfrandvoorwaarden in HR2001 zijn tot stand gekomen.

HR2001

De HR2001 zijn voor een belangrijk deel gebaseerd op de analyses van Roelse uit 1984 (WWKZ-84.V319P). Destijds heeft Roelse gebruik gemaakt van rekenresultaten met het (1D) golfdoordringingsprogramma VOORFIL (Langendoen, 1979). Ten behoeve van de Leidraad Duinafslag (TAW, 1984) zijn voor de Zeeuws-Vlaamse en Walcherse kust de volgende aspecten in rekening gebracht:

1. Het effect van shoaling bij een andere diepte met behulp van lineaire golftheorie;
2. Het effect van refractie buiten de brekerlijn op de vooroever van de zuidwest kust van Walcheren bij scheve golfinval.

Voor de kust van Schouwen zijn de golven dieptegelimiteerd door breken op de hooggelegen banken. Het effect daarvan is in rekening gebracht met een brekerscriterium (van Koel ). De resulterende waarden voor de significante golfhoogte zijn in HR2001 overgenomen. De rekenpeilen zijn echter in de loop der jaren verlaagd met 0.5- 0.8m.

Visser (1985) heeft voor de kusten van Goeree en Voorne dezelfde aanpak gevolgd die Roelse heeft toegepast voor de kust van Schouwen. De significante golfhoogte bij deze twee eilanden wordt hoofdzakelijk bepaald door de ondiepte boven de Oosterplaat respectievelijk Hinderplaat. Per raai is het meest ondiepe punt van het platengebied gekozen en aan de diepte aldaar is in het model 1 m toegevoegd. Met lineaire golftheorie en het Koel  brekerscriterium is de significante golfhoogte bepaald bij het gegeven rekenpeil. Vervolgens is de golfhoogte teruggerekend naar 'diep water' waarbij er verder geen rekening gehouden is met refractie en diffractie. De resulterende golfrandvoorwaarden van (Visser, 1985) zijn overgenomen in HR2001. De rekenpeilen in HR2001 zijn met maximaal 20 cm verlaagd t.o.v. de rekenpeilen in (Visser, 1985).

De *piekperiode* was in HR2001 voor de gehele Zeeuwse kust gelijk gesteld aan 8 s.

HR2006

De golfrandvoorwaarden uit HR2001 zijn verkregen op basis van lineaire golftheorie, uitgaande van de bodem boven de ondiepe platen voor de kust. In de laatste 2 decennia hebben zowel de golfmodellering als de statistische kennis van golfcondities op offshore locaties een grote sprong voorwaarts gemaakt. Van deze vergrote kennis is gebruik gemaakt om nieuwe golfrandvoorwaarden voor de duinenkust af te leiden, in termen van significante golfhoogte en piekperiode. Dit leidt tot twee majeure verschillen ten aanzien van de vigerende aanpak ter bepaling van de golfrandvoorwaarden, zoals beschreven in Roelse (WWKZ-84.V319P) voor Schouwen, Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen en in Visser (1985) voor Goeree en Voorne. Die worden in de volgende alinea's behandeld.

In het kader van HR2006 is gebruikt gemaakt van het golfmodel SWAN (zie hoofdstuk 6), voor de vertaling van offshore golfcondities over de ondiepe platen naar de kustlijn. Voor de harde keringen voor de Hollandse kust, inclusief de Zuid-Hollandse eilanden, zijn deze berekeningen door Haskoning/WL (2005) uitgevoerd en voor de Zeeuwse kust door WL (2006). Voor windrichtingen van 270 °N en 315 °N (met windsnelheden van 29 en 34 m/s en waterstanden van 5.2 m en 5.6 m) zijn deze berekeningen in deze studie opnieuw uitgevoerd. De modelinstellingen voor duinen zijn gelijk aan de berekeningen voor de Hollandse kust ten behoeve van de harde keringen (SWAN versie 40.41, zie paragraaf 6.3; HKV 2006b). Wat betreft de diepwaterrandvoorwaarden van de golfberekeningen is uitgegaan van volledige correlatie tussen waterstand en golfparameters. Opgemerkt dient te worden dat de keuze van de windsnelheid en golfparameters op de diepwaterrand hier veel minder relevant is dan voor de Hollandse

kust aangezien de golven breken in het voorliggende bankengebied. Uitvoer is bepaald op iedere JARKUS raai met een fijne resolutie. Voor elke JARKUS raai is via lineaire interpolatie tussen de beschikbare golfberekeningen het bodem- en golfhoogteverloop per windrichting bepaald, dat hoort bij het lokale rekenpeil.

Een ander verschil met de aanpak van HR2001 is dat de locatie waar de golfparameters worden bepaald ter toetsing van het faalmechanisme duinafslag niet meer ter plaatse van de grote zandbanken als de Hinderplaat en de Oosterplaat zijn gekozen, maar dichterbij de kust. De gekozen locatie ligt zeewaarts van de laatste brekerzone. De aldaar bepaalde golfhoogte wordt gezien als bepalend voor de golfaanval op het te beschouwen duin. Concreet betekent dit dat de locatie dáár gelegen is waar de golfhoogte, lopend vanaf het strand zeewaarts, niet meer toeneemt. De locatie ligt daarmee buiten de eerste brekerzone vanaf het strand en tussen eventuele zandbanken en het strand in. Zowel de verkregen golfhoogtes, alsmede de locaties waarop deze golfhoogtes zijn bepaald, laten een redelijk continu verloop zien. Deze definitie zorgt niet overal voor een bruikbare locatie. Voor de kust van Voorne en Goeree is de bodem over een aantal raaien in zijn geheel zeer zwak hellend tot vlakbij de kustlijn. Het criterium leidt dan automatisch tot de meest zeewaarts gelegen locatie op de Jarkusraai, en dat is arbitrair. Dit is aangepast door de locatie te kiezen waar breken sterk intensiveert. Daarnaast zijn er een aantal uitschieters in de golfhoogte, die daarop zijn vervangen door golfhoogtes die zijn verkregen op basis van interpolatie of extrapolatie van golfhoogtes op naastgelegen raaien. Vervolgens is een ruimtelijk filter toegepast op de golfhoogtes over de raaien die in één dijkkring liggen. De maatgevende golfhoogte per raai wordt gezien als het maximum over de voor de twee windrichtingen bepaalde golfhoogtes.

De *piekperiode* is, evenals voor de Hollandse kust en de Waddenkust, bepaald op basis van een deterministische relatie die is opgesteld door HKV (2005b) tussen significante golfhoogte en piekperiode. Deze relatie is toegepast op de significante golfhoogte met een overschijdingsfrequentie van 1/4000 jaar bij de offshore locaties Europlatform en Scheur-West. De piekperiodes op de raaien worden bepaald uitgaande van de waarden bij Europlatform en Scheur-West met behulp van lineaire interpolatie. Daarbij wordt aangenomen dat de piekperiode onveranderd blijft over het bankenstelsel tot aan de laatste brekerzone. Hierbij wordt opgemerkt dat de precieze keuze van de golfperiode minder kritisch is aangezien een van de uitgangspunten van de nog op te stellen VTV is dat de golfperiodes een ondergrens hebben van 12s (of een vergelijkbare aanpak).

In hoofdstuk 9 wordt de vergelijking gemaakt tussen HR2001 en HR2006.

Deel V: Resulterende hydraulische randvoorwaarden voor HR2006

9. Resulterende hydraulische randvoorwaarden voor HR2006 en vergelijking met HR2001

9.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de berekeningen en rekenresultaten gepresenteerd die uitgevoerd zijn om tot de hydraulische randvoorwaarden voor de periode 2006-2011 te komen. We maken in dit hoofdstuk wederom onderscheid tussen de harde waterkeringen (paragraaf 9.2) en duinen (paragraaf 9.3). De onderliggende methoden zijn eerder beschreven in Deel II en III (harde keringen) en Deel IV (duinen). Bijlage G bevat een overzicht van de nieuwe (concept-) randvoorwaarden voor zowel de harde waterkeringen als voor duinen afgeleid voor het faalmechanisme *golfoverslag*. De aldaar getoonde tabellen bevatten ter vergelijking tevens de randvoorwaarden, afkomstig uit HR2001 (zij heten dan ook de zogenaamde “was-wordt tabellen”).

9.2 Harde waterkeringen

9.2.1. Inleiding

Deze paragraaf behandelt de berekeningswijze en de analyse van de hydraulische randvoorwaarden voor de harde waterkeringen. Paragraaf 9.2.2 bevat allereerst de rekeninstellingen gehanteerd in HYDRA-K. Daarna wordt uitgelegd hoe de resultaten worden gepresenteerd en worden vergeleken met HR2001.

Paragraaf 9.2.3 beschrijft de hydraulische randvoorwaarden voor de Oosterschelde, paragraaf 9.2.4 voor de Westerschelde, paragraaf 9.2.5 voor de verbindende waterkeringen langs de Noordzeekust en paragraaf 9.2.6 voor de Hollandse kust. Elke paragraaf beschrijft achtereenvolgens de waterstand, de golfhoogte en de periodematen. De resultaten worden telkens vergeleken met de resultaten uit HR2001.

9.2.2. Methode

Aansturing van Hydra-K

Zoals beschreven in hoofdstuk 3 zijn de resulterende maatgevende hydraulische randvoorwaarden afhankelijk van het gehanteerde faalmechanisme. De resultaten in het restant van dit hoofdstuk zijn afgeleid voor het faalmechanisme *golfoverslag* (met een kritiek overslagdebiet van 1 l/m/s). Op basis van deze uitgangspunten en een standaardprofiel is (iteratief met het rekenprogramma HYDRA-K) een benodigde kruinhoogte bepaald die voldoet aan de gestelde normveiligheid. Verder is de maatgevende waterstand gelijk gesteld aan het toetspeil (zie paragraaf 5.5.2) en zijn de golfcondities bepaald, uitgaande van deze waterstand en de kruinhoogte. De gegeven waarden zijn dus een illustratie van een maatgevende combinatie van

waterstand, golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$. Verdere informatie over de instellingen van het rekenprogramma HYDRA-K zijn gegeven in Tabellen 9.1- 9.3. Deze instellingen waren afwijkend voor de Hollandse kust en verbindende waterkeringen (Tabel 9.1), Westerschelde (Tabel 9.2) en de Oosterscheldekering (Tabel 9.3). Meer achtergrondinformatie over deze instellingen is gegeven in de gebruikersdocumentatie (HKV, 2005d).

Tabel 9.1 Gebruikte instellingen voor Verbindende waterkeringen en Hollandse kust voor HYDRA-K.

kenmerk	invulling
Faalmechanismen	Golfoploop & Stabiliteit van bekleding
PC-Overslag	Aan
Auto kappa	Uit
Waterstand uit Overschrijdingslijn	Ja
Lange golven aan	Nee
Bui oscillaties aan	Nee
Hoogste waterstand/ ongunstigste belasting	Hoogste waterstand
Profiel: “Standaard 1”	Kruinhoogte: 12.75m+NAP Helling boventalud: 1:3 Bermhoogte: 5.13m+NAP Bermbreedte: 13m Helling benedentalud: 1:4 Helling middenberm: 0 Voet van dijk: 0m+NAP

Tabel 9.2 Gebruikte instellingen voor Oosterschelde en Westerschelde²¹ voor HYDRA-K.

kenmerk	invulling
Faalmechanismen	Golfoploop & Stabiliteit van bekleding
PC-Overslag	Aan
Auto kappa	Uit
Waterstand uit Overschrijdingslijn	Ja
Lange golven aan	Nee
Bui oscillaties aan	Nee
Hoogste waterstand/ ongunstigste belasting	Hoogste waterstand
Profiel: “Standaard 2”	Kruinhoogte: 9.00m+NAP Helling boventalud: 1:4 Bermhoogte: 5.0m+NAP Bermbreedte: 5m Helling benedentalud: 1:4 Helling middenberm: 0 Voet van dijk: -1m+NAP

²¹ Voor de Westerschelde wordt voor de monding profiel standaard 1 (zie Tabel 9.1) toegepast i.p.v standaard 2.

Tabel 9.3 Gebruikte instellingen voor Oosterscheldekering voor HYDRA-K.

kenmerk	invulling
Faalmechanisme	Golfoverslag (criterium 1 l/m/s)
PC-Overslag	Uit
Auto kappa	Uit
Waterstand uit Overschrijdingslijn	Ja
Lange golven aan	Nee
Bui oscillaties aan	Nee
Hoogste waterstand/ ongunstigste belasting	Hoogste waterstand
Profiel	Verticale wand (wand 5 m)

Presentatie van de resultaten

Bijlage C (Figuren C.1-C.13) bevat de belangrijkste rekenresultaten voor harde waterkeringen in zogenaamde *langsfiguren* voor de regio's. In de langsfiguren wordt een rondwandeling gemaakt langs het gebied. Figuur C.1 van de bijlage toont het principe van de rondwandeling voor de Oosterschelde. Bij de horizontale as van de langsfiguren staat een nummering van dijkvakken die correspondeert met de volgorde van de rondwandeling. Deze nummers zijn gegeven in bijlage H. Deze nummering is speciaal voor deze langsfiguren opgezet en correspondeert *niet* met de identificatie van dijkvakken zoals deze in het randvoorwaardenboek opgenomen wordt.

Er worden in dit hoofdstuk voor de harde keringen 3 regio's besproken, te weten:

1. *Oosterschelde* (Zie Figuur C.1 voor de rondwandeling, en Figuren C.2-C.4 voor resultaten);
2. *Westerschelde* (Zie Figuur C.5 voor de rondwandeling, en Figuren C.6-C.8 voor resultaten);
3. *Hollandse Kust* (zie Figuren C.9-C.11 voor resultaten). Deze regio start in het noorden bij den Helder en eindigt bij de Veerse Dam in het zuiden. De regio bevat dus ook de *verbindende waterkeringen*, te weten: IJmuiden (7), Haringvlietdam (14-17), Brouwersdam (20-22), Oosterscheldekering (23-30) en Veerse dam (32-33);

De resultaten voor de harde keringen in de Waddenzee (regio 4) zijn besproken in paragraaf 7.4.

Vergelijking van de periodematen

Voor de periodematen is de vergelijking met de HR2001 iets ingewikkelder, omdat er in de HR2001 soms geen en soms wel periodematen worden gegeven. Daar waar ze wel gegeven worden, worden bovendien verschillende definities gebruikt. De standaard periodemaat voor de HR2006 is voor de harde waterkeringen is $T_{m-1,0}$ en deze is juist voor de HR2001 niet gegeven. Dit is mede omdat kruinhoogtes volgens de VTV (2004) worden berekend met het programma PC-Overslag (onderdeel HYDRA-K) op basis van $T_{m-1,0}$.

Ook was voor een groot aantal locaties in de HR2001 helemaal geen periodemaat gegeven. Om toch een vergelijking te kunnen maken is voor deze locaties een periodemaat afgeleid op basis van de aanname dat een golfsteilheid van 5% geldt. De piekperiode is vervolgens omgeschreven naar golfperioden $T_{m-1,0}$ met behulp van de volgende vuistregel: $T_{m-1,0} = T_p / 1.1$ (zie vergelijking 9.1).

Bij een golfsteilheid S_{op} van 5% geldt de volgende formule voor de piekperiode T_p en de golfperiode $T_{m-1,0}$:

$$S_{op} = \frac{2\pi H_s}{gT_p^2} = 0.05 \Rightarrow T_p = \sqrt{\frac{2\pi H_s}{0.05g}} \Rightarrow T_{m-1,0} = \frac{1}{1.1} \sqrt{\frac{2\pi H_s}{0.05g}} \quad (9.1)$$

We merken op dat de gebruikte factor 1.1 in vergelijking (9.1) feitelijk alleen geldt voor standaard enkeltoppig spectra oftewel *offshore* waarden. Nearshore is deze relatie eigenlijk niet overal geldig. Uit de resultaten van SWAN blijkt dit ook wel, aangezien de verhouding tussen $T_{m-1,0}$ en T_p varieert tussen 1.0 en 2.5 (gemiddeld 1.3) voor de nearshore periodematen.

Uiteindelijk zijn er meerdere periodematen die met elkaar vergeleken kunnen worden (zie Tabel 9.4).

Tabel9.4 Periodematen in de HR2001 en HR2006.

HR2001				HR2006 (Hydra-K)	
1.	2.	3.	4.	5.	6.
T_p	T_s	T_g	T (uit S_{op} via H_s)	$T_{m-1,0}$	T_p

In het vervolg zullen we soms spreken over “periodemaat 4”. Tabel 9.4 geeft aan welke periodemaat hiermee bedoeld wordt, namelijk T_p , T_s , of T_g als deze beschikbaar is voor een locatie en anders de periodemaat 4 op basis van de 5%-golfsteilheid en golfhoogte volgens vergelijking (9.1).

Bij de bepaling van de *verschillen* tussen de HR2001 en HR2006 is de vergelijking altijd uitgevoerd voor de $T_{m-1,0}$ uit HR2006 voor de harde waterkeringen en een piekperiode T_p voor de zachte waterkeringen. Voor ontbrekende getallen wordt de betreffende periodemaat 4 afgeleid.

9.2.3. Oosterschelde

Waterstanden (toetspeilen)

De toetspeilen zijn gegeven in Figuur C.2. Voor de Oosterschelde zijn de nieuwe toetspeilen nauwelijks veranderd ten opzichte van de toetspeilen uit HR2001. De verschillen bedragen niet meer dan 0.05 meter. In de meeste gevallen is het toetspeil iets gestegen.

Golfhoogte

De golfhoogtes zijn gegeven in Figuur C.3. Ten aanzien van de golfhoogte zijn er relatief veel verschillen met de HR2001. Het verloop voor de HR2006 is grilliger dan dat voor de HR2001, al komen de grote lijnen goed overeen. Het zijn vooral locale omstandigheden die voor behoorlijk wat variatie zorgen in de rekenresultaten van HYDRA-K. Door de oogharen bezien bevinden de verschillen tussen HR2006 en HR2001 zich grofweg tussen -0.5 en +0.5 meter, maar voor de meeste locaties zijn de verschillen aanzienlijk kleiner. De belangrijkste verschillen met HR2001 zijn:

1. De golfhoogten in de HR2001 zijn afgekapt, met 0.5 meter als minimum. Voor deze golfhoogten treden vaak relatief grote verschillen op tussen HR2001 en HR2006.
2. De meest linkse punten in de langsfiguren komen overeen met Jacobahaven Rippolder en Anna Frisopolder. Deze liggen in de directe omgeving van de Oosterscheldekering. In deze regio zijn behoorlijke “sprongen” te zien in de golfhoogte. De 2 genoemde locaties springen er naar boven uit met een golfhoogte van respectievelijk 1.45 en 1.26 meter, in vergelijking met de 0.63 meter uit de HR2001.
3. De golfhoogte bij de locaties 55 t/m 59 in Zuid-Beveland (Koudepolder t/m de waterkering Yerseke) zijn sterk gedaald in vergelijking met de HR2001.
4. De locaties 72 t/m 79 zijn locaties aan het einde van Tweede Bathpolder, vervolgens langs de Eerste Bathpolder in Zuid-Beveland en tot slot een stuk van de Oesterdam. Voor deze locaties liggen de waarden van de HR2006 systematisch onder de waarden uit de HR2001. Juist het omgekeerde geldt voor de locaties 89 t/m 101 (langs de zuidkant van dijkkringgebied Tholen tussen de Klaas van Steelandpolder en de Oudelandpolder).
5. Locatie 157 in de omgeving van de Gouweveerpolder in Schouwen Duiveland is een uitschieter naar beneden (0.65 m). De naastgelegen locaties hebben een veel hogere golfbelasting: 1.40 m en 1.60 m. Het rekenprogramma HYDRA-K heeft echter nog een aantal extra tussengelegen locaties ter beschikking en die laten een vrij vloeiend verloop zien van 1.40 m via een minimum van 0.44 m naar 1.60 m. Dit verloop geeft vertrouwen in de uitkomsten en geeft aan dat de golfhoogte voor deze locatie in de HR2001 wat conservatief is genomen.
6. In de HR2001 zit een grote sprong in de golfhoogte van 1.18 meter naar 2 meter tussen locatie 161 bij de ingang van het havenkanaal en locatie 162 “Polder Schouwen” in Schouwen Duiveland. In de HR2006 is de golfhoogte daar voor beide locaties relatief hoog: 2.15 en 1.80 meter.
7. De meest rechts gelegen locaties in de langsfiguren bevinden ten Noorden van de Oosterscheldekering bij Schouwen Duiveland. De berekende golfhoogten voor HR2006 zijn hier significant gestegen ten opzichte van de HR2001.

Golfperiode

De golfperiodes zijn gegeven in Figuur C.4. Door de oogharen bezien, bevinden de verschillen tussen de HR2001 en HR2006 zich tussen -1 en +1 seconden, maar voor de meeste locaties zijn de verschillen aanzienlijk kleiner. Verder vallen de volgende verschillen met HR2001 op:

1. De golfperioden $T_{m-1,0}$ geïnterpreteerd uit de HR2001 zijn onderbegrensd tot ongeveer 2.3 seconden. Dit volgt direct uit de afkapping van de golfhoogte op 0.5 meter in combinatie met periodemaat 4. Voor locaties met deze golfhoogte treden vaak afwijkingen op; ook voor de golfperiode.
2. De meest linkse punten in de langsfiguren komen overeen met Jacobahaven Rippolder en Anna Frisopolder. Deze liggen in de directe omgeving van de Oosterscheldekering. Dit is consistent met de afwijkingen die eerder voor de golfhoogte bij deze locaties geconstateerd zijn.
3. Locaties 64 t/m 68 in Zuid-Beveland (Nieuwelandepolder t/m de Oostpolder) hebben in de HR2001 een (lage) golfhoogte van 0.50 meter. Dit resulteert via periodemaat 4 tot een onderschatting van de periode t.o.v. de resultaten voor de HR2006.
4. De meest rechtse punten in de langsfiguur bevinden zich in de omgeving van de Oosterscheldekering, bij Schouwen Duiveland. De periodematen voor HR2006 zijn hier significant gestegen ten opzichte van de HR2001, als gevolg van het feit dat dit voor de golfhoogte ook het geval is.

9.2.4. Westerschelde

Een langsfiguur van het gebied is geven in Figuur C.5.

Waterstanden (toetspeilen)

De toetspeilen zijn gegeven in Figuur C.6. De toetspeilen voor de Westerschelde zijn behoorlijk veranderd ten opzichte van de toetspeilen voor de HR2001. Voor de HR2006 is het verloop veel gelijkmatiger.

Golfhoogte

De toetspeilen zijn gegeven in Figuur C.7. Het eerste dat opvalt in de grafieken met golfhoogten zijn de grote hoeveelheden hiaten in de HR2001 gegevens voor de Westerschelde. Daarnaast vallen feitelijk 5 grote verschillen op tussen HR2006 en HR2001:

- De 2^e en 3^e locatie in de figuur (Suatiegeul Cadzand en Kievittepolder Oost) vallen in de HR2001 database op door zeer grote golfhoogten (5.10 meter). In HR2006 is dat niet het geval.
- Ook tussen locatie 48 en locatie 58 bevat de HR2001 hoge waarden voor de golfhoogte. Het betreft hier het stuk van Nieuw Othenepolder, langs de Margarethapolder tot aan Eendragt in Zeeuws Vlaanderen. De golfhoogten zijn langs dit stuk van de

Zeeuws Vlaanderen ongeveer 2 maal zo hoog als langs het overige deel. In de HR2006 zijn de verschillen veel kleiner.

- Locatie 147 betreft de Borsselepolder in Zuid-Beveland en heeft volgens de HR2001 een maatgevende golfhoogte van 4.10 meter. Deze was destijds aanzienlijk hoger dan voor omliggende locaties en is ook nu substantieel hoger dan de golfhoogte voor HR2006.
- De locaties 156, 158 en 159 in Walcheren hebben in de HR2001 allemaal opvallend lage toetspeilen en juist hoge golven. In de berekeningen voor HR2006 zijn de resultaten van deze locaties meer in lijn met omliggende locaties.
- De locaties 167 t/m 171 aan de zuidkant hebben in de database van HR2001 relatief hoge golfhoogten in vergelijking met omliggende locaties. In de HR2006 is dat niet het geval.

Golfperiode

De periodematen zijn gegeven in Figuur C.8. Omdat de database van HR2001 voor de golfhoogte relatief veel hiaten bevatte bevat ook de periodemaat 4 veel hiaten (deze is immers via de 5%-golfsteilheid afhankelijk van de *golfhoogte*). Wat verder opvalt is dat de periodematen in de HR2006 in de regel niet zo veel verschillen van de periodematen in de HR2001. Een aantal locaties waar de HR2001 een periodemaat vermeldt, hebben een relatief hoge waarde: kennelijk zijn deze óf vrij conservatief genomen, óf de berekening van de 5%-golfsteilheid geeft een onderschatting t.o.v. de waarden uit het randvoorwaardenboek. Het betreft:

- Locaties 162 t/m 165: Eilanddijk, Marine haven en Oranjedijk;
- Locaties 169: Zwanenburg.

Verder zijn de periodematen in HR2001 bij de locaties Ruyter en Bankert/Evertsen (167 -168) meer dan 3s hoger dan in HR2006.

9.2.5. Hollandse kust inclusief verbindende waterkeringen

De resultaten van deze regio zijn gegeven in de langsfiguren C.9-C.11 in bijlage C. Deze regio start in het noorden bij den Helder en eindigt bij de Veerse Dam in het zuiden. De regio bevat dus ook de verbindende waterkeringen, te weten: IJmuiden (10), Haringvlietdam (14-17) Brouwersdam (20-22), Oosterscheldekering (23-30) en Veerse Dam (32-33).

Bij de Hollandse kust treden grote verschillen voor de golfcondities op tussen de HR2001 en HR2006.

Waterstanden (toetspeilen)

Er treden kleine verschillen tot 10 cm op voor de toetspeilen (zie Figuur C.9).

Golfhoogte

De golfhoogte is bij een aantal locaties bij de Helderse zeewering gezakt van ruim 5 meter naar zo'n 2,5 tot 3 meter (locaties 3-5 in Figuur C.10).

Voor de Oosterscheldekering, Haringvlietdam, Brouwersdam en Veerse Dam zijn de golfhoogtes (H_{m0}) gedaald. Voor de Haringvlietdam zijn golfhoogtes gedaald van 3-4m naar orde 2m.

Golfperiode

De golfperiode voor HR2006 is gegeven in Figuur C.11. Hier zijn golfperiodewaarden voor de HR2001 getoond geschat op basis van periodemaat 4. Bij de Helderse zeewering (locatie 3-5) is de golfperiode in HR2006 sterk gedaald, maar bij de Pettemer- (6-7) en Hondsbossche zeewering (8-9) en ook bij Katwijk (11) is de golfperiode juist sterk gestegen. Voor de Oosterscheldekering en Veerse Dam is de periodemaat $T_{m-1,0}$ gedaald. Ook voor de Haringvlietdam is $T_{m-1,0}$ gedaald. Een uitzondering bij de Haringvlietdam is gevonden voor de hier niet getoonde piekperiode T_p voor damvak Voorne (14) waar T_p gestegen is van 8s naar 12.4s 9. Voor de overige vakken (15-17) daalt T_p met ongeveer 1s. Voor de Brouwersdam is T_p gestegen van 8s naar 9-11s.

9.3 Duinen

9.3.1. Hollandse kust en Waddengebied

Tabel 8.4 in paragraaf 8.2.4 geeft het overzicht van de resulterende hydraulische randvoorwaarden van de 5 hoofdlocaties waarvoor in eerste instantie de rekenresultaten voor duinen berekend zijn. Voor de overige duinraaien worden de randvoorwaarden bepaald op basis van ruimtelijke interpolatie tussen deze locaties. De resultaten van die interpolatie voor deze regio (nr. 5) leiden tot de resultaten in de langsfiguren (Figuur C.14-C.16) in bijlage C.

Tabel 9.5 toont de randvoorwaarden uit HR2001 voor dezelfde locaties. Hier zijn de getoonde randvoorwaarden van Eierlandse Gat en Borkum in werkelijkheid waarden die in HR2001 vermeld staan bij raai 1901 op Texel respectievelijk raai 1000 op Schiermonnikoog.

Tabel 9.5 Randvoorwaarden HR2001 in 5 locaties

locatie	waterstand (m+NAP)	golfhoogte (m)	piekperiode (s)
Hoek van Holland	5.60	8.4	12
IJmuiden	5.70	8.5	12
Den Helder	4.80	9.6	12
Eierlandse Gat ¹	4.35	9.5	12
Borkum ²	4.60	8.9	12
1 getallen van Texel, raai 1901			
2 getallen van raai Schiermonnikoog 1000			

Taeb1 9.6 toont de verschillen tussen HR2006 en HR2001 voor de 5 hoofdstations. Daaruit blijkt dat de rekenpeilen nagenoeg onveranderd zijn gebleven, dat de golfhoogten met uitzondering van locatie Hoek van

Holland zijn gestegen en dat de piekperioden vooral voor noordelijke locaties fors zijn gestegen. Dit is ook te zien in Figuur C.15 (bijlage C). Met name de grote daling van de golfhoogte in locatie Hoek van Holland valt op. Als gevolg van deze daling daalt ook de piekperiode. Dit is tegen de heersende verwachting in; er is juist geanticipeerd op een stijging in de golfperiode. Vanwege de toepassing van interpolatie heeft deze daling gevolgen voor het hele traject tussen Hoek van Holland en IJmuiden wat goed te zien is in Figuur C.16 (bijlage C).

Bij de overige locaties vertoont de piekperiode wel een sterke stijging ten opzichte van HR2001. In HR2001 was de piekperiode voor alle locaties langs de Hollandse kust en Waddenkust gelijk aan 12 s. Wat betreft de te verwachten golfbelasting voor duinen is te verwachten dat deze toe gaat nemen voor de duinen ten noorden van Scheveningen.

Tabel 9.6 Verschil in randvoorwaarden: HR2006-HR2001.

locatie	waterstand (m+NAP)	golfhoogte (m)	piekperiode (s)
Hoek van Holland	0	-0.69	0.29
IJmuiden	0	0.75	4.03
Den Helder	0	0.87	4.27
Eierlandse Gat	-0.05	1.45	4.93
Borkum	0	1.72	7.38

9.3.2. Duinen in Zeeland

De Figuren C.17-C.19 van bijlage C tonen de resulterende hydraulische randvoorwaarden voor regio 6. De langsfiguren geven de resultaten voor de dijkvakken langs de koppen van de eilanden ten zuiden van de Maasvlakte voor respectievelijk Voorne, Goeree, Schouwen-Duiveland, Walcheren en Zeeuws Vlaanderen. Voor de kust van Voorne en Goeree bleek in eerste instantie een aantal uitschieters voor te komen in de golfhoogte die te wijten waren aan een afwijkende ligging van de locatie waar met SWAN gegevens zijn berekend (zie paragraaf 8.3.2). Daarop zijn deze vervangen door golfhoogtes die zijn verkregen op basis van interpolatie of extrapolatie van golfhoogtes op naastgelegen raaien. Verder is een ruimtelijk filter toegepast op de golfhoogtes over de raaien die in één dijkkring liggen. Figuur C.18 bevat de resultaten ná uitvoering van deze correcties.

Het gebruik van HYDRA-K en SWAN betekent qua methodologie een verbetering ten opzichte van de oude aanpak die in HR2001 is gebruikt. Het algemene beeld is dat de significante golfhoogtes voor HR2006 lager zijn dan voor HR2001 en dat de piekperiode significant groter wordt (12.1 –12.4 s in 2006 ten opzichte van 8s in 2001). Het laatste komt rechtstreeks voort uit de vernieuwde golfstatistiek in

Europatform en Scheur-West²² (WL, 2004) die voor maatgevende condities veel hoger ligt dan de 8 s die in HR2001 voor alle locaties werd toegepast.

Het ruimtelijk verloop van de golfhoogte langs de raaien is voor HR2006 over het algemeen iets grilliger dan voor HR2001. Dit wordt in de eerste plaats veroorzaakt doordat met de 2D berekeningen die in het kader van HR2006 zijn uitgevoerd de werkelijke bodem wordt beschouwd in plaats van een geschematiseerde bodem, zoals voor HR2001. Een andere oorzaak ligt in het feit dat met het golfmodel SWAN in het kader van HR2006 relevante processen als refractie, golfbreken en niet-lineaire wisselwerkingen tussen golven nauwkeuriger gemodelleerd zijn dan in het kader van HR2001 is gedaan.

De golfhoogten bij Schouwen, Goeree en Voorne zijn relatief sterk gedaald ten opzichte van de HR2001. De golfhoogtes bij deze eilanden zijn in HR2001 bepaald op basis van lineaire golftheorie en het breker criterium van Koel , uitgaande van een golfhoogte boven de Hinderplaat en de Oosterplaat. De golfhoogte is dan geheel gekoppeld aan de diepte boven de plaat. Deze diepte is over het algemeen groter dan de diepte ter plaatse van de meest kustwaarts gelegen brekerlijn, hetgeen geleid heeft tot hogere waarde van de golfhoogte. Verder geldt dat in het kader van HR2001 voor Voorne en Goeree refractie niet is meegenomen.

Voor de kust van Walcheren zijn de uiteindelijke golfrandvoorwaarden voor 2001 en 2006 vergelijkbaar. Voor HR2001 is echter alleen een windrichting van 315 °N beschouwd. Voor deze windrichting leidt de nieuwe aanpak tot lagere waarden aan de zuidkant van Walcheren en blijkt een westenwind te leiden tot vergelijkbare golfhoogtes als bepaald voor HR2001 met een noordwestenwind. Het vermoeden bestaat dat het lokale verschil van ongeveer 1 m wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van het Oostgat. Met name lange golven refracteren uit deze geul en dissiperen op het ondiepe deel buiten de geul. Daarnaast zorgt de Vlake van Raan, zeewaarts van het Oostgat, voor dissipatie. Beide aspecten zijn niet beschouwd in het kader van HR2001. Voor Zeeuws-Vlaanderen zorgt het niet in rekening brengen van diepte-ge nduceerd breken op de Vlake van Raan in (WWKZ-84.V319P) voor een overschatting van de golfhoogte ten opzichte van de voor HR2006 bepaalde golfhoogtes.

²² Voor Scheur-West is alleen de golfperiode uit de statistiek gebruikt en niet de golfhoogte.

10. Vergelijking van HR2006 met CRASH-actie

10.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft de analyse van de vergelijking van HR2006 met de CRASH-actie uit 2002/2003. De vergelijking van HR2006 met de daaraan voorafgaande randvoorwaarden van HR2001 is al gegeven in hoofdstuk 9.

In 2002/2003 hebben DWW en RIKZ een CRASH-actie uitgevoerd, waarin voor 8 locaties de hydraulische randvoorwaarden zijn berekend (RIKZ, 2002; DWW, 2002a; DWW, 2002b; DWW, 2003). Deze CRASH-actie is uitgevoerd naar aanleiding van het TAW advies (brief TAW 02-78). In het advies wordt vermeld dat de golfaanval op de kust zwaarder is dan is opgenomen in de vigerende HR2001, zodat er aan de kust mogelijk sprake is van een veiligheidsprobleem. Naar aanleiding van de CRASH-actie zijn aanvullende beheersoordelen opgesteld en een aantal noodmaatregelen uitgevoerd. Tevens dient het als uitgangspunt van de voorontwerpfase van de “zwakke schakels” langs de kust.

10.2 Vergelijking HR2006 harde waterkeringen met de CRASH-actie

10.2.1. Inleiding

De rekenmethode in het kader van HR2006 is enigszins aangepast ten opzichte van die in de CRASH-actie. Enkele uitgangspunten, keuzes en instellingen zijn gewijzigd en de gebruikte software is verder ontwikkeld. Daarom is in (RIKZ, 2006c) een studie uitgevoerd om de verschillen tussen de CRASH-actie en HR2006 te kwantificeren en te analyseren.

10.2.2. Opzet analyse

In de eerste plaats zijn de rekenresultaten van de CRASH-actie, voor zover mogelijk, gereproduceerd. Vervolgens is stap voor stap één aspect veranderd conform de huidige instellingen, zodat het effect van dat specifieke aspect op de berekende hydraulische randvoorwaarden inzichtelijk wordt. De stappen die zijn genomen in de verschilanalyse zijn te clusteren in twee groepen:

1. wijzigingen in de probabilistische rekenmethode (HYDRA-K);
2. wijzigingen in de invoer en rekeninstellingen van het golfmodel SWAN.

In de analyse is de invoer zoveel mogelijk gelijk gehouden, zodat de waargenomen verschillen in resulterende hydraulische randvoorwaarden alleen worden veroorzaakt door veranderingen in de rekenmethode en uitgangspunten. Met ‘invoer’ doelen we bijvoorbeeld

op het dijkprofiel en de locatie van het uitvoerpunt van de hydraulische randvoorwaarde.

Het golfmodel SWAN maakt een vertaling van de golfcondities op diep water naar locaties vlak voor de kust. In vergelijking met de CRASH-actie zijn in het kader van de HR2006 meerdere veranderingen doorgevoerd, bijvoorbeeld in de bodemdiepte (bathymetrie). In de HR2006 is gebruik gemaakt van een nabij de kust gemiddelde bodem over een periode van 10 jaar (voor de Hollandse kust), terwijl in de CRASH-actie een momentopname is gebruikt (bodem uit 1995). Verder zijn enkele rekeninstellingen van SWAN aangepast. In HR2006 worden géén triads meegenomen en wordt de formulering volgens Rogers (2002) voor de whitecapping toegepast. Dit leidt tot correcties voor een overschatting van golfperiodes waar deze voorheen juist waren voor een onderschatting. Ook werden in de HR2006 nieuwe diepwaterrandvoorwaarden voor SWAN afgeleid op basis van langere meetseries met in het algemeen hogere golfhoogtes. Tenslotte zijn kleinere correctiefactoren toegepast op de, met SWAN berekende, golfhoogte H_s (zie hoofdstuk 6 voor een overzicht en motivatie van de aanpassingen aan de invoer en rekeninstellingen van SWAN).

De versie van HYDRA-K waarmee in het kader van de HR2006 de randvoorwaarden zijn bepaald verschilt op een aantal onderdelen van de versie die tijdens de CRASH-actie is gebruikt. Zo is bijvoorbeeld de mogelijkheid toegevoegd om de golfperiode ook als stochastische variabele mee te nemen (naast de wind en de waterstand) en deze optie is voor de Hollandse kust toegepast.

10.2.3. Resultaten

Tabel 10.1 en Tabel 10.2 tonen de resultaten van de golfhoogte H_s respectievelijk periodemaat $T_{m-1,0}$ voor 4 van de 8 locaties waarvoor in (RIKZ, 2006c) de vergelijking is gemaakt tussen HR2006 en de CRASH-actie. De eerste 2 stations liggen aan de Hollandse kust en de laatste 2 aan de Zeeuwse kust.

Tabel 10.1 Vergelijking tussen de CRASH-actie en HR2006 voor de golfhoogte H_s (m)

	Den Helder	Petten	Westkapelle	Eilanddijk
CRASH-actie	3,1	3,2	4,2	1,7
HR2006	3,0	3,9	4,5	1,6
verschil	-0,1	0,7	0,3	-0,1

Tabel 10.2 Vergelijking tussen de CRASH-actie en HR2006 voor periodemaat $T_{m-1,0}$ (s).

	Den Helder	Petten	Westkapelle	Eilanddijk
CRASH-actie	9,0	13,4	10,6	6,3
HR2006	7,6	12,1	9,5	5,9
verschil	-1,4	-1,3	-1,1	-0,4

In vergelijking met de CRASH-actie is sprake van een lichte daling in de golfhoogte in Den Helder en Eilanddijk, terwijl in Petten en Westkapelle juist sprake is van een stijging. De toename bij Petten wordt veroorzaakt door de aanpassingen aan het golfmodel SWAN (bodem en de rekeninstellingen). De gemiddelde bodem (HR2006) ligt lager dan de bodem in 1995 (CRASH-actie) wat resulteert in een hogere golfhoogte. Ook het uitschakelen van de triad-wisselwerking leidt tot hogere golfhoogtes.

In Westkapelle (Zeeland) wordt de stijging van golfhoogte veroorzaakt door de gewijzigde correctiefactoren en niet door gewijzigde modelinstellingen. Tijdens de CRASH-actie is de golfhoogte niet gecorrigeerd, terwijl uit metingen bleek dat de golfhoogte door SWAN in dat gebied met de gehanteerde modelinstellingen destijds werd onderschat (Gautier, 2003; RIKZ, 2003; Alkyon, 2004a).

In Den Helder sorteren de gewijzigde bodemdiepte en de aangepaste rekeninstellingen weinig effect, wat resulteert in een vrijwel gelijke golfhoogte. Bij Eilanddijk heeft de correctiefactor (een vermenigvuldigingsfactor) nauwelijks invloed door de lage absolute waarde van de golfhoogte.

Voor Zeeland daalt de periodemaat $T_{m-1,0}$ in iedere locatie in vergelijking met de CRASH-actie. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de aangepaste correctiefactoren van SWAN-resultaten. In de CRASH-actie was de correctiefactor als eerste schatting gezet op 1.2 terwijl deze later in een studie voor HR2006 per locatie is bepaald en gemiddeld ongeveer 1.1 is (WL, 2005c).

In Den Helder en Petten leiden de gewijzigde rekeninstellingen van SWAN juist wel tot een significante stijging van de $T_{m-1,0}$, maar door gewijzigde correcties resulteert netto nog altijd een daling in deze locaties.

Over het algemeen kan gesteld worden dat de verschillen met de CRASH-actie hoofdzakelijk veroorzaakt worden door wijzigingen in de transformatiematrix van golven van de diep water naar de kust (o.a. door de gewijzigde instellingen van het golfmodel SWAN voor de Hollandse kust, en de gewijzigde correctiefactoren voor de Zeeuwse kust). De aanpassingen aan HYDRA-K hebben over het algemeen geen significante invloed.

10.3 Vergelijking HR2006 Duinen met de CRASH-actie

In 2002 heeft de TAW de Staatssecretaris van V&W aangegeven (brief TAW 02-78) dat de golfaanval op onze kust zwaarder is dan verwacht op grond van de vigerende Hydraulische Randvoorwaarden. Naar aanleiding van dit advies en de achterliggende analyse hebben DWW en RIKZ middels een 'quick scan' een landsdekkend beeld te geven van de verwachte effecten van de zwaardere golfbelastingen (DWW, 2003). In deze quickscan zijn de afslagvolumes op basis van de randvoorwaarden uit HR2001 en een vigerende rekenprocedure voor duinafslag afgeleid uit de leidraad duinafslag (TAW, 1984).

In onderstaande Tabellen worden de hydraulische randvoorwaarden in 5 stations vergeleken tussen de CRASH-actie en HR2006 (WL, 2006b; WL, 2006c). De rekenpeilen zijn ongeveer gelijk gebleven (Tabel 10.3). De golfhoogtes (Tabel 10.4) zijn toegenomen (uitgezonderd Hoek van Holland) en de piekperiodes (Tabel 10.5) zijn fors toegenomen (uitgezonderd Hoek van Holland).

Tabel 10.3 Waterstanden (rekenpeilen)

Station	CRASH	HR2006
Hoek van Holland	5.6	5.6
IJmuiden	5.7	5.7
Den Helder	4.8	4.8
Eierlandse Gat	4.35	4.3
Borkum	4.6	4.6

Tabel 10.4 Golfhoogtes H_{m0} (m).

Station	CRASH	HR2006
Hoek van Holland	8.4	7.71
IJmuiden	8.5	9.25
Den Helder	9.6	10.47
Eierlandse Gat	9.5	10.95
Borkum	8.9	10.62

Tabel 10.5 Piekperiodes T_{pm} (s).

Station	CRASH	HR2006
Hoek van Holland	12	12.29
IJmuiden	12	16.03
Den Helder	12	16.27
Eierlandse Gat	12	16.93
Borkum	12	19.38

11. Samenvatting

11.1 Kader

Vanaf januari 1996 is de nieuwe "Wet op de Waterkering" van kracht (WOW, 2002). Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat er iedere vijf jaar door de beheerders een toetsing op veiligheid moet plaatsvinden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Voor het toetsen op veiligheid is door het ministerie van Verkeer en Waterstaat een voorschrift uitgebracht: "Voorschrift Toetsen op Veiligheid" (VTV '04). Het geeft aan hoe de toetsing moet worden uitgevoerd om de veiligheid van de waterkeringen te kunnen beoordelen.

Om de toetsing te kunnen uitvoeren moeten tevens de hydraulische randvoorwaarden bekend zijn. In de Wet op de Waterkering (WOW, 2002) wordt de minister van Verkeer en Waterstaat opgedragen deze beschikbaar te stellen. Bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden wordt de wettelijke norm voor de veiligheid verdisconteerd. De hydraulische randvoorwaarden worden elke vijf jaar vastgesteld en gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen" (HR). De eerste versie van het randvoorwaardenboek is gepubliceerd in 1996, het thans geldende randvoorwaardenboek is vastgesteld en uitgekomen in 2001. Voorliggend rapport dient ter voorbereiding op de eerstvolgende versie (HR2006).

Eén van de deelsystemen waarvoor randvoorwaarden moeten worden afgeleid zijn de zoute wateren. Meer specifiek zijn dat de Westerschelde, de Oosterschelde, de Waddenkust, de Zeeuwse Noordzeekust en de Hollandse kust. De hydraulische randvoorwaarden voor deze wateren bestaan voor elk locatie uit een combinatie van de waterstand en enkele relevante golfkarakteristieken (golfhoogte, golfperiode, golfrichting). Dit rapport beschrijft de totstandkoming van de hydraulische randvoorwaarden langs de Nederlandse kust voor HR2006 met als doelstellingen:

- Verantwoording afleggen over de kwaliteit en betrouwbaarheid van de gevolgde aanpak;
- Opgedane kennis toegankelijk maken middels een naslagwerk voor vervolgprojecten als HR2011 e.a.

11.2 Uitgangspunten

Een belangrijk uitgangspunt bij het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden is dat alleen de intrinsieke onzekerheden worden beschouwd. Dit zijn onzekerheden die voortkomen uit de natuur zelf, zoals de kans dat een stormvloed een zeker peil overschrijdt. Zowel statistische onzekerheid als onzekerheid in de waterbewegings- en golfmodellen worden niet in de beschouwing betrokken.

Een tweede uitgangspunt is dat er waarden worden afgeleid die zo goed mogelijk de verwachtingswaarde voor de *komende toetsperiode* weergeven. Daarmee kan een zuiver oordeel worden geveld of de waterkering ten tijde van de toetsing nog voldoende veiligheid biedt.

Een derde uitgangspunt is het hanteren van de zogenaamde thermometergedachte: Er wordt een “foto” genomen van het systeem, waarbij deze representatief verondersteld wordt te zijn voor de periode van de navolgende toetsperiode. Voor bijvoorbeeld de waterstand is in verband met de zeespiegelstijging het peiljaar 2011 gekozen, ofwel het laatste jaar van de toetsronde waartoe het randvoorwaardenboek 2006 is samengesteld.

Een vierde uitgangspunt is het verschil in toetsingsmethodiek van duinen en dijken, dat mede is ingegeven door het feit dat er bij een juist ‘veilig’ duin nagenoeg geen reststerkte is, terwijl voor een dijk die juist veilig is altijd nog reststerkte aanwezig is. In de WoW wordt geëist dat er bij maatgevende omstandigheden nog ‘veilig’ gekeerd moet kunnen worden. Voor dijken wordt impliciet de reststerkte ingevuld zonder die overigens te kwantificeren. Voor duinen is voor de keuze van ‘veilig’ wel een keuze gemaakt door een 10-maal lagere normfrequentie te kiezen. Een uitgangspunt voor de harde kering is dus dat de reststerkte van de kering na bezwijken niet in de veiligheidsnorm is meegenomen en dat de hydraulische randvoorwaarde dus representatief moeten zijn voor een normfrequentie van 10^{-4} per jaar.

Specifiek voor duinwaterkeringen geldt nog een extra uitgangspunt: de rekenregel voor de veiligheid van duinwaterkeringen wordt medio 2006 gewijzigd, met name om de effecten van de golfperiode in rekening te brengen. In het kader van HR2006 is het niet mogelijk geweest om kansberekeningen uit te voeren met de nieuwe rekenregel. Daarom zijn de uitgangspunten ten aanzien van de rekenwaarden voor de belastingkant gebruikt uit (TAW, 1984). De resulterende randvoorwaarden van HR2006 kunnen ten behoeve van de toetsing overigens wél gewoon als invoer dienen van de nieuwe rekenregel zodra deze gereed is.

11.3 Methode bepaling hydraulische randvoorwaarden

11.3.1. Inleiding

Bij het vaststellen van de hydraulische randvoorwaarden langs de kust en estuaria is gekozen voor een zogenoemde “probabilistische aanpak”. Deze keuze is ingegeven door het feit dat de veiligheidsnorm is uitgedrukt in een jaarlijkse overstromingskans.

In de probabilistische rekenexercitie wordt eerst een kansberekening uitgevoerd voor het mogelijk falen van een waterkering. Bij een dergelijke kansberekening wordt voor vele mogelijke combinaties van hydraulische condities de kans van voorkomen bepaald en tevens wordt vastgesteld of deze condities aanleiding geven tot falen van de kering. Vervolgens wordt ten behoeve van de HR2006 uit deze

verzameling van mogelijke belastingen een *representatieve* combinatie van waterstand en golven bepaald.

Om de faalkans van de kering te bepalen is voor elke dijkvak en elke duinraai statistiek nodig van de waterstand en golfcondities. Het is echter niet realistisch om op elk van deze locaties metingen te verrichten. De basis van het probabilistisch model bestaat daarom uit de statistiek op (relatief) *diep water*, ongeveer rond de N.A.P.-20m lijn. De variatie in golfcondities langs deze lijn is relatief gering omdat de bodem hier nog nauwelijks invloed heeft. Daarom kan volstaan worden met metingen in vijf golfmeetstations. De statistiek van de *waterstand* is beschikbaar voor enkele meetlocaties langs de kust. De waterstand voor een willekeurige waterkering wordt daarom bepaald op basis van interpolatie tussen waterstanden in nabijgelegen meetstations.

Verschillen aanpak harde waterkeringen en duinen

De invulling van de methode ter bepaling van de hydraulische randvoorwaarden is voor harde waterkeringen fundamenteel anders dan voor duinen. Omdat de werkwijze verschilt worden harde waterkeringen en duinen, net als in het verleden, in de HR2006 apart behandeld.

11.3.2. Methode voor de harde waterkeringen

Voor harde waterkeringen zijn de hydraulische randvoorwaarden bepaald aan de teen van de kering. Om te bepalen of een harde waterkering faalt is nodig:

1. de statistiek op diep water: marginale (individuele) statistiek van de wind, de waterstand en golfparameters en meerdimensionale extreme-waardenstatistiek waarmee de onderlinge afhankelijkheid van deze variabelen wordt beschreven. Deze statistiek is afgeleid uit metingen van een set geselecteerde stormen;
2. de vertaling van de hydraulische condities van diep water naar ondiep water nabij de kering; en
3. de betrouwbaarheidsfunctie, d.w.z. het model dat de sterkte van de kering vergelijkt met de belasting.

De eerste twee onderdelen vormen samen het (probabilistische) model voor de hydraulische belasting, de derde is het (deterministische) sterktemodel. De rekenmethode is geïmplementeerd in het rekenprogramma HYDRA-K.

Afhankelijkheid tussen de parameters

Behalve de marginale statistiek is ook een beschrijving nodig van de onderlinge samenhang tussen de diverse variabelen, de zogenaamde “gecombineerde statistiek”. Het feit dat (extreem) hoge waterstanden en (extreem) hoge golven aan de kust in de regel samen vallen maakt namelijk dat de faalkans van een kering groter is dan wanneer deze twee fenomenen onafhankelijk zouden zijn. Voor *harde waterkeringen* is deze samenhang in de berekening betrokken met een zogenaamde niet-parameterische methode: de methode De Haan. Hierbij wordt

direct gebruik gemaakt wordt van een reeks van simultane waarnemingen om de onderlinge samenhang van de stochasten te modelleren. Dit heeft als voordeel dat er geen functiebeschrijving nodig is van de gezamenlijk kansverdeling van de betrokken stochasten.

Vertaling van diep water naar ondiep water

De randvoorwaarden voor harde waterkeringen worden beschikbaar gesteld op de locatie direct voor de kering. Echter, de statistiek van *golven* is alleen beschikbaar voor enkele meetlocaties op diep water. Daarom is er een vertaalslag nodig van diep water naar het ondiepe water voor de waterkering. Deze vertaalslag is gemaakt met het golfmodel SWAN.

Voor de *Hollandse kust* is hiertoe een transformatiematrix bepaald op basis van een grote set van nieuwe SWAN berekeningen.

Voor de *estuaria van de Oosterscheld en de Westerschelde en de Zeeuwse Noordzeekust* is de transformatie van golfparameters van diep naar ondiep water in HYDRA-K afgeleid uit SWAN berekeningen die ten behoeve van het ontwerp van de dijkbekleding zijn gemaakt. Deze kunnen leiden tot iets robuustere randvoorwaarden aangezien de bodemligging verdiept is voor ontwikkelingen gedurende de komende 75 jaar. Voor de Oosterscheldekering is een beperkte set van nieuwe SWAN-berekeningen gebruikt voor de transformatie van diep naar ondiep water.

Het gebruik van HYDRA-K en SWAN is een verbetering ten opzichte van de oude aanpak, waarvan de resultaten in HR2001 zijn opgenomen.

Betrouwbaarheidsfuncties

Voor *harde waterkeringen* zijn binnen het rekenprogramma HYDRA-K diverse wiskundige formulerings (betrouwbaarheidsfuncties) van faalmechanismen geïmplementeerd. Op basis daarvan kan bepaald worden tegen welke hydraulische randvoorwaarden de kering wel/niet bestand is. De formulerings zijn grotendeels overgenomen uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV, '04) of daarop gebaseerd. In het huidige rapport worden alleen de hydraulische randvoorwaarden voor het faalmechanisme golfoverslag gepresenteerd. Kenmerkend voor de bepaling van deze faalkans in HR2006 is het gebruik van de periodemaat $T_{m-1,0}$.

11.3.3. Methode voor duinen

De betrouwbaarheidsfunctie uit de VTV (2004) vraagt om de hydraulische randvoorwaarden op diep water, (die voor dijken vraagt om de randvoorwaarden aan de teen van de dijk). Voor duinen wordt de belasting op N.A.P. -20m representatief geacht voor de belasting op de zachte kering. De benodigde punten voor duinen zijn daarom alleen de punten 1 en 3 uit paragraaf 11.3.2.

Voor de Zeeuwse duinen, echter, wordt door de ligging van de Voordelta de vertaalslag uit stap 2 wel toegepast. Daar worden de golfparameters zeewaarts van de laatste brekerzone representatief geacht voor de belasting van de kering.

Voor *duinen* zijn in het kader van (TAW, 1984) probabilistische berekeningen met numerieke integratie uitgevoerd. Op basis van die berekeningen is het *rekenpeil* als maatgevende randvoorwaarde van de waterstand gekozen. Het rekenpeil is gelijk aan 2/3 maal de decimeringshoogte boven het zogenaamde ontwerppeil (de waterstand met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de veiligheidsnorm). Deze keuze is in het kader van HR2006 overgenomen. Verder zijn bij het rekenpeil behorende verwachtingswaarden van de golfcondities op diep water (-20 m NAP) bepaald.

Afhankelijkheid van de parameters

Voor *duinen* is een empirische relatie afgeleid tussen waterstand en de golfhoogte waarbij direct met de gecombineerde randvoorwaarden gerekend wordt vanaf de dieptelijn NAP – 20 m. De gekozen aanpak is gebaseerd op een empirisch bepaald verband tussen waterstand en golfhoogte met als doel dat de marginale verdelingsfunctie voor duinen gelijk is aan die voor de dijken.

In het nieuw op te stellen Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) speelt de *piekperiode* wél een rol van betekenis bij het bepalen van het faalmechanisme *duinafslag*, in tegenstelling tot de leidraad uit 1984 (TAW 1984) die gebruikt is voor de HR2001. Mede met het oog op de nieuwe rekenregel wordt in het kader van de HR2006 de piekperiode per locatie afgeleid en niet, zoals in HR2001, overal gelijk gesteld aan 12 s (Waddenzee en Hollandse kust) of 8 s (Zeeland). De piekperiode voor HR2006 wordt rechtstreeks gekoppeld aan de golfhoogte op basis van “volledige correlatie”. Dat betekent dat de golfhoogte met een overschrijdingsfrequentie van, bijvoorbeeld, 1/1000 per jaar gekoppeld is aan de piekperiode met dezelfde overschrijdingsfrequentie van 1/1000 per jaar (op basis van beider marginale verdelingsfuncties).

Afwijkende aanpak voor Zeeuwse kust

Voor de *Zeeuwse kust* zijn vanwege de aanwezigheid van geulen, banken en ondiepe voorlanden de parameterwaarden op de -20m lijn niet representatief voor de golfaanval op de zachte waterkering. Voor elke duinraai bij Zeeland afzonderlijk is daarom een locatie op zee bepaald die representatieve hydraulische randvoorwaarden oplevert voor duinaanval. Concreet betekent dit dat dié locatie gekozen is waar de golfhoogte, lopend vanaf het strand zeewaarts, niet meer toeneemt. De golfparameters op die locatie worden afgeleid uit de golfparameters op diep water middels een transformatie met het golfmodel SWAN. Hiervoor zijn nieuwe SWAN berekeningen gebruikt op basis van dezelfde modelinstellingen voor de harde waterkeringen aan de Hollandse kust.

11.4 Consequenties voor de nieuwe randvoorwaarden

11.4.1. Harde keringen, HR2006 vs HR2001

Zeeuwse Delta

Voor de *Oosterschelde* zijn de nieuwe toetspeilen nauwelijks veranderd ten opzichte van de toetspeilen uit HR2001. Ten aanzien van de golfhoogte zijn er relatief veel verschillen met de HR2001. Het verloop voor de HR2006 is grilliger dan dat voor de HR2001, al komen de grote lijnen goed overeen.

De toetspeilen voor de *Westerschelde* zijn veranderd ten opzichte van de toetspeilen voor de HR2001. In de HR2001 zijn soms 'onzuivere' toetspeilen opgenomen. Voor de HR2006 is het verloop veel gelijkmatiger. De golfhoogte is voor de meeste locaties gedaald. Over het algemeen is de daling minder dan 1 m, maar er zitten uitschieters bij van meer dan 2 m. Ook de golfperiode is voor de meeste locaties gedaald.

Voor de *verbindende keringen in de Zeeuwse Delta* zijn in het algemeen de golfhoogte en golfperiode lager dan in HR2001.

Hollandse Kust

Voor de Hollandse kust is de transformatie van golfparameters van diep naar ondiep water in HYDRA-K afgeleid uit nieuwe SWAN berekeningen waarbij is uitgegaan van de gemiddelde bodemligging in de laatste 10 jaar (verwachtingswaarde). Deze keuze geeft een statistisch goed beeld maar vormt ook een bron van verschillen van de golf Randvoorwaarden ten opzichte van HR2001.

Voor de Hollandse kust zijn er grote verschillen tussen de HR2001 en HR2006. Dit geldt niet voor de toetspeilen (die zijn nagenoeg gelijk gebleven) maar vooral voor de golfcondities. De golfhoogte is bij een aantal locaties bij de Helderse zeewering gezakt van ruim 5 meter naar zo'n 2,5 tot 3 meter en bij de Haringvlietdam van 3 à 4 meter naar orde 2 meter. De golfperiode laat een wisselend beeld zien. Bij de Helderse zeewering is deze sterk gedaald, maar bij de Pettemer- en Hondsbossche zeewering is deze juist sterk gestegen. De Haringvlietdam laat over het algemeen weer een daling zien.

Waddenzee

Voor de Waddenzee is het golfmodel SWAN niet aantoonbaar betrouwbaar. Nadere metingen zijn nodig om SWAN voor de Waddenzee te ijken. Om die reden zijn in HR2006 de randvoorwaarden voor dijken in het Waddengebied niet bepaald met HYDRA-K maar zijn deze gebaseerd op de meest recente ontwerpwaarden die, merendeels, ook in HR2001 en HR1996 zijn toegepast. Er is hier geen fundamentele verbetering ten opzichte van de aanpak die in HR2001 is gebruikt zij het dat de hydraulische randvoorwaarden van Groningen (dijkring 6) nu consistent zijn met die van Friesland (dijkring 6) en daardoor toenemen ten opzichte van HR2001.

Voor de Waddenzee ligt het toetspeil gemiddeld genomen ongeveer 5 centimeter hoger in vergelijking met HR2001, als gevolg van het in rekening brengen van de zeespiegelstijging. Voor de golfhoogte zijn de verschillen minder structureel. Voor het merendeel van de dijkvakken, zo'n 60%, is deze gelijk gebleven. Voor de overige circa 40% van de dijkvakken zijn andere waarden opgenomen die gemiddeld zo'n 15 centimeter hoger zijn. De grootste verschillen treden op bij dijkkring 12 (Wieringen) waar de golfhoogte op enkele locaties toeneemt van 0,50 meter naar 2,20 meter. Verder neemt de golfhoogte opvallend veel toe voor de Waddenkust van Groningen.

11.4.2. Duinen, HR2006 vs HR2001

Hollandse kust

De rekenpeilen voor duinen zijn nagenoeg hetzelfde gebleven. Langs de gehele Hollandse kust is er sprake van een hogere golfhoogte dan in de HR2001, behalve in de buurt van Hoek van Holland. Nabij Hoek van Holland daalt ook de golfperiode, maar meer naar het noorden toe is er juist sprake van een stijging. Wat betreft de te verwachten golfbelasting voor duinen is mogelijk te verwachten dat deze toe gaat nemen voor de duinen ten noorden van Scheveningen.

Waddenzee

Langs de *Waddenzee* is er sprake van een sterke stijging van de golfperiode, die in HR2001 overal nog gelijk was aan 12 s. Ook de golfhoogte stijgt sterk in vergelijking met HR2001.

Zeeland

Voor de *Zeeuwse duinenkust* is het algemene beeld dat de golfhoogte voor HR2006 gedaald is ten opzichte van de HR2001 en dat de piekperiode juist significant gestegen is ten opzichte van de 8 s die in HR2001 voor alle locaties werd toegepast. Het ruimtelijk verloop van de golfhoogte langs de raaian is voor HR2006 over het algemeen iets grilliger dan voor HR2001.

11.4.3. HR2006 vs CRASH-actie

In 2002/2003 hebben DWW en RIKZ een CRASH-actie uitgevoerd, waarin voor 8 locaties de hydraulische randvoorwaarden zijn berekend. Naar aanleiding van de CRASH-actie zijn aanvullende beheersoordelen en een aantal noodmaatregelen uitgevoerd. Tevens dient het resultaat ervan als uitgangspunt van de voorontwerpfase voor herstel van de "zwakke schakels" langs de kust.

Voor de *harde keringen* zijn de toetspeilen van HR2006 in vergelijking met de CRASH-actie gelijk gebleven, is de periodemaat $T_{m-1,0}$ ruwweg 1 s afgenomen en is de golfhoogte iets toegenomen.

Voor de *duinen langs de Hollandse kust en Waddenzee* zijn de rekenpeilen van HR2006 in vergelijking met de CRASH-actie gelijk gebleven en is de golfhoogte toegenomen uitgezonderd Hoek van Holland waar deze iets is afgenomen. De piekperiode T_p is daarbij fors toegenomen (van 12s naar 16-19s) uitgezonderd voor Hoek van Holland waar geen toename is.

Voor de HR2006 is een aantal nieuwe methodieken toegepast om te komen tot betrouwbare hydraulische randvoorwaarden voor de zoute wateren. Deze methodieken gaan uit van een probabilistische aanpak en een derde-generatie golfmodel voor vertaling van golfparameters op diep water naar ondiep water. Gegeven deze nieuwe aanpak kan gesteld worden dat de HR2006 betrouwbaarder zijn dan de HR2001. Voor de Waddenzee is er echter nog geen fundamentele verbetering ten opzichte van de HR2001 bereikt aangezien het golfmodel SWAN hier nog niet kan worden toegepast.

Ten opzichte van de HR2001 wordt in sommige gevallen een lagere hydraulische belasting gevonden, bv voor duinen tussen Hoek van Holland en Scheveningen. Voor de overige duinen van de Hollandse kust en Wadden is de golfbelasting echter fors toegenomen.

12. Referenties

- Alkyon, 2003, Calibration of SWAN 40.20 for field cases Petten, Sloterveer, and Westerschelde. Report A1168, December 2003.
- Alkyon, 2004a: Hindcast Petten and Westerschelde with SWAN 40.20, Period correction SWAN 40.20. March 2004.
- Alkyon, 2005a: Analysis SWAN correction. Phase 3: SWAN correction factors based on hindcast Petten, and Petten wave flume experiments with SWAN 40.41. Alkyon report A1200, August 2005 (G. Ph. van Vledder).
- Alkyon, 2005b: Herstructureren CD-ROM's Westerschelde, Oosterschelde, Waddenzee, Hollandse kust. Alkyon rapport A1479, in opdracht van Rijkswaterstaat/RIKZ, september 2005.
- Argoss, 2004: Toetsing van asymptotische afhankelijkheid van windsnelheid van golfhoogte, golfperiode en waterstand op drie locaties voor de Hollandse kust. ARGOSS rapport A461, in opdracht van Rijkswaterstaat/RIKZ, december 2004.
- Argoss, 2006: Onderzoek naar de mate van afhankelijkheid van hydraulische parameters ten behoeve van HYDRA-K, ARGOSS rapport A500, in opdracht van Rijkswaterstaat/RIKZ, juli 2006.
- Battjes, J. A., 1970: Long-term wave height distribution at seven stations around the British isles, Department of Civil Engineering, Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, 1970.
- Booij, N., R.C. Ris, and L.H. Holthuijsen, 1999: A third generation wave prediction model for coastal regions. Part I: Model description and validation. J. Geophys. Res., 104 (C4), 7649-7666.
- De Haan, L. en Resnick, S.I., 1977: *Limit theory for multivariate sample extremes*, Z. Warscheinlichkeitstheorie verw. Gebiete 40, 317-337.
- De Valk, C.F. 1996: *Estimation of the frequencies of failure of coastal structures from offshore data of environmental loads*, WL-rapport H 2240.
- Den Heijer, F., Diermanse, F.L.M. and Van Gelder, P.H.A.J.M., 2005: extreme wave statistics using regional frequency analysis, In: Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics, IAHR, Paseo Bajo Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, Spain, First published 2005 ISBN: 90-805649-9-0, Editors: Vrijling JK et al.
- DWW, 2002a: Achtergronden golfploopberekeningen; Rapport DWW-2002-129, nov. 2002, laatste wijziging maart 2003.
- DWW, 2002b: Consequenties nieuwe golfbelastingen voor de kust; Rapport DWW-2002-130, december 2002

-
- DWW, 2003: Consequenties nieuwe golfbelastingen voor de kust. Achtergrondrapport belastingen en duinwaterkeringen. Rapport DWW-2003-040, maart 2003
- Efron, B., 1982: The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans, 92pp., SIAM, Philadelphia, Pa.
- Forristall, G.Z., Heideman, J.C., Legget, I.M., Roskam, B. and Vanderschuren, L., 1996: Effect of sampling variability on hindcast and measured wave height., Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering/September/October 1996.
- Gautier, C, 2003: Betrouwbaarheid SWAN in de Westerschelde (in Dutch), Reliability of SWAN in the Westerschelde, June 2003.
- Groeneweg, J., and G.Ph. van Vledder, 2005: Tools for improving wave modeling and field measurements in shallow water. In *Proc. of Waves 2005 Conference* (paper 33), Madrid.
- Hall, M. J., Van den Boogaard, H. F. P., Fernando, R. C. and Mynett, A. E., 2004: The construction of confidence intervals for frequency analysis using resampling techniques. Hydrology and Earth System Sciences, 8(2), pp. 235-246.
- Haskoning, 2005a: Acceptatietest KustDB2006 applicatie, Royal Haskoning in opdracht van RIKZ, juli 2005.
- Haskoning, 2005b: Aanvullende inventarisatie ontwerpwaarden Waddenzee, Royal Haskoning in opdracht van RIKZ, oktober 2005.
- Haskoning, 2005c: Voorbereiding voor de hydraulische randvoorwaarden 2006 voor de harde waterkeringen langs de Waddenzee, Royal Haskoning in opdracht van RIKZ, oktober 2005.
- Haskoning/WL, 2005: SWAN berekeningen ten behoeve van HR2006 voor de Hollandse kust, Royal Haskoning & WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, November 2005.
- Haskoning, 2006: Fysische controles Hollandse Kust. Oosterschelde en Westerschelde HR2006, Royal Haskoning in opdracht van RIKZ, april 2006.
- HKV, 2000: HYDRA-K functioneel ontwerp, HKV LIJN IN WATER; december 2000.
- HKV, 2005a: HYDRA-K voor de HR2006, HKV LIJN IN WATER in opdracht van RIKZ, juni 2005.
- HKV, 2005b: Diepwater randvoorwaarden (ELD, EUR, YM6, SCW en SON), , HKV LIJN IN WATER in opdracht van RIKZ, juli 2005.
- HKV, 2005c: HYDRA-K, functionele documentatie versie 3.1, HKV LIJN IN WATER in opdracht van RIKZ, oktober 2005.
- HKV, 2005d: HYDRA-K, gebruikershandleiding versie 3.1, HKV LIJN IN WATER in opdracht van RIKZ, oktober 2005.
-

-
- HKV/WL, 2005: testrapport HYDRA-K oktober 2005, HKV LIJN IN WATER en WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, oktober 2005.
- HKV, 2006a: Productieberekeningen HR2006 Harde waterkeringen langs de kust, HKV LIJN IN WATER in opdracht van RIKZ, juli 2006.
- HKV, 2006b: Resultaten analyse HR2006 duinen. Tussenstand met methode TAW Leidraad Duinafslag 1984, HKV LIJN IN WATER in opdracht van RIKZ, oktober 2006.
- Hosking J., en Wallis, 1997, Regional Frequency Analysis, Cambridge University Press.
- HR1996: Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen, Rijkswaterstaat DWW, september 1996.
- HR2001: Hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van primaire waterkeringen, Rijkswaterstaat DWW, december 2001.
- INFRAM, 2000: Kerende hoogte kunstwerken, INFRAM in opdracht voor Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat en de Bouwdienst Rijkswaterstaat, juli 2000.
- KNMI, 1983: *Windklimaat van Nederland*, KNMI, Staatsuitgeverij, Den Haag 1983
- KNMI, 2005: Vergelijk HYDRA-K versus “windklimaat 1983”, KNMI in opdracht van WL | Delft Hydraulics en RIKZ, augustus 2005.
- Langendoen, 1979 *VOORFIL, een programma voor het berekenen van golven in een bankengebied voor de kust*. L.A. Langendoen., Notitie DDWT-79.306, Deltadienst, Rijkswaterstaat, november 1979.
- MX, 2004: KustDB2006, ontwerp database met controle-tool, MX systems in opdracht van RIKZ, juni 2004.
- MX, 2005a: KustDB2006Rea, beknopte gebruikershandleiding, MX systems in opdracht van RIKZ, augustus 2005.
- MX, 2005b: KustDB2006Rea, Technische documentatie database + applicatie, MX systems in opdracht van RIKZ, augustus 2005.
- MX, 2005c: KustDB2006Rea, Configureren KustDB2006, MX systems in opdracht van RIKZ, augustus 2005.
- RIKZ, 1993a: De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Rapport DGW-93.023
- RIKZ, 1993b: De basispeilen langs de Nederlandse kust; eindverslag, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Rapport DGW-93.026
- RIKZ, 1993c: De basispeilen langs de Nederlandse kust; fysisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Rapport DGW-93.025

-
- RIKZ, 1993d: Bepaling van het maximum van de gemeten golfhoogte Hm0 tijdens storm, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Rapport DGW-93.113x.
- RIKZ, 1995a: De basispeilen langs de Nederlandse kust, De ruimtelijke verdeling, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Rapport RIKZ-95.008
- RIKZ, 1995b: Golfrandvoorwaarden langs de Nederlandse kust op relatief diep water, Rapport RIKZ -95.024, 76p.
- RIKZ, 1996: Randvoorwaarden voor golfperiode langs de Nederlandse kust, Rapport RIKZ -96.019, 50p.
- RIKZ, 2000. Richtingsafhankelijke extreme waarden voor HW-standen, golfhoogte en golfperiode, Rapport RIKZ/2000.040.
- RIKZ, 2002: Totstandkoming toetswaarden voor crashactie II 2002. J. van Marle. Werkdocument RIKZ/OS-2002.136x, december. 2002.
- RIKZ, 2002b: Betrouwbaarheid golfcondities met SWAN. J.J.Jacobse, A.T.M.M. Kieftenburg en F. Den Heijer. Werkdocument RIKZ/OS-2002.116x, november 2002.
- RIKZ, 2003: Evaluatie van de ontwerpwaarden voor golfcondities in de Westerschelde. Rapport RIKZ/2003.044, 15 december 2003 (J.J. Jacobse).
- RIKZ 2004a: Het schatten van maxima van de golfhoogte tijdens stormen, A.P. Roskam, werkdocument RIKZ/OS/2004/137, 30 november 2004.
- RIKZ, 2004b: Beschrijving van de HYDRA-bestanden voor golfgegevens. Versie 1979-2002. A.P. Roskam. Werkdocument RIKZ/OS/2004, december 2004.
- RIKZ, 2005a: Basis Hydra-K; rapport RIKZ, augustus 2005 (geactualiseerde versie van RIKZ/99.020, J.G.A. van Marle)
- RIKZ, 2005b: Constructie van de bodem voor het rekenrooster van SWAN t.b.v. de HR2006. A.M. Walburg. Werkdocument RIKZ, rkz/kw/2005.106w.
- RIKZ, 2005c: The RIJKSWATERSTAAT Standard for the acquisition, processing and distribution of hydrological and meteorological data", november 2005.
- RIKZ, 2006a: Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor de Duinwaterkeringen. Rapport RIKZ/2006.026, december 2006.
- RIKZ, 2006b: SWAN berekeningen voor de Hollandse kust; aansturing en controle ten behoeve van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006, Rapport RIKZ/2006.027, december 2006.
- RIKZ, 2006c: Verschilanalyse crashactie 2002/2003 en HR2006 testlocaties. Werkdocument RIKZ/KW/2006.111w, juli 2006.
-

-
- RIKZ, 2006d. Waterstanden Nederlandse kust en estuaria. Rapport RIKZ/2006.012, 27 juni 2006.
- Rogers, W.E., P.A. Hwang and D.W. Wang, 2002. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications. J. Phys. Oceanography, vol. 33, pp 366-389.
- Stroeve, 2000: Toetskader voor steenbekledingen langs de Oosterschelde, Rapport bouwdienst rijkswaterstaat, Versie 4, maart 2000.
- SWAN user manual, 2004: SWAN Cycle III version 40.41, User manual, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft. December 2004.
- TAW, 1984: Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, Technische adviescommissie voor de waterkeringen, mei 1984.
- TAW, 2002: Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft, mei 2002.
- Tichelaar, B.W. and Ruff, L.J., 1989: How Good Are Our Best Models? Jackknifing, Bootstrapping, and Earthquake Depth, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 70, pp 593-606
- TNO & WL, 2004: HYDRA-K Oosterschelde, inclusief aanvullingen, TNO-Bouw en WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, November 2004
- Van den Boogaard, H.F.P. and Diermanse, F.L.M., 2005: Confidence intervals for extreme value analysis, contribution of the International Symposium on Stochastic Hydraulics (ISSH), Nijmegen, the Netherlands, In: Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics, IAHR, Paseo Bajo Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, Spain, First published 2005 ISBN: 90-805649-9-0, Editors: Vrijling JK et al.
- Van Gelder, PHAJM, 1999. *"Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures"*, (Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, ISSN:0169-6548 00-1, 248pages).
- Van de Graaff. Probalistische methoden bij duinontwerp. TU Delft, maart 1984.
- Verkaik, J.W., Jacobs, A.J.M. en Tijm, A.B.C., 2002: Advies inzake wind boven open water. KNMI.
- Visser, 1985: *Randvoorwaarden duinafslag berekeningen volgens leidraad T.A.W. voor Goeree en Voorne*. W. Visser. Rijkswaterstaat, Directie waterhuishouding en waterbeweging, District kust en zee. Notitie WWKZ-85.S201, maart 1985.
- VTV, 2004: De veiligheid van de primaire Nederlandse waterkeringen - Voorschrift toetsen op Veiligheid, Januari 2004

-
- WL, 2000: Numerical model investigations on coastal structures with shallow foreshores (Validation of numerical models based on physical model tests on the Petten Sea-defence). WL report H3351, May 2000.
- WL, 2003: Ontwerp controleproces/routine database golfberekeningen Oosterschelde, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, december 2003.
- WL 2004a: Hydra-K – versie 2.05b Invoeren buistoten, bui-oscillaties en lange golven in Hydra-K. WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, mei 2004.
- WL, 2004b: Golfstatistiek op relatief diep water 1979-2002, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, december 2004.
- WL, 2005a: Analyse golfstatistiek op relatief diep water, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, september 2005.
- WL, 2005b: Correctiewaarden Zeeland, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, Juli 2005.
- WL, 2005c: Correctiewaarden Zeeland. Fase 1: bepaling correctiefuncties voor ontwerp. WL rapport H4576, augustus 2005.
- WL, 2006: Correctiewaarden Zeeland. Fase 4: integratie. WL Rapport H4576, april 2006.
- WL & Alkyon, 2002: SWAN physics plus, report H3937/A832.
- WL & Alkyon, 2003: Reliability of SWAN at the Petten Sea Defence, Report H4197/A1044, June 2003.
- WL & TNO, 2003a: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 1: Plan van aanpak. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, oktober 2003.
- WL & TNO, 2003b: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 2: Inbouwen van faalmechanismen en bekledingstypen in het demonstratiemodel. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, november 2003.
- WL & TNO, 2004a: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 3: Indicatieve bepaling van de nauwkeurigheid. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, februari 2004.
- WL & TNO, 2004b: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 4: Alternatieven (work arounds) voor het inbouwen van faalmechanismen. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, maart 2004.
- WL & TNO, 2004c: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 5: Inbouwen van een additionele stochast en additionele faalmechanismen in het demonstratiemodel, WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, maart 2004.

-
- WOW, 2002: Wet op de Waterkeringen. Wet, houdende algemene regels ter verzekering van de beveiliging door waterkeringen tegen overstromingen door het buitenwater en regeling van enkele daarmee verband houdende aangelegenheden. *Staatsblad* 304.
- Wu, C.F.J., 1986: Jackknife, bootstrap, and other resampling methods in regression analysis, *Ann. Stat.*, 14, 1261, 1986.
- WWKZ-83G.218: Golfhoogte-waterstandsrelaties t.p.v. de NAP –20m lijn langs de Nederlandse kust, W. van Aalst.
- WWKZ-84.V319P: Randvoorwaarden langs de Zeeuwse kust ten behoeve van de TAW-leidraad Duinafslag, P. Roelse.
- Young, I.R., 1999: Wind generated ocean waves. *Ocean Engineering Series*, Elsevier, Amsterdam, 288p.
- Zijlema, M., and A.J. van der Westhuysen, 2005: On convergence behaviour and numerical accuracy in stationary SWAN simulations of nearshore wind wave spectra, *Coastal Engineering*, Vol. 52, 237-256.
- ZUNO, 2003: <http://www.rws.nl/rws/rikz/projecten/nautilus/nl/producten/gebiedschematisaties/zuno.html>

Bijlage A Diepwaterrandvoorwaarden

A1 Randvoorwaarden voor harde waterkeringen

Deze bijlage bevat tabellen met diepwaterrandvoorwaarden voor harde waterkeringen, op basis van gegevens van 5 stations. De tabellen zijn afkomstig uit (HKV, 2005b). Geel gemarkeerd staan de resultaten die met regressie zijn afgeleid, de overige resultaten zijn bepaald met de analytische relatie (zie paragraaf 6.3.5 voor een beschrijving van de twee methoden)

Locatie Eijerland (ELD)

Advies				
Windrichting [graden]	Windsnelheid [m/s]	Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfhoogte [m]	Golfperiode Tp [s]
30	15	6.055	2.2	6.891
30	20	9.386	4.757	10.871
30	25	11.98	7.611	13.957
30	30	14.288	10.196	16.82
30	35	16.434	12.688	19.553
30	40	18.471	15.145	22.198
60	15	6.023	2.177	6.854
60	20	7.847	3.695	8.93
60	25	9.594	5.077	10.975
60	30	11.288	6.927	12.971
60	35	12.943	8.75	14.98
60	40	14.567	10.583	16.996
210	15	5.697	2.073	6.472
210	20	7.058	3.205	7.983
210	25	8.019	4.291	9.147
210	30	9.089	5.47	10.469
210	35	10.227	6.73	11.901
210	40	11.41	8.062	13.412
240	15	5.946	2.234	6.707
240	20	7.373	3.649	8.364
240	25	8.46	5.126	9.643
240	30	9.62	6.644	11.045
240	35	10.822	8.212	12.529
240	40	12.047	9.831	14.067
270	15	6.828	2.941	7.709
270	20	8.301	4.649	9.41
270	25	9.374	5.992	10.739
270	30	10.522	7.417	12.185
270	35	11.712	8.908	13.706
270	40	12.924	10.457	15.275
300	15	7.299	3.220	8.336
300	20	8.941	4.877	10.178
300	25	10.263	6.285	11.712
300	30	11.612	7.742	13.324
300	35	12.966	9.239	14.977
300	40	14.315	10.771	16.653
330	15	7.657	3.360	8.752
330	20	9.342	5.077	10.688
330	25	11.033	7.044	12.762
330	30	12.708	8.999	14.865
330	35	14.357	10.97	16.978
330	40	15.982	12.967	19.09
360	15	7.468	3.092	8.574
360	20	9.599	5.219	11.09
360	25	11.574	7.338	13.51
360	30	13.447	9.392	15.872
360	35	15.244	11.429	18.187
360	40	16.983	13.466	20.462

Locatie Europlatform (EUR)

Advies					
Windrichting [graden]	Windsnelheid [m/s]	Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfhoogte [m]	Golfperiode Tp [s]	
30	12.4	5.494	1.972	6.17	
30	16.6	7.81	3.84	8.692	
30	20.9	9.442	5.658	10.513	
30	25.1	10.773	7.071	12.069	
30	29.2	11.931	8.304	13.457	
30	33.4	13.019	9.481	14.785	
60	12.7	5.897	2.272	6.622	
60	16.8	7.621	3.795	8.559	
60	21	9.044	5.193	9.875	
60	25.2	10.299	6.544	11.212	
60	29.5	11.475	7.8	12.519	
60	33.7	12.549	8.958	13.744	
210	13.2	6.124	2.451	6.877	
210	17.4	6.93	3.402	7.763	
210	21.9	7.701	4.588	8.637	
210	26.5	8.51	5.684	9.581	
210	31.1	9.317	6.723	10.545	
210	35.8	10.129	7.751	11.532	
240	13.7	6.155	2.609	6.887	
240	17.7	7.012	3.548	7.836	
240	22.1	7.714	4.558	8.659	
240	26.7	8.446	5.513	9.535	
240	31.4	9.179	6.428	10.427	
240	36.2	9.906	7.323	11.325	
270	13.9	6.323	2.700	7.082	
270	17.8	7.091	3.671	7.793	
270	22.1	7.725	4.671	8.575	
270	26.7	8.39	5.61	9.401	
270	31.5	9.061	6.51	10.241	
270	36.4	9.72	7.373	11.072	
300	12.7	6.601	2.988	7.418	
300	17.3	7.682	4.155	8.464	
300	21.9	8.503	5.12	9.38	
300	26.6	9.321	6.043	10.319	
300	31.3	10.108	6.922	11.243	
300	36	10.865	7.768	12.144	
330	12.3	6.461	2.604	7.275	
330	16.7	7.741	3.88	8.589	
330	21.2	8.959	5.429	9.958	
330	25.8	10.073	6.736	11.257	
330	30.4	11.094	7.914	12.477	
330	35.1	12.065	9.039	13.657	
360	12.2	7.000	2.949	7.847	
360	16.6	8.447	4.625	9.41	
360	20.9	9.666	5.987	10.815	
360	25.4	10.812	7.233	12.176	
360	29.8	11.839	8.353	13.421	
360	34.3	12.817	9.432	14.625	

Locatie IJmuiden (YM6)

Advies				
Windrichting [graden]	Windsnelheid [m/s]	Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfhoogte [m]	Golfperiode Tp [s]
30	13.1	5.476	1.749	6.199
30	17.6	9.143	4.544	10.332
30	22.1	11.454	6.749	12.986
30	26.5	13.325	8.562	15.233
30	31	15.028	10.266	17.33
30	35.4	16.56	11.848	19.249
60	13.2	5.528	1.782	6.257
60	17.6	7.238	3.055	8.193
60	22.1	9.954	5.406	11.501
60	26.6	12.019	7.258	14.089
60	31	13.778	8.901	16.349
60	35.5	15.423	10.498	18.498
210	13.5	6.096	2.370	6.876
210	18.1	7.339	3.6	8.272
210	22.8	8.287	4.701	9.401
210	27.5	9.27	5.795	10.599
210	32.3	10.283	6.912	11.855
210	37.2	11.311	8.057	13.149
240	13.9	6.320	2.478	7.053
240	18.3	7.547	3.772	8.383
240	22.9	8.629	4.984	9.73
240	27.7	9.728	6.176	11.114
240	32.6	10.812	7.354	12.496
240	37.5	11.861	8.508	13.846
270	14	6.811	2.895	7.649
270	18.3	7.966	4.151	8.908
270	22.8	8.971	5.182	10.106
270	27.6	10.001	6.232	11.359
270	32.6	11.028	7.288	12.629
270	37.7	12.032	8.339	13.887
300	13	7.172	2.920	8.176
300	17.9	8.711	4.434	9.759
300	22.8	10.021	5.583	11.217
300	27.7	11.262	6.694	12.65
300	32.7	12.466	7.8	14.074
300	37.6	13.591	8.864	15.431
330	13	7.025	2.704	7.988
330	17.7	9.108	4.701	10.259
330	22.4	10.845	6.322	12.288
330	27.2	12.429	7.829	14.201
330	32	13.887	9.258	16.001
330	36.8	15.254	10.636	17.716
360	12.8	6.932	2.630	7.902
360	17.5	9.41	4.989	10.729
360	22.1	11.31	6.796	13.055
360	26.8	13.003	8.445	15.184
360	31.5	14.543	9.991	17.155
360	36.1	15.944	11.442	18.974

Scheur West (SCW)

Advies				
Windrichting [graden]	Windsnelheid [m/s]	Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfhoogte [m]	Golfperiode Tp [s]
30	12.4	4.578	1.126	5.261
30	16.6	7.751	3.256	8.959
30	20.9	9.308	4.43	10.808
30	25.1	10.473	5.31	12.255
30	29.2	11.443	6.057	13.486
30	33.4	12.329	6.755	14.626
60	12.7	4.312	1.044	4.804
60	16.8	7.183	2.662	8.236
60	21	8.655	3.749	9.971
60	25.2	9.8	4.57	11.383
60	29.5	10.808	5.301	12.654
60	33.7	11.691	5.954	13.785
210	13.2	4.472	1.180	4.937
210	17.4	5.281	1.646	5.83
210	21.9	6.182	2.425	7.001
210	26.5	6.961	3.212	8.108
210	31.1	7.657	3.841	9.077
210	35.8	8.309	4.412	9.979
240	13.7	5.013	1.504	5.555
240	17.7	5.767	1.99	6.39
240	22.1	6.616	2.784	7.581
240	26.7	7.367	3.516	8.561
240	31.4	8.045	4.129	9.452
240	36.2	8.674	4.684	10.284
270	13.9	5.782	1.929	6.412
270	17.8	6.541	2.664	7.371
270	22.1	7.381	3.399	8.353
270	26.7	8.141	4.026	9.27
270	31.5	8.838	4.595	10.129
270	36.4	9.479	5.121	10.93
300	12.7	6.280	2.252	6.965
300	17.3	7.24	3.149	8.091
300	21.9	8.053	3.836	9.067
300	26.6	8.803	4.45	9.984
300	31.3	9.489	5.01	10.836
300	36	10.124	5.533	11.633
330	12.3	6.551	2.352	7.286
330	16.7	7.657	3.312	8.675
330	21.2	8.748	4.23	10.025
330	25.8	9.693	5.001	11.216
330	30.4	10.53	5.686	12.284
330	35.1	11.305	6.329	13.285
360	12.2	7.060	2.676	8.006
360	16.6	8.223	3.747	9.395
360	20.9	9.309	4.602	10.709
360	25.4	10.275	5.364	11.908
360	29.8	11.111	6.034	12.964
360	34.3	11.888	6.666	13.957

Schiermonnikoog Noord (SON)

Advies				
Windrichting [graden]	Windsnelheid [m/s]	Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfhoogte [m]	Golfperiode Tp [s]
30	14.2	5.988	1.868	6.964
30	19	8.93	4.237	10.365
30	23.8	11.385	7.109	14.333
30	28.6	13.631	9.737	17.881
30	33.3	15.711	12.245	21.157
30	38.1	17.752	14.793	24.38
60	14.4	5.503	1.578	6.400
60	19.1	7.337	2.805	8.533
60	23.9	9.535	5.47	12.154
60	28.7	11.565	7.86	16.163
60	33.5	13.505	10.19	19.828
60	38.3	15.387	12.524	23.326
210	14.9	4.459	1.046	5.109
210	19.4	5.888	1.824	6.747
210	24.1	7.565	2.791	8.66
210	28.9	9.207	4.021	11.995
210	33.8	10.846	5.279	15.086
210	38.7	12.463	6.564	18.048
240	14.3	5.579	1.643	6.478
240	19.2	7.339	2.687	8.299
240	24.1	9.036	4.161	10.771
240	29.1	10.761	5.659	13.264
240	34	12.441	7.161	15.699
240	38.9	14.111	8.708	18.135
270	15.1	6.695	2.343	7.840
270	19.5	8.334	3.689	9.822
270	24.2	10.015	5.183	12.07
270	29.1	11.724	6.735	14.39
270	34.1	13.429	8.337	16.737
270	39.1	15.101	9.967	19.067
300	14.4	7.511	2.946	8.698
300	19.2	9.426	4.583	11.002
300	24.1	11.155	6.1	13.132
300	29	12.875	7.66	15.306
300	34	14.611	9.295	17.542
300	38.9	16.289	10.935	19.74
330	14	7.023	2.505	8.153
330	19	9.506	4.552	11
330	23.9	11.773	6.555	13.736
330	28.8	13.946	8.557	16.445
330	33.7	16.051	10.587	19.133
330	38.6	18.107	12.655	21.804
360	14.1	6.987	2.627	8.000
360	19	9.194	4.529	10.716
360	23.9	11.256	6.724	13.676
360	28.7	13.188	8.809	16.453
360	33.5	15.057	10.887	19.153
360	38.3	16.875	12.977	21.801

A2 Randvoorwaarden voor duinen

Het vervolg van deze bijlage bevat tabellen met diepwaterrandvoorwaarden voor duinen, op basis van gegevens van dezelfde 5 stations als voor harde waterkeringen. De tabellen zijn afkomstig uit (HKV, 2005b).

Eijerland (ELD)

Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte [m]	Advies	
		Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfperiode Tp [s]
1.000	3.083	7.223	8.224
1.250	3.717	7.791	8.868
1.500	4.241	8.275	9.425
1.750	4.855	8.847	10.095
2.000	5.455	9.409	10.762
2.250	6.042	9.959	11.422
2.500	6.620	10.497	12.074
2.750	7.189	11.023	12.718
3.000	7.750	11.538	13.353
3.250	8.305	12.041	13.978
3.500	8.852	12.533	14.594
3.750	9.394	13.016	15.202
4.000	9.931	13.489	15.801
4.250	10.462	13.953	16.391
4.500	10.989	14.409	16.973
4.750	11.512	14.857	17.548
5.000	12.031	15.297	18.115
5.250	12.546	15.730	18.675
5.500	13.057	16.156	19.229
5.750	13.565	16.575	19.775
6.000	14.069	16.989	20.316
6.250	14.571	17.396	20.850
6.500	15.069	17.798	21.379

Europlatform (EUR)

Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte [m]	Advies	
		Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfperiode Tp [s]
2.00	3.339	7.024	7.821
2.25	4.227	7.755	8.610
2.50	4.862	8.316	9.235
2.75	5.367	8.774	9.756
3.00	5.791	9.163	10.204
3.25	6.159	9.502	10.598
3.50	6.484	9.802	10.950
3.75	6.777	10.072	11.269
4.00	7.044	10.318	11.561
4.25	7.289	10.543	11.830
4.50	7.516	10.751	12.079
4.75	7.728	10.945	12.312
5.00	7.926	11.126	12.531
5.25	8.114	11.296	12.737
5.50	8.291	11.457	12.932
5.75	8.459	11.609	13.117
6.00	8.619	11.753	13.293
6.25	8.771	11.891	13.461
6.50	8.917	12.022	13.621

IJmuiden (YM6)

Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte [m]	Advies	
		Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfperiode Tp [s]
1.75	3.202	7.105	8.018
2.00	4.248	8.332	9.367
2.25	5.003	9.214	10.378
2.50	5.611	9.914	11.198
2.75	6.125	10.497	11.892
3.00	6.574	11.000	12.496
3.25	6.975	11.444	13.033
3.50	7.337	11.841	13.517
3.75	7.670	12.201	13.959
4.00	7.977	12.531	14.365
4.25	8.263	12.836	14.742
4.50	8.531	13.119	15.094
4.75	8.784	13.385	15.425
5.00	9.022	13.634	15.736
5.25	9.249	13.869	16.030
5.50	9.465	14.091	16.310
5.75	9.672	14.303	16.576
6.00	9.869	14.505	16.831
6.25	10.059	14.697	17.074
6.50	10.242	14.882	17.308

Scheur West (SCW)

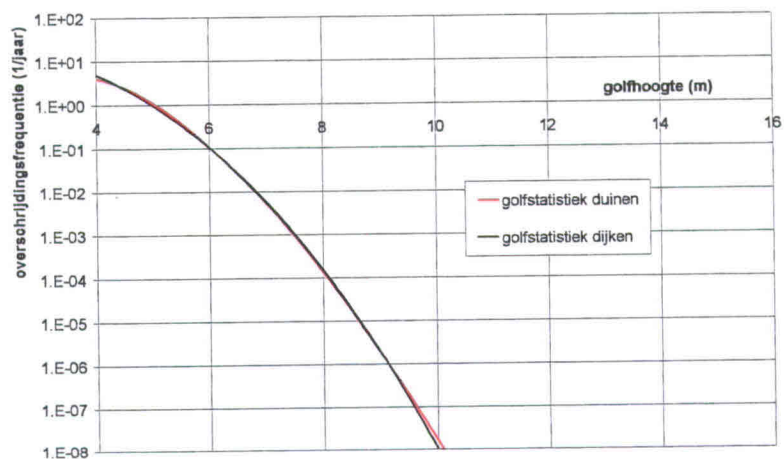
Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte [m]	Advies	
		Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfperiode Tp [s]
2.75	1.548	5.790	6.569
3.00	2.720	6.862	7.765
3.25	3.305	7.558	8.584
3.50	3.729	8.090	9.223
3.75	4.072	8.525	9.755
4.00	4.364	8.897	10.215
4.25	4.620	9.224	10.621
4.50	4.850	9.517	10.987
4.75	5.060	9.783	11.321
5.00	5.253	10.026	11.630
5.25	5.432	10.252	11.916
5.50	5.601	10.463	12.184
5.75	5.759	10.660	12.436
6.00	5.909	10.847	12.674
6.25	6.052	11.023	12.900
6.50	6.188	11.190	13.116

Schiermonnikoog Noord (SON)

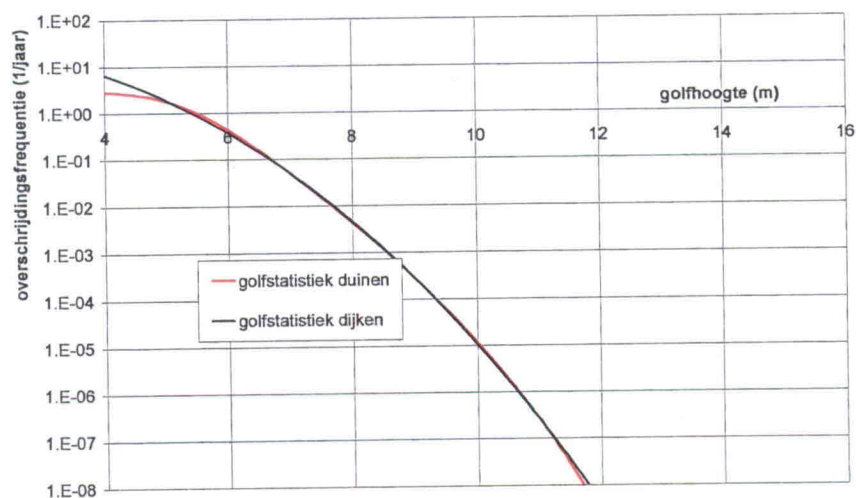
Advies			
Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte [m]	Golfperiode Tm-1,0 [s]	Golfperiode Tp [s]
1.75	2.801	7.411	8.590
2.00	3.821	8.584	9.972
2.25	4.687	9.585	11.183
2.50	5.463	10.474	12.277
2.75	6.178	11.282	13.285
3.00	6.849	12.028	14.226
3.25	7.485	12.725	15.113
3.50	8.093	13.382	15.956
3.75	8.678	14.005	16.760
4.00	9.243	14.599	17.531
4.25	9.791	15.167	18.274
4.50	10.324	15.714	18.991
4.75	10.843	16.241	19.685
5.00	11.351	16.750	20.359
5.25	11.848	17.244	21.014
5.50	12.335	17.723	21.653
5.75	12.813	18.188	22.275
6.00	13.283	18.642	22.884
6.25	13.745	19.084	23.479
6.50	14.200	19.516	24.062

Bijlage B Statistieken windsnelheid en golfhoogte

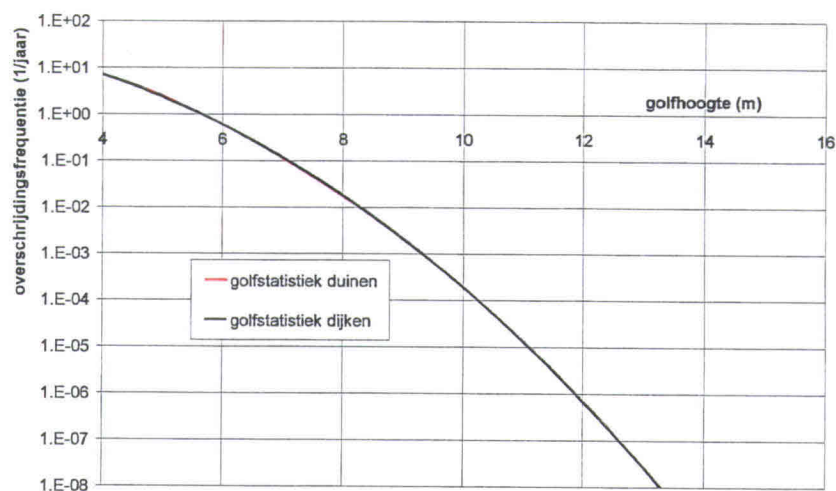
Deze bijlage toont de marginale statistieken van de windsnelheid en de golfhoogte voor duinen en dijken.



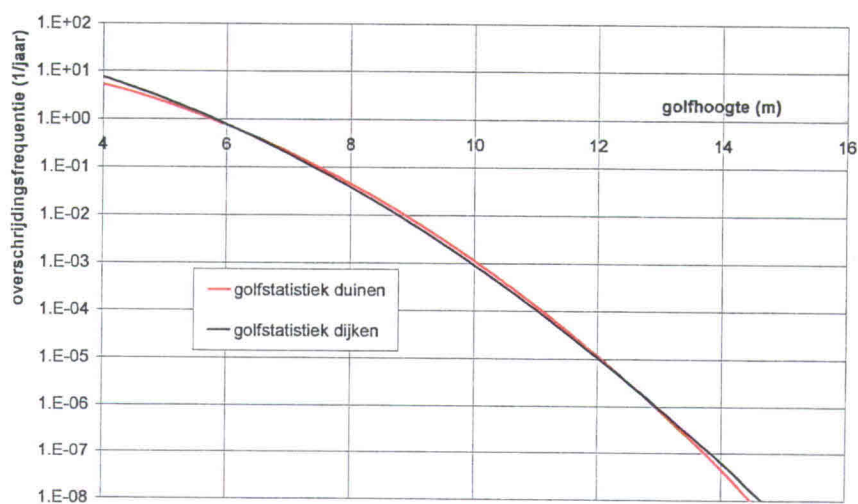
Figuur B.1 Vergelijking van de resulterende marginale statistiek voor duinen en de beschikbare statistiek voor dijken bij locatie Hoek van Holland.



Figuur B.2 Vergelijking van de resulterende marginale statistiek voor duinen en de beschikbare statistiek voor dijken bij locatie IJmuiden.



Figuur B.3 Vergelijking van de resulterende marginale statistiek voor duinen en de beschikbare statistiek voor dijken bij locatie Den Helder.



Figuur B.4 Vergelijking van de resulterende marginale statistiek voor duinen en de beschikbare statistiek voor dijken bij locatie Eierland.

Bijlage C Figuren nieuwe randvoorwaarden

Deze bijlage bevat de belangrijkste rekenresultaten ten behoeve van de HR2006 voor harde waterkeringen (Figuur C.1-C.13) en de zachte waterkeringen of duinen (Figuur C.14-C.18) in zogenaamde “langsfiguren”, waarin een soort van rondwandeling gemaakt wordt rond het gebied. De verbindende waterkeringen zijn bij de harde waterkeringen meegenomen. De begeleidende tekst bij deze figuren staat in hoofdstuk 9. De volgnummers (enige zijn tussen haakjes gegeven) per regio zijn gegeven in gesorteerde Was-woordt tabellen in bijlage H.

Er zijn voor de harde keringen 4 regio's onderscheiden, te weten:

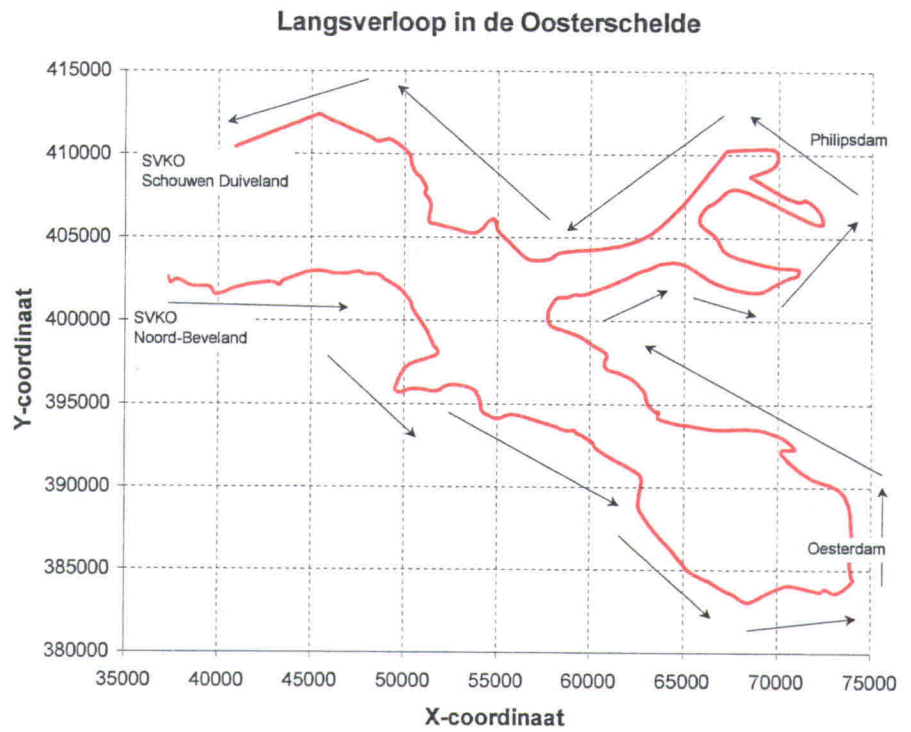
1. *Oosterschelde* (Zie Figuur C.1 voor de rondwandeling, en Figuren C.2-C.4 voor resultaten);
2. *Westerschelde* (Zie Figuur C.5 voor de rondwandeling, en Figuren C.6-C.8 voor resultaten);
3. *Hollandse Kust* (zie Figuren C.9-C.11 voor resultaten). Deze regio start in het noorden bij den Helder en eindigt bij de Veerse Dam in het zuiden. De regio bevat dus ook de verbindende waterkeringen, te weten: IJmuiden (7), Haringvlietdam (14-17), Brouwersdam (20-22), Oosterscheldekering (23-30) en Veerse dam (32-33);
4. *Waddenzee*. Dit is een rondwandeling langs de Waddenzee die start bij Groningen (1-38) en *met de wijzers van de klok mee* via Friesland (39-82), Afsluitdijk (83-87), Wieringen (88-102), kop van Noord-Holland (103-107), en langs de onderzijde van de waddeneilanden (108-148) eindigt bij Schiermonnikoog (145-148).

Er zijn voor de zachte keringen 2 regio's onderscheiden, te weten:

5. *Waddenzee en Hollandse Kust*. Deze wandeling start bij Schiermonnikoog (1-6) en gaat via de Noordzijde van de waddeneilanden (7-27) zuidwaarts langs de kust van Noord-Holland (28-59) en Zuid-Holland (60-69);
6. *Duinen ten zuiden van Maasvlakte*. Deze wandeling bevat de koppen van de Zuid-Hollandse en Zeeuwse eilanden ten zuiden van de Maasvlakte, startend bij Voorne (1-11) en eindigend bij Zeeuws-Vlaanderen (151-173).

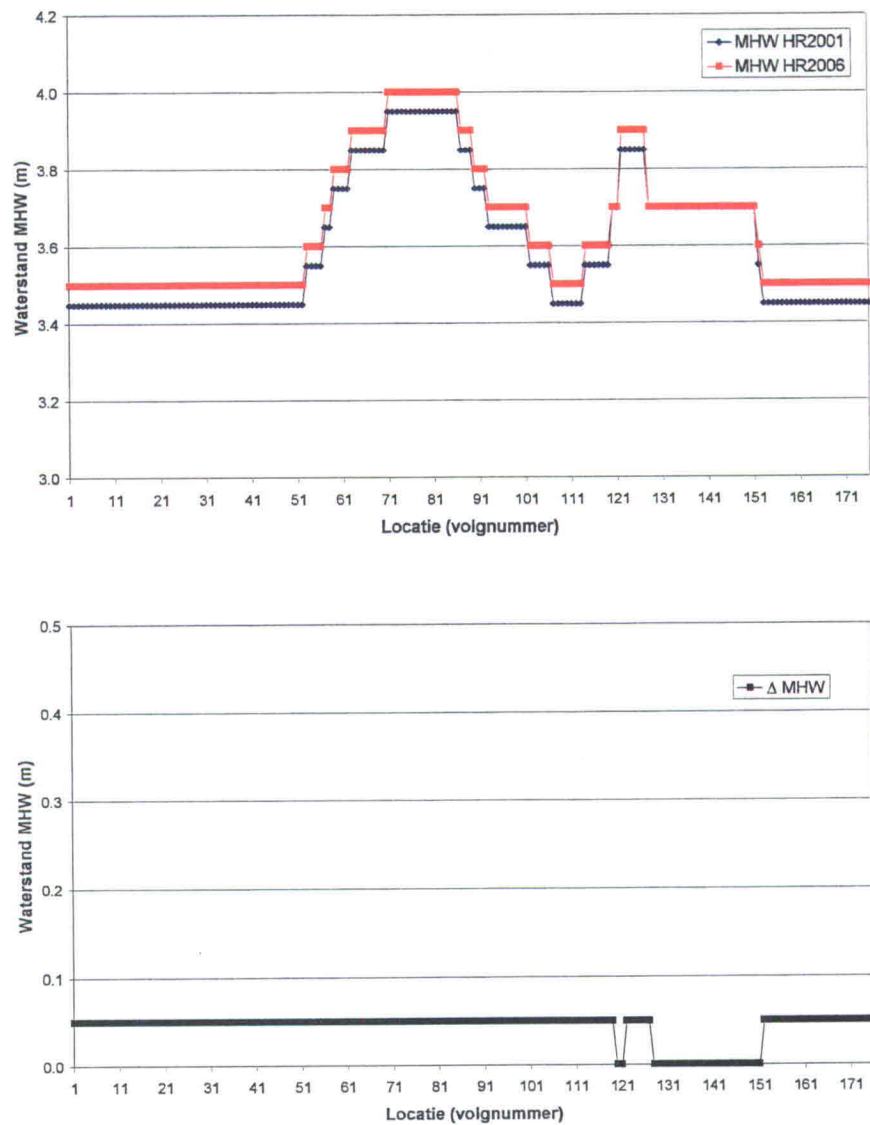
Figuur C.1 toont het principe van een dergelijke rondwandeling. De volgorde per regio is als volgt:

- Oosterschelde: vanaf de aansluiting bij de SVKO op Noord-Beveland, via de Oesterdam en de Philipsdam weer terug naar de aansluiting bij de SVKO op Schouwen Duiveland.
- Westerschelde: vanaf de Willem Leopoldpolder in Zeeuws-Vlaanderen, via de Zeedijk Paviljoenpolder weer terug naar de West-Kapelse Zeedijk op Walcheren.
- Hollandse kust: van noord naar zuid.



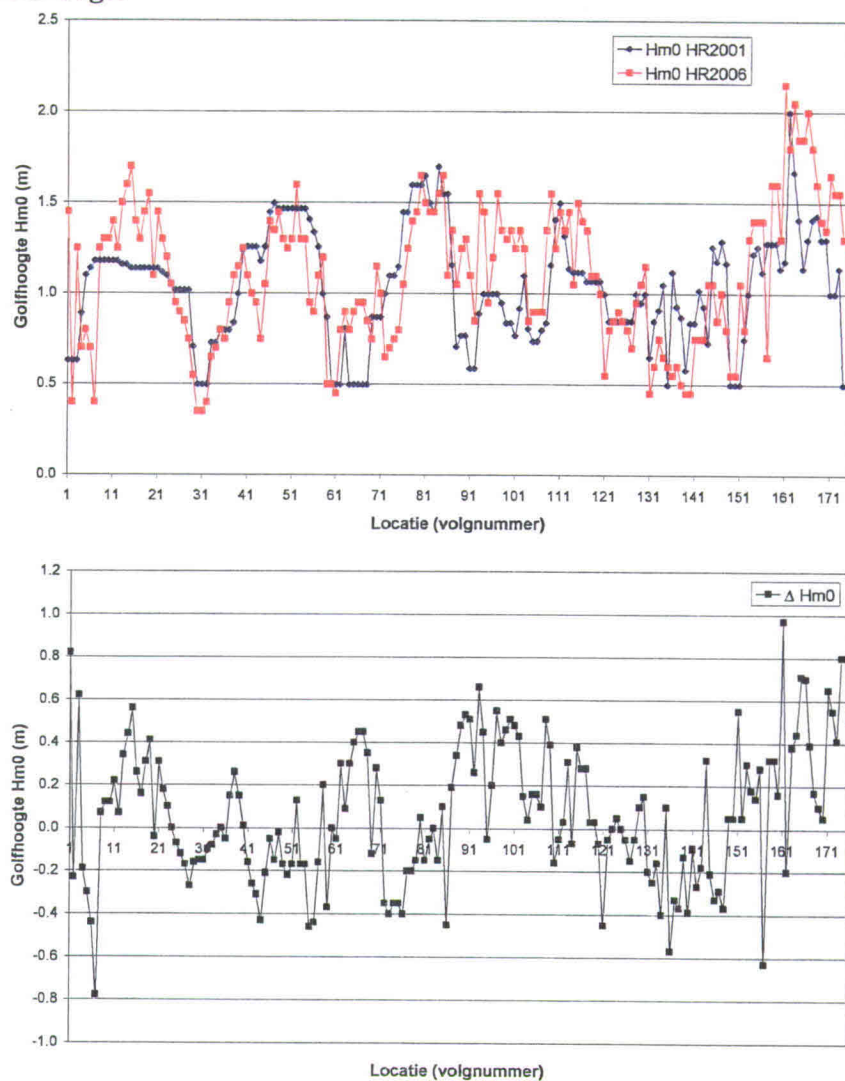
Figuur C.1 Rondwandeling voor de Oosterschelde.

Waterstand



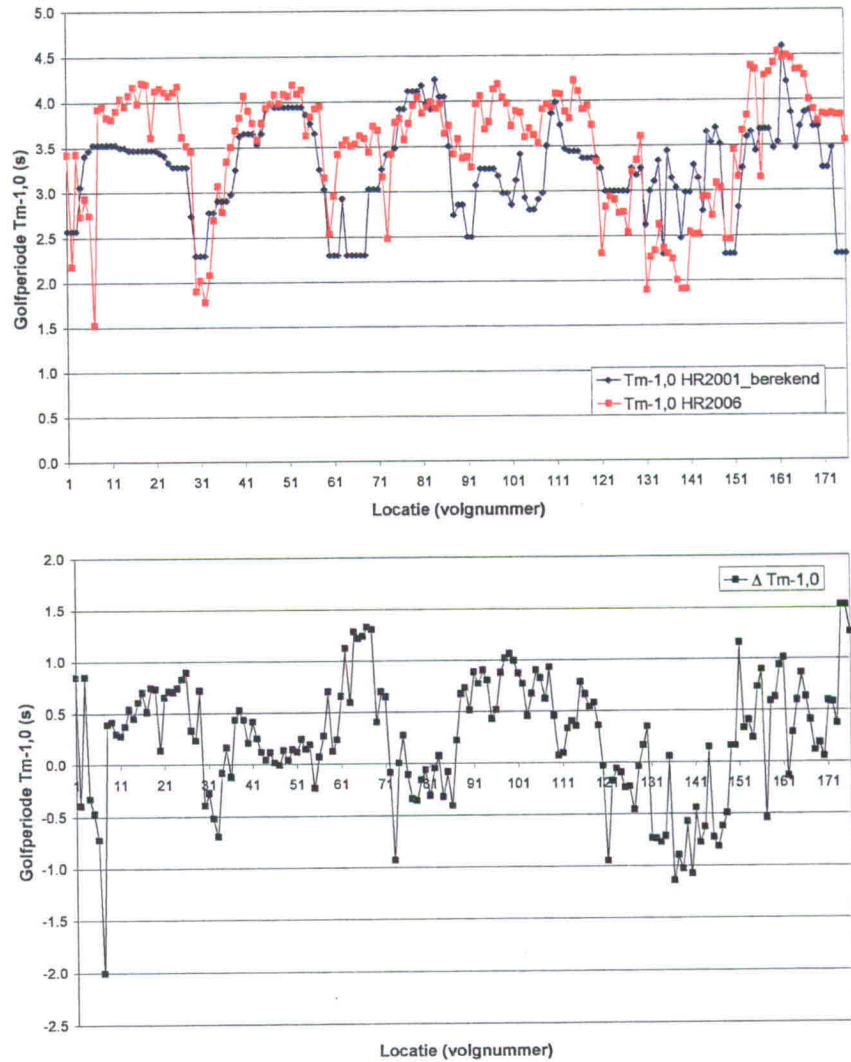
Figuur C.2 Langsfiguur voor de Oosterschelde voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de waterstand (boven) en het verschil met HR2001 (onder).

Golfhoogte

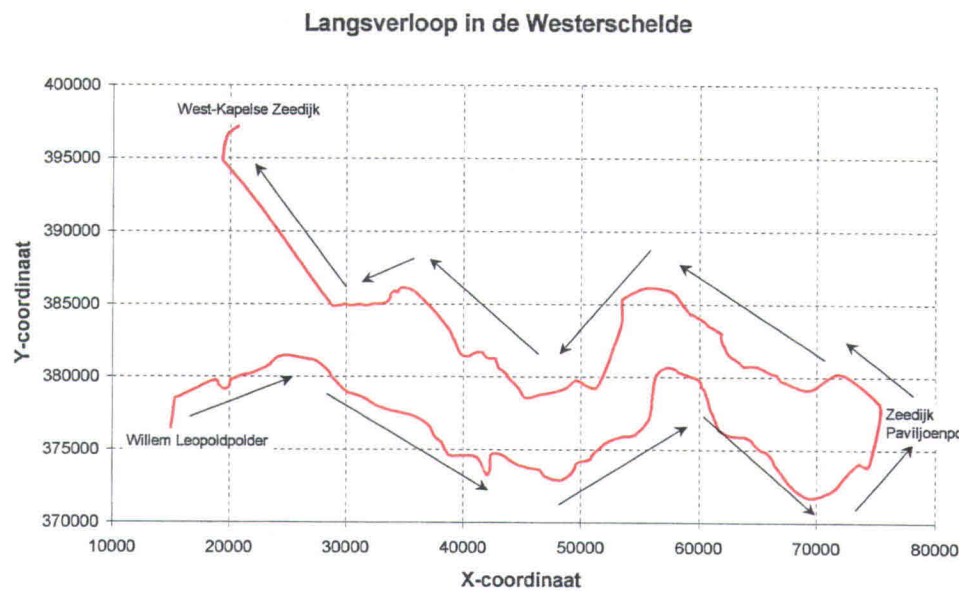


*Figuur C.3 Langsfiguur voor de Oosterschelde voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **golfhoogte** (boven) en het verschil met HR2001 (onder).*

Golfperiode

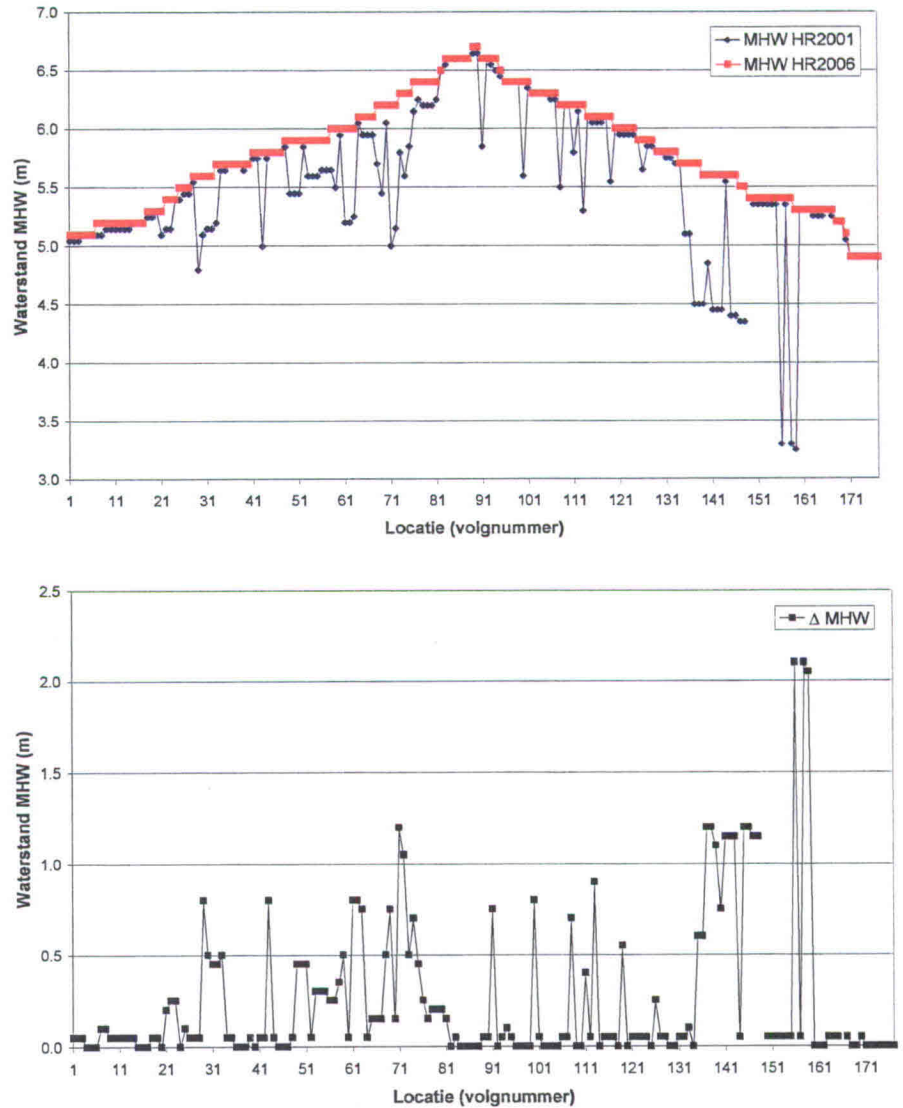


Figuur C.4 Langsfiguur voor de Oosterschelde voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de golfperiode $T_{m-1,0}$ (boven) en het verschil met HR2001 (onder).



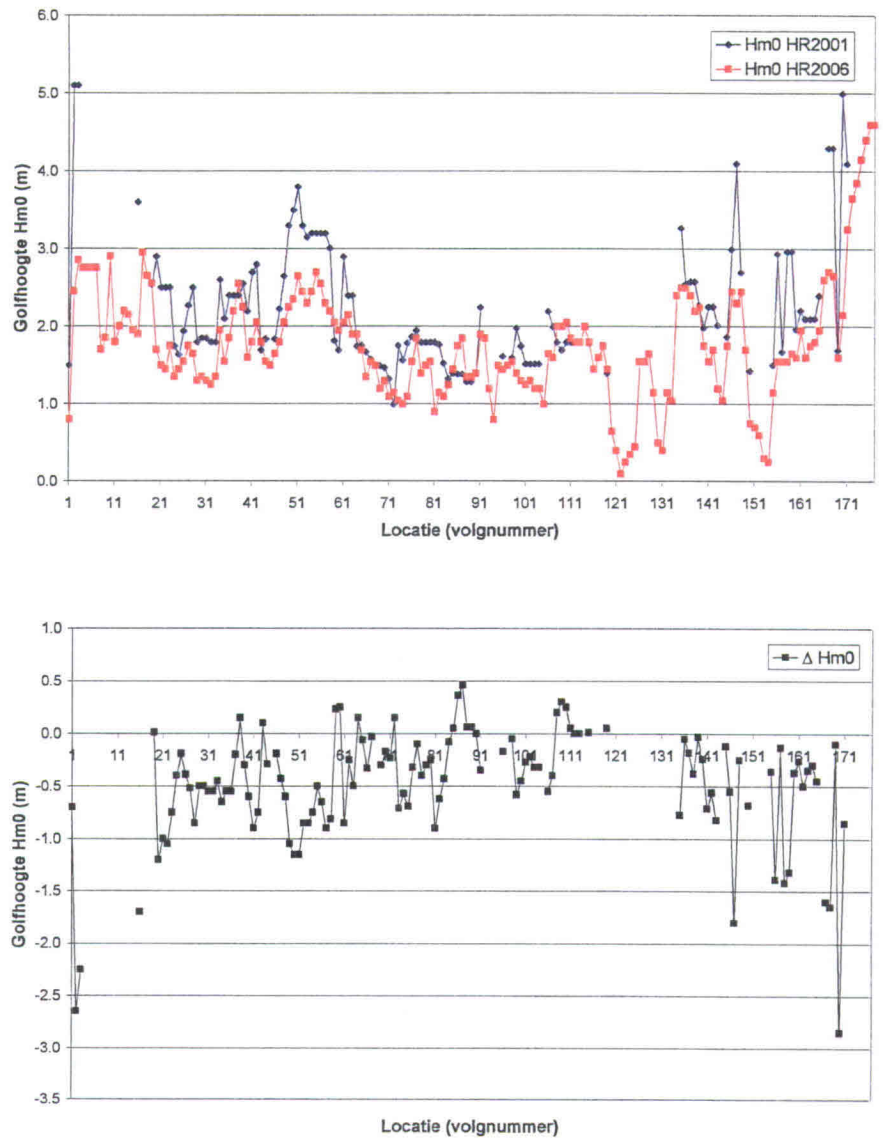
Figuur C.5 Rondwandeling voor de Westerschelde.

Waterstand



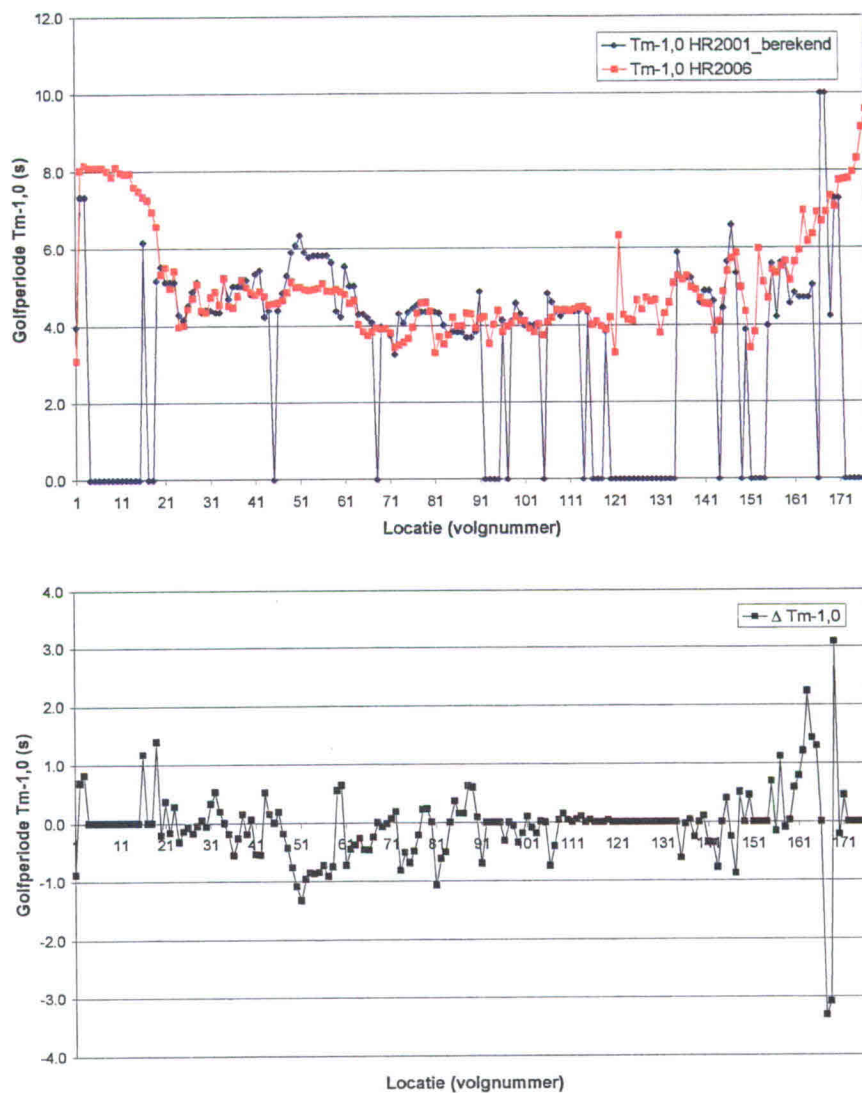
Figuur C.6 Langsfiguur voor de Westerschelde voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de waterstand (boven) en het verschil met HR2001 (onder).

Golfhoogte



Figuur C.7 Langsfiguur voor de Westerschelde voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **golfhoogte** (boven) en het verschil met HR2001 (onder).

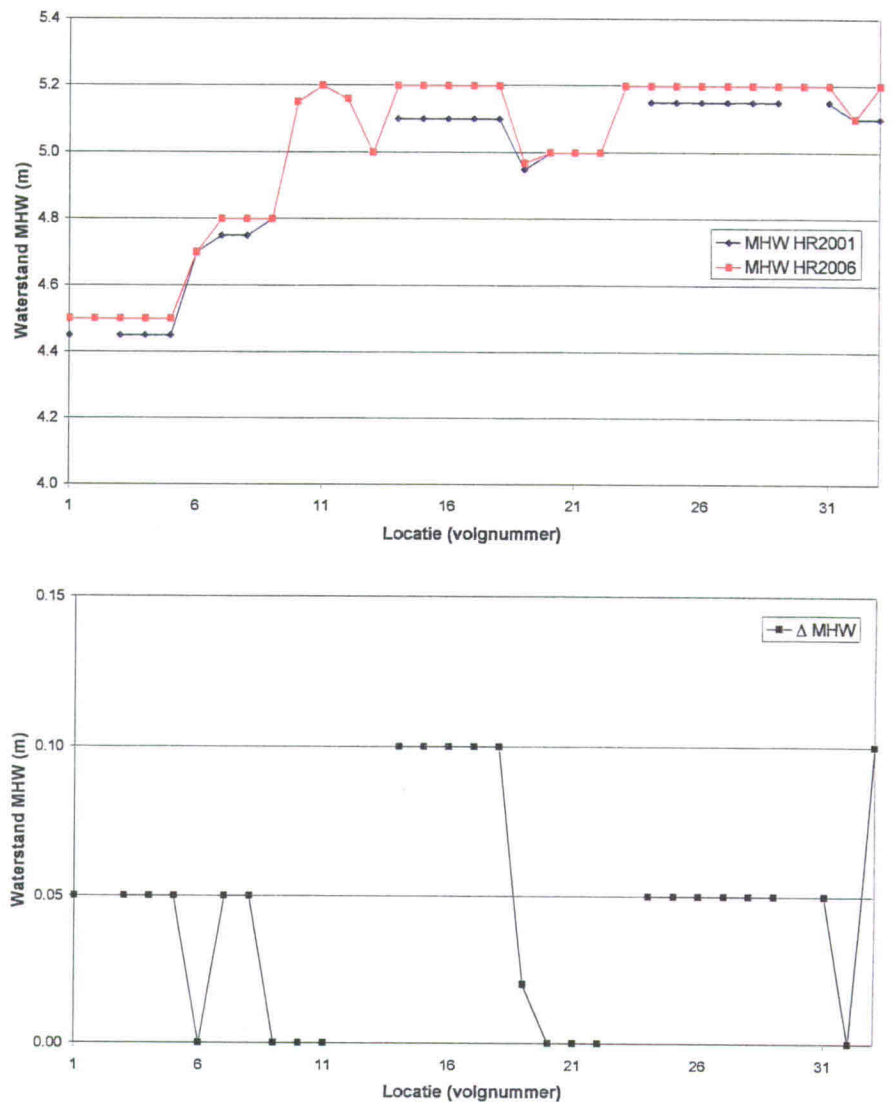
Golfperiode



Figuur C.8 Langsfiguur voor de Westerschelde voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de golfperiode $T_{m-1,0}$ (boven) en het verschil met HR2001 (onder). De ontbrekende getallen voor HR2001 zijn met een 'nul' weergegeven. Daarvoor zijn ook geen verschillen bepaald (verschil is 'nul').

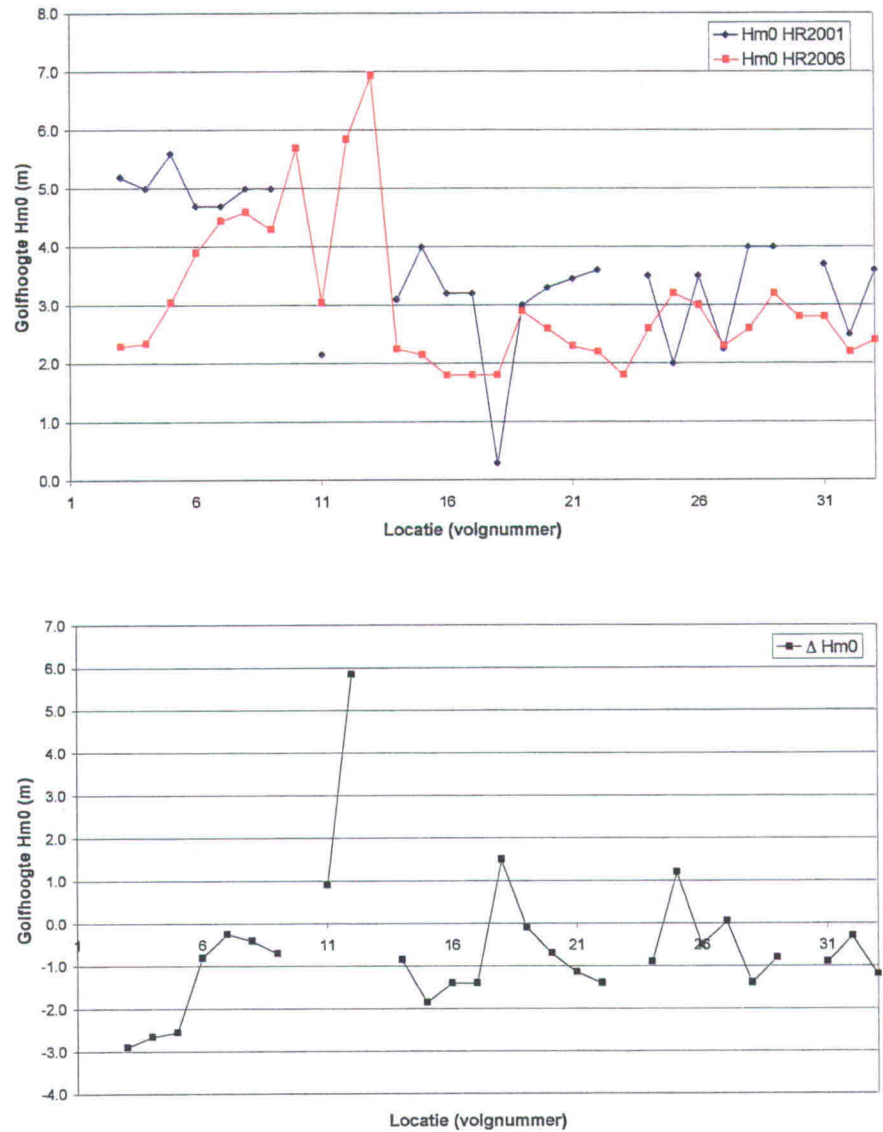
Regio 3 (harde keringen): Hollandse kust

Waterstand



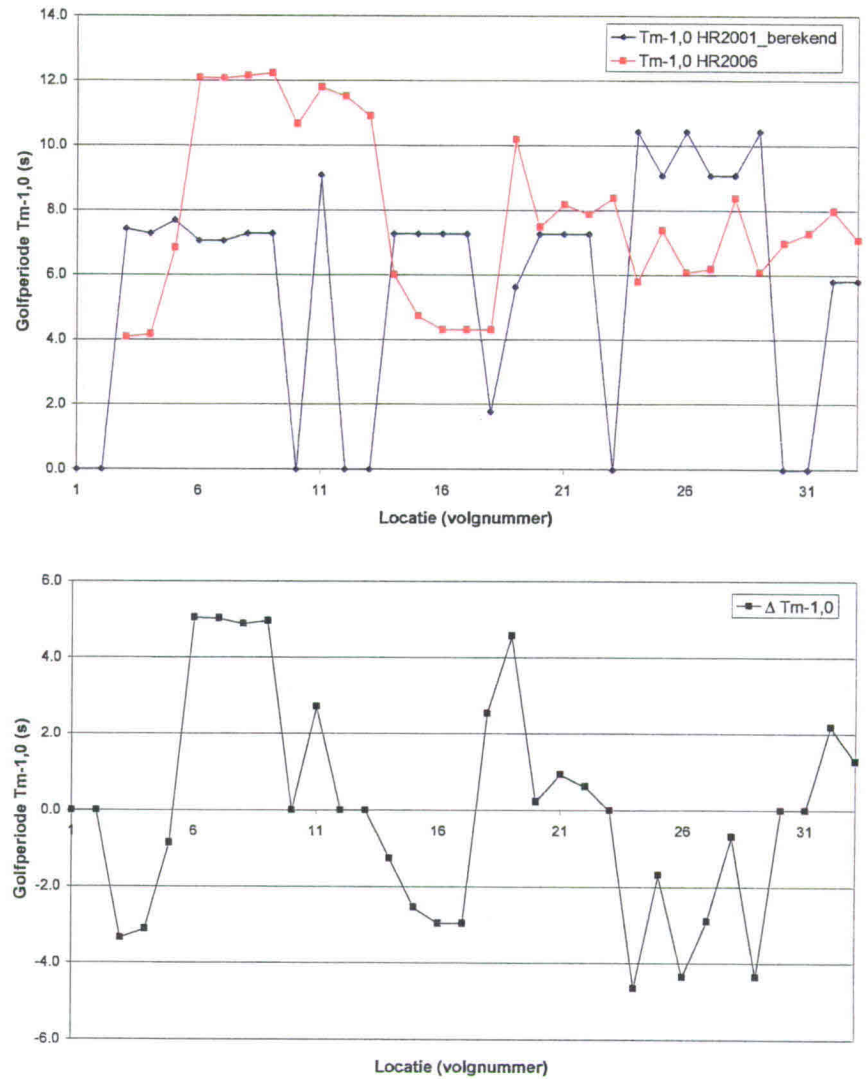
Figuur C.9 Langsfiguur voor de Hollandse kust voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **waterstand** en het verschil met HR2001 (onder). De verbindende waterkeringen zijn: Ljmuiden (10), Haringvlietdam (14-17), Brouwersdam (20-22), Oosterscheldekering (23-30) en Veerse Dam (32-33). Andere zeeweringen zijn: Helderse Zeewering (3-5), Pettemer Zeewering (6-7) en Hondsbossche Zeewering (8-9).

Golfhoogte



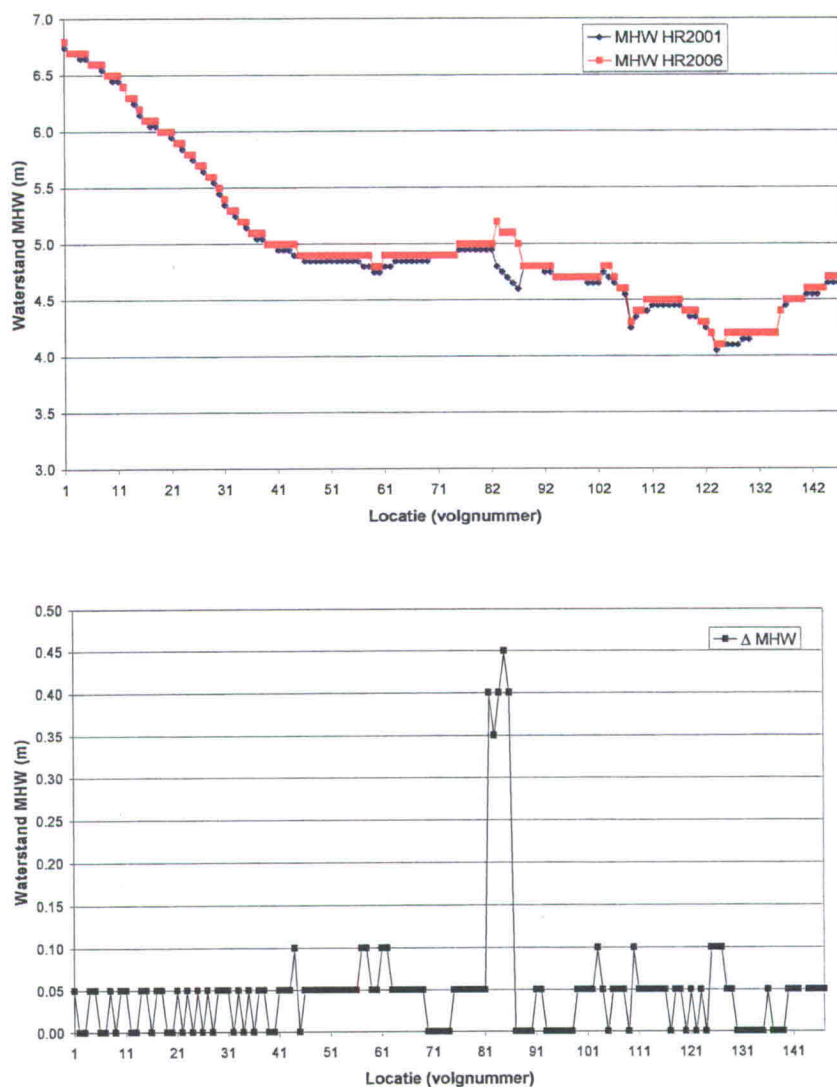
*Figuur C.10 Langsfiguur voor de Hollandse kust voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **golfhoogte** en het verschil met HR2001 (onder). De verbindende waterkeringen zijn: IJmuiden (10), Haringvlietdam (14-17), Brouwersdam (20-22), Oosterscheldekering (23-30) en Veerse Dam (32-33). Andere zeeweringen zijn: Helderse Zeewering (3-5), Pettemer Zeewering (6-7) en Hondsbossche Zeewering (8-9).*

Golfperiode



Figuur C.11 Langsfiguur voor de Hollandse kust voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (blauwe lijn) voor de golfperiode en het verschil met HR2001 (onder). De ontbrekende getallen voor HR2001 zijn met een 'nul' weergegeven. Daarvoor zijn ook geen verschillen bepaald (verschil is 'nul'). De verbindende waterkeringen zijn: IJmuiden (10), Haringvlietdam (14-17), Brouwersdam (20-22), Oosterscheldekering (23-30) en Veerse Dam (32-33). Andere zeeweringen zijn: Helderse Zeewering (3-5), Pettemer Zeewering (6-7) en Hondsbossche Zeewering (8-9).

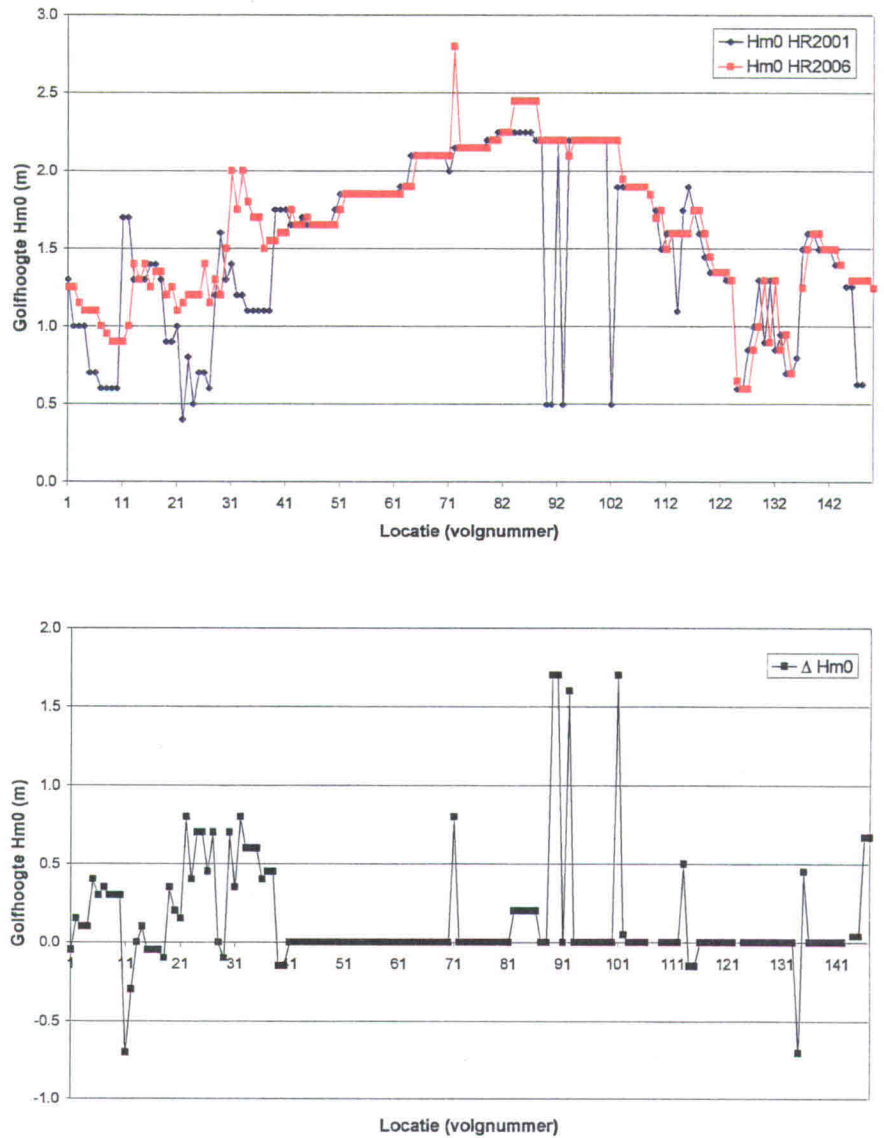
Waterstand



*Figuur C.12 Langsfiguur voor de Waddenzee voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **waterstand** en het verschil met HR2001 (onder). De rondwandeling start bij Groningen (1-38) en gaat met de wijzers van de klok mee via Friesland (39-82), Afsluitdijk (83-87), Wieringen (88-102), kop van Noord-Holland (103-107), en langs de onderzijde van de waddeneilanden (108-148), en eindigt bij Schiermonnikoog (145-148).*

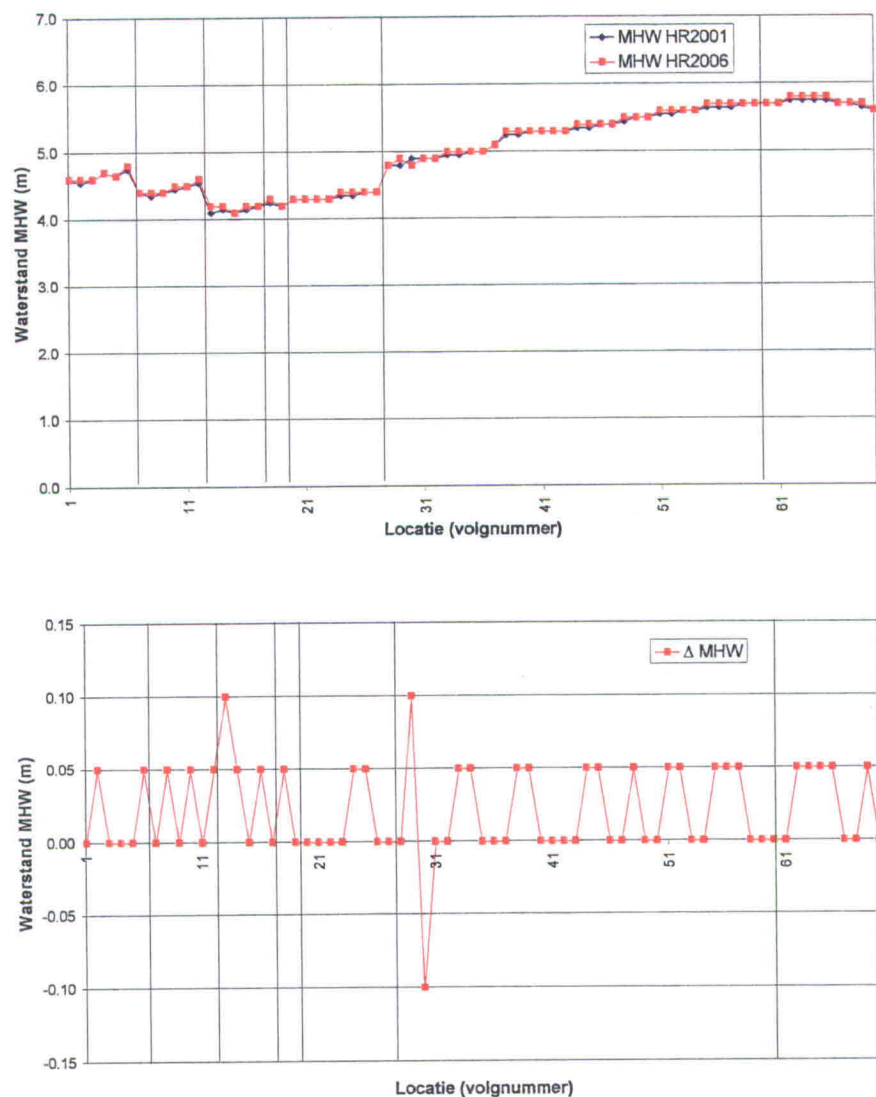
²³ Golfperiode is niet gegeven voor deze regio

Golfhoogte



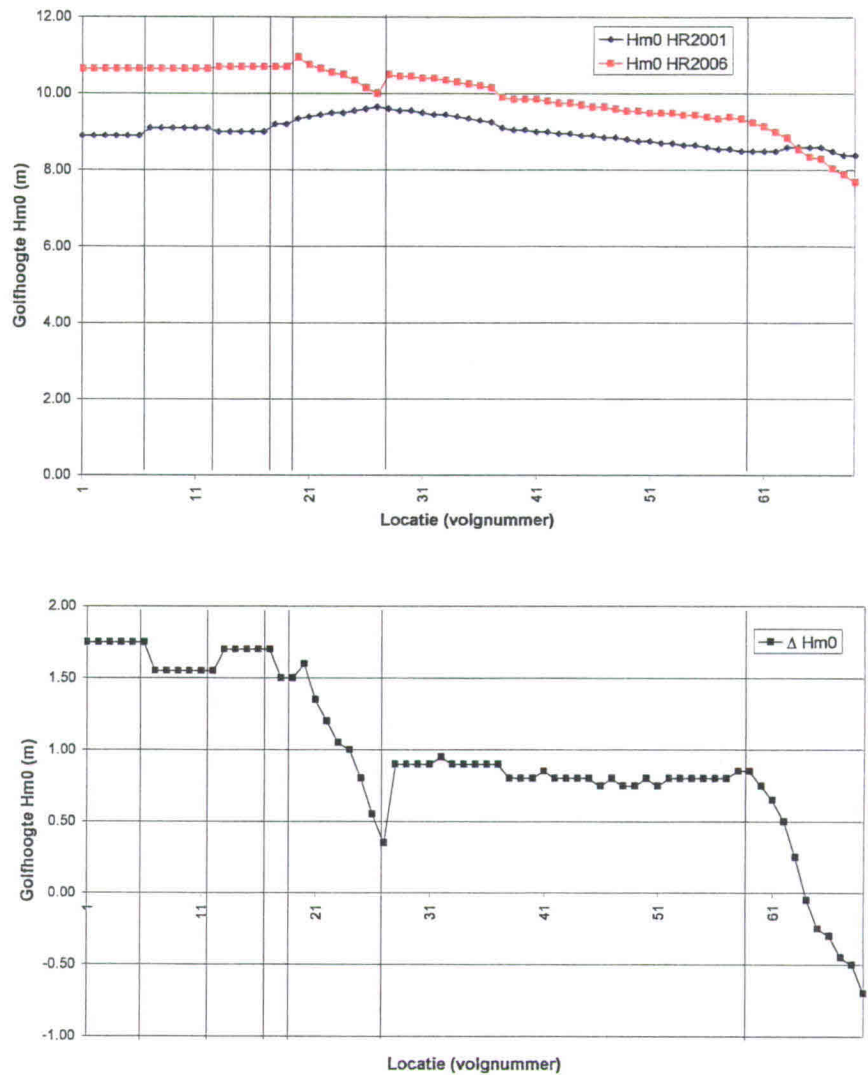
Figuur C.13 Langsfiguur voor de Waddenzee, Friesland en Groningen voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de golfhoogte en het verschil met HR2001 (onder). De rondwandeling start bij Groningen (1-38) en gaat met de wijzers van de klok mee via Friesland (39-82), Afsluitdijk (83-87), Wieringen (88-102), kop van Noord-Holland (103-107), en langs de onderzijde van de waddeneilanden (108-148), en eindigt bij Schiermonnikoog (145-148).

Waterstand



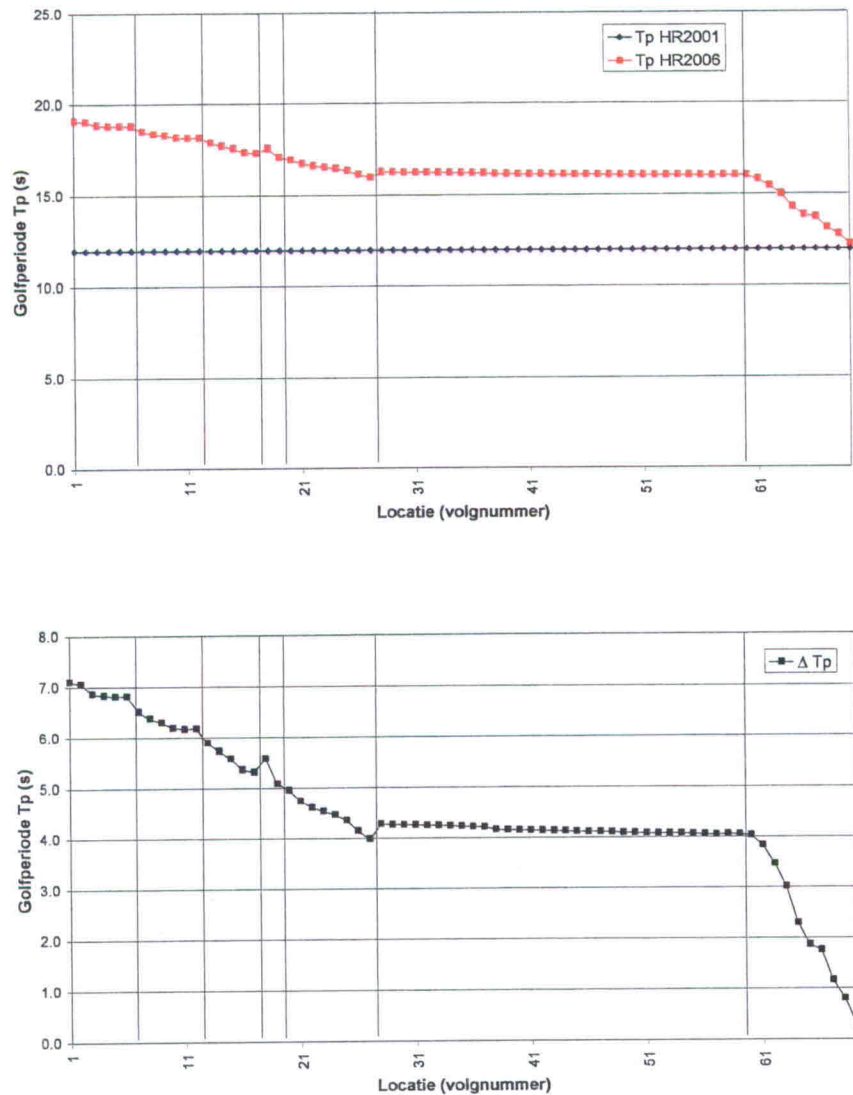
Figuur C.14 Langsfiguur voor de Waddenzee en Hollandse Kust voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de waterstand. Verschillen zijn onder gegeven. Verticale strepen geven de deelgebieden weer, te weten: Schiermonnikoog (1-6), Ameland (7-12), Terschelling (13-17), Vlieland (18-19), Texel (20-27), Noord-Holland (28-59), Zuid-Holland (60-69).

Golfhoogte



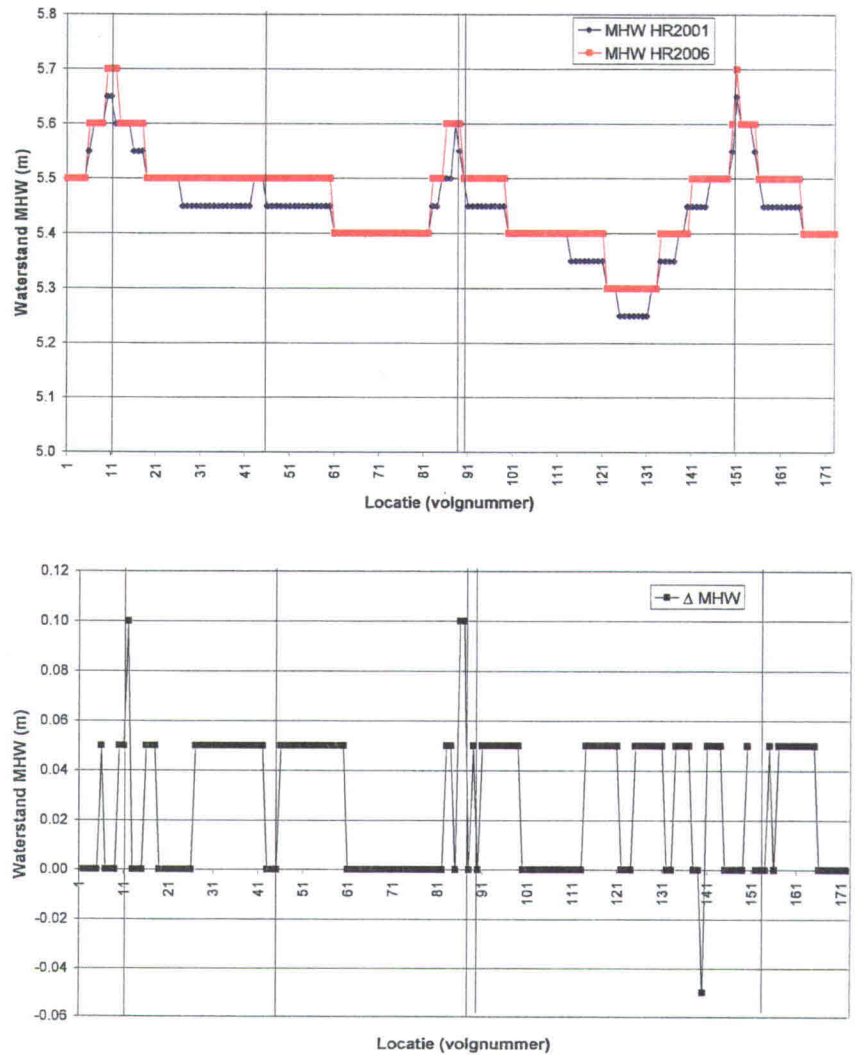
Figuur C.15 Langsfiguur voor de Waddenzee en Hollandse Kust voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de golfhoogte. Verticale strepen geven de deelgebieden weer, te weten: Schiermonnikoog (1-6), Ameland (7-12), Terschelling (13-17), Vlieland (18-19), Texel (20-27), Noord-Holland (28-59), Zuid-Holland (60-69).

Golfperiode



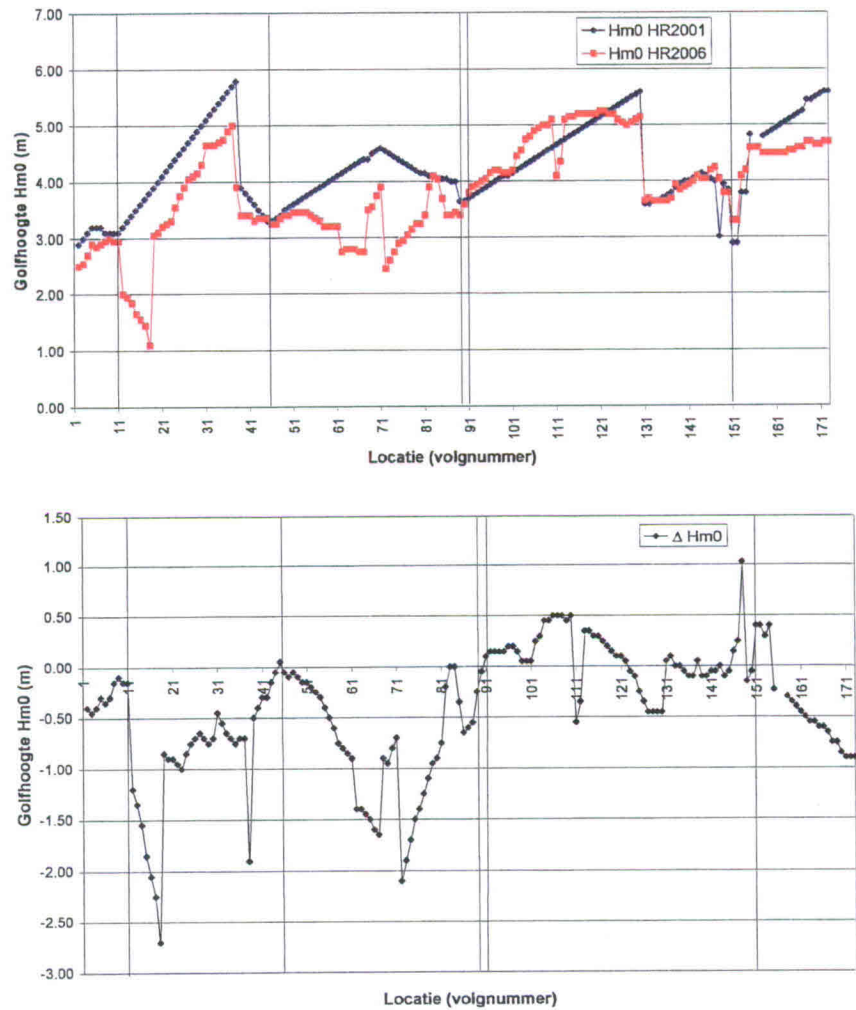
Figuur C.16 Langsfiguur voor de Waddenzee en Hollandse Kust voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de golfperiode. Verticale strepen geven de deelgebieden weer, te weten: Schiermonnikoog (1-6), Ameland (7-12), Terschelling (13-17), Vlieland (18-19), Texel (20-27), Noord-Holland (28-59), Zuid-Holland (60-69).

Waterstand



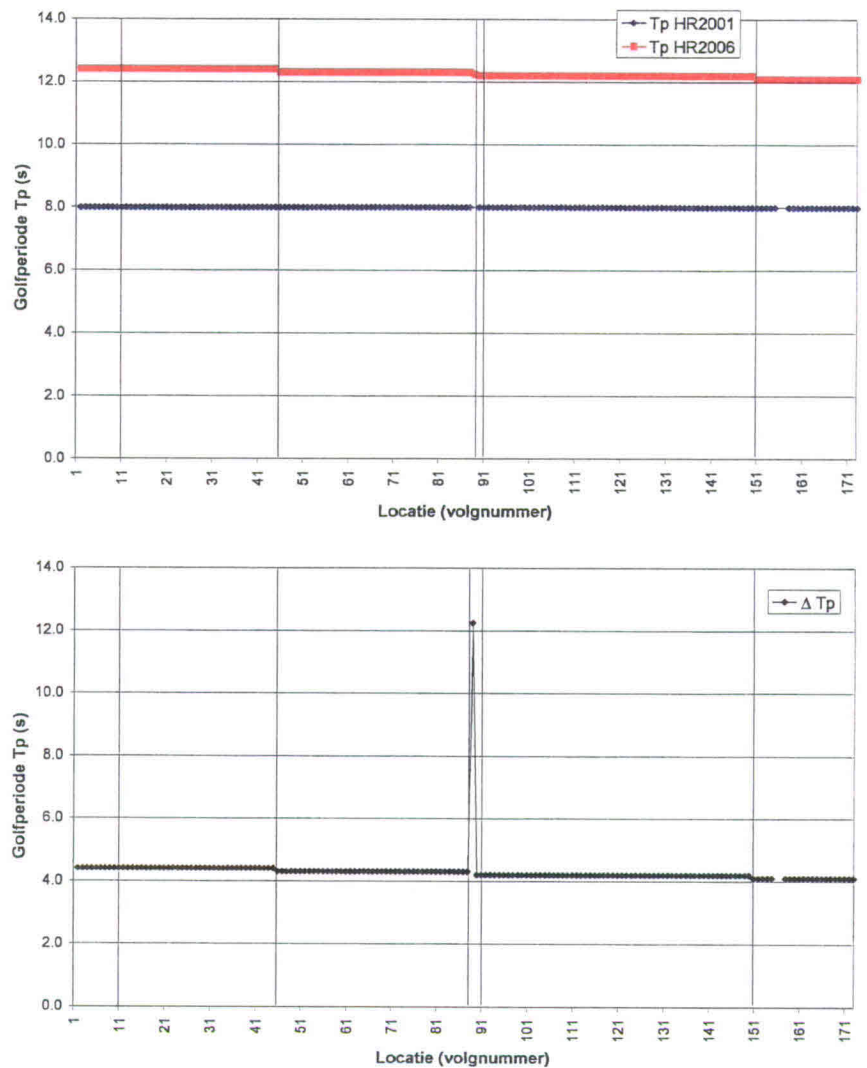
Figuur C.17 Langsfiguur voor de regio ten zuiden van de Maasvlakte voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **waterstand**. Verschillen zijn onder gegeven. Verticale strepen geven de deelgebieden weer, te weten: Voorne (1-11), Goeree (12-45), Schouwen (46-88), Noord Beveland (89), Walcheren (90-150), Zeeuws Vlaanderen (151-173).

Golfhoogte



*Figuur C.18 Langsfiguur voor de regio ten zuiden van de Maasvlakte voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **golfhoogte**. Verschillen zijn onder gegeven. Verticale strepen geven de deelgebieden weer, te weten: Voorne (1-11), Goeree (12-45), Schouwen (46-88), Noord Beveland (89), Walcheren (90-150), Zeeuws Vlaanderen (151-173).*

Golfperiode



*Figuur C.19 Langsfiguur voor de regio ten zuiden van de Maasvlakte voor de hydraulische randvoorwaarde tbv HR2006 (rode lijn) en HR2001 (blauwe lijn) voor de **golfperiode**. Verschillen zijn onder gegeven. Verticale strepen geven de deelgebieden weer, te weten: Voorne (1-11), Goeree (12-45), Schouwen (46-88), Noord Beveland (89), Walcheren (90-150), Zeeuws Vlaanderen (151-173).*

Bijlage D Rekenvoorbeeld methode “De Haan”

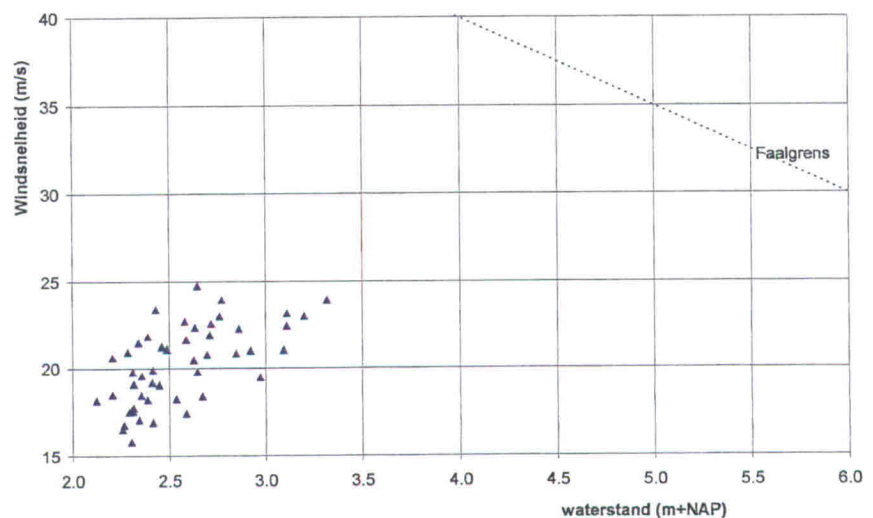
Hoofdstuk 3 beschrijft de probabilistische rekenmethode van het programma HYDRA-K: de methode “De Haan”. Deze bijlage geeft een getallenvoorbeeld om het principe van deze methode te illustreren. Het is een fictief getallenvoorbeeld, maar met realistische waarden. Deze bijlage is geïnspireerd op een eerder rekenvoorbeeld van dhr. Vrouwenfelder (WL & TNO Bouw, 2004a).

Uitgangspunt is een fictieve simultane meetreeks van wind en waterstand (Figuur D.1). Voor het gemak beschouwt dit voorbeeld niet de afzonderlijke windrichtingssectoren waarbinnen de metingen vallen. Het zijn in totaal 50 waarnemingen en we veronderstellen dat deze in een tijdsbestek van 50 jaar zijn verzameld (NB dat betekent niet dat dit allemaal jaarmaxima zijn).

In de figuur is ook een (fictieve) faalgrens weergegeven:

$$u + 5h = 60 \quad (D.1)$$

waarin u de windsnelheid representeert en h de waterstand. Voor combinaties van windsnelheid en waterstand die rechtsboven deze lijn liggen “faalt” de kering, d.w.z. de kering is niet in staat de resulterende hydraulische belasting voldoende te weerstaan. Uit de figuur blijkt dat onder de “gemeten” condities de kering niet in gevaar is geweest: de waarnemingen komen niet in de buurt van de faalgrens.



Figuur D.1 Fictieve meetreeks van windsnelheid en waterstand en de grens van falen.

De eerste stap in het berekenen van de faalkans is het opschalen van de metingen. Dit gebeurt in het zogenaamde “standaard exponentiële vlak”. De metingen worden daartoe eerst omgezet in standaard exponentieel verdeelde waarnemingen. Per meting wordt daartoe eerst de overschrijdingskans bepaald op basis van de marginale verdeling

(zie hoofdstuk 5). Een andere mogelijkheid is om de overschrijdingskans direct te schatten uit de reeks waarnemingen. De hoogste waterstand heeft in dit voorbeeld dan een geschatte jaarlijkse overschrijdingskans van 1 op 50, de op één na hoogste waarneming heeft een jaarlijkse overschrijdingskans van 2 op 50, ofwel 1 op 25, etc.

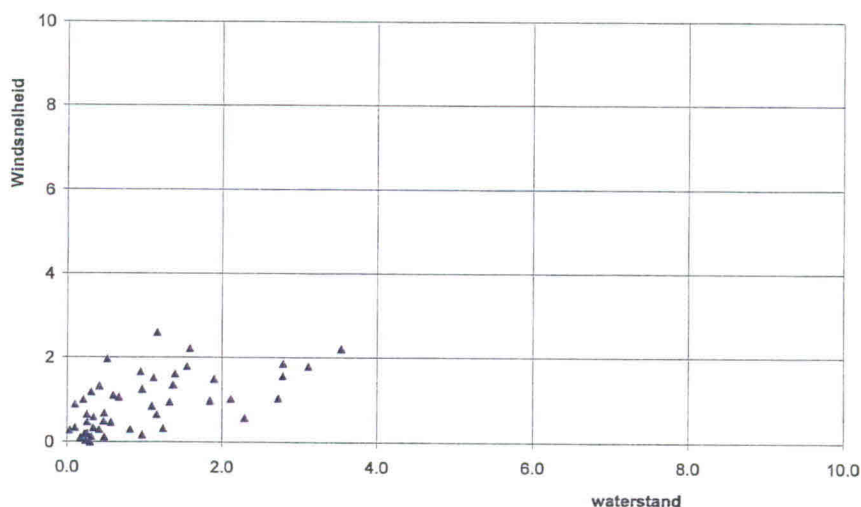
De vertaling naar standaard-exponentieel verdeelde variabelen is vrij eenvoudig. Stel dat we een waterstand beschouwen met een jaarlijkse overschrijdingskans van 1 op 10, ofwel 0.1. Bij de vertaalslag kiest de methode de standaard-exponentieel verdeelde variabele met dezelfde overschrijdingskans. NB, de standaard exponentiële verdelingsfunctie is als volgt:

$$F(x) = 1 - e^{-x} \quad (D.2)$$

waarin F de *onderschrijdingskans* is van de standaard exponentieel verdeelde variabele x . De waterstand in ons rekenvoorbeeld heeft een *overschrijdingskans* van 0.1 en derhalve een *onderschrijdingskans* van 0.9. Dat betekent:

$$0.9 = 1 - e^{-x} \Rightarrow x = -\ln(0.1) \approx 2.3 \quad (D.3)$$

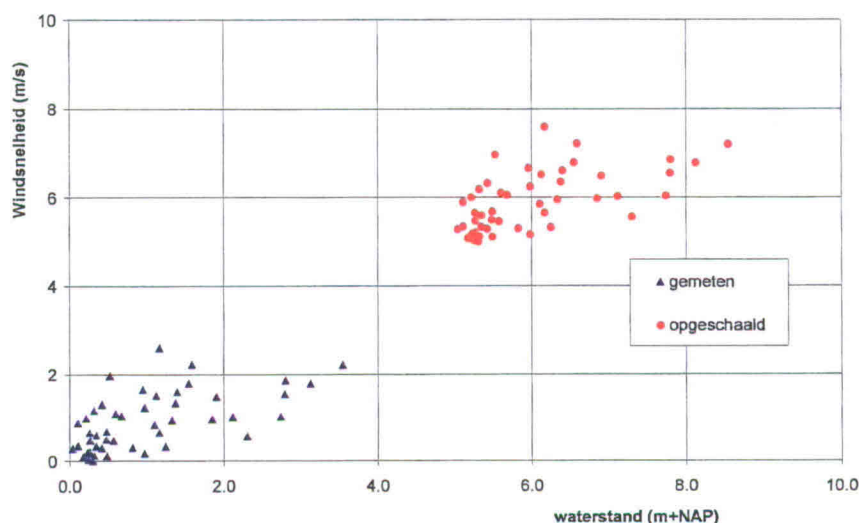
Onderstaande figuur toont hoe de “metingen” uit het getallenvoorbeeld eruit zien na deze vertaalslag. Merk op dat de vorm van de puntenwolk veranderd is. De rangorde van de punten is echter ongewijzigd: hoe hoger de waarde van de windsnelheid c.q. waterstand, hoe hoger de standaard exponentieel verdeelde waarde.



Figuur D.2 Waarnemingen uit Figuur D.1 vertaald naar de standaard exponentiële ruimte.

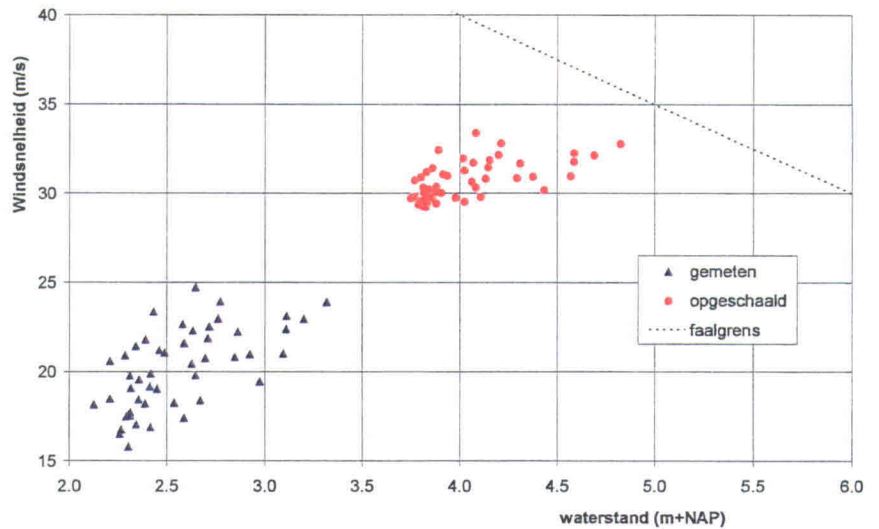
Vervolgens worden de waarden in deze zogenaamde “standaard exponentiële ruimte” opgeschaald met een, vooralsnog onbekende, waarde v . Dat betekent dat zowel bij de (standaard exponentiële) windsnelheid als bij de (standaard exponentiële) waterstand een

waarde ν opgeteld wordt. In de figuur betekent dit dat de puntenwolk onder een hoek van 45 graden wordt getransleerd over een lengte ν , waarbij de vorm van de wolk behouden blijft. Figuur D.3 laat het voorbeeld zien van een verschuiving met een ν -waarde gelijk aan 5.



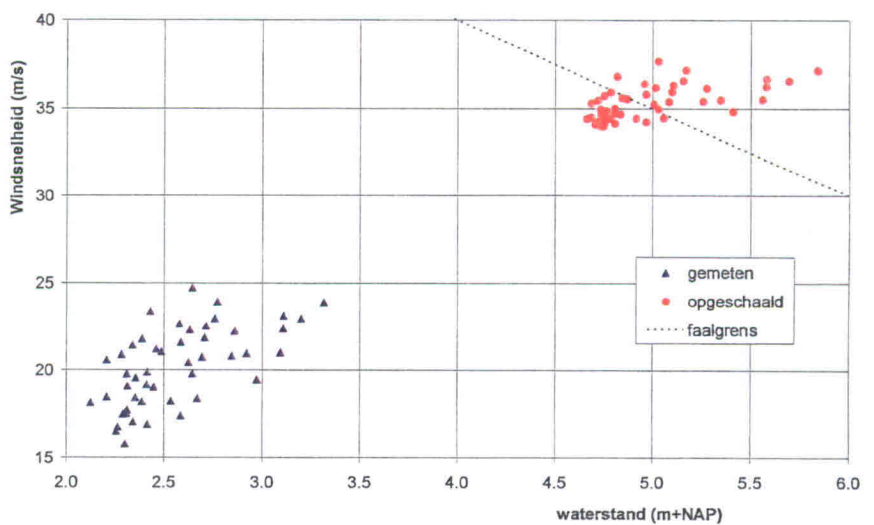
Figuur D.3 Opschalen in de standaard exponentiele ruimte. $\nu = 5$

Na opschaling in de standaard exponentiele ruimte worden de opgeschaalde standaard exponentieel verdeelde variabelen weer terug vertaald naar “werkelijke” waarden. Daartoe wordt exact de omgekeerde vertaalslag toegepast als eerder. Met andere woorden: stel dat we een standaardexponentiële waarde beschouwen met een jaarlijkse overschrijdingskans van 1 op 10, ofwel 0.1, dan hoort daarbij een waterstand (of windsnelheid) met dezelfde overschrijdingskans. De overschrijdingkansen van de wind en waterstand worden weer bepaald op basis van de marginale verdelingen uit hoofdstuk 5. Figuur D.4 toont de aldus verkregen verzameling opgeschaalde waarden na vertaling van de standaard exponentiële waarden uit Figuur D.3. Uit Figuur D.4 blijkt dat de oorspronkelijke puntenwolk van waarnemingen (blauwe driehoeken) van vorm veranderd is na opschaling (rode cirkels). In dit voorbeeld is voor de transformatie de wind- en waterstand statistiek van locatie Hoek van Holland toegepast (uit hoofdstuk 5).



Figuur D.4 Opschalen in de werkelijke ruimte. $\nu = 5$

Figuur D.4 toont tevens de faalgrens. Daaruit blijkt dat ook de opgeschaalde waarden niet tot falen van de kering leiden. Voor een goede schatting van de faalkans is een aantal opgeschaalde gebeurtenissen nodig dat wél tot falen van de kering leidt. Met andere woorden: de punten moeten verder opgeschaald worden door een hogere waarde van ν te kiezen. Figuur D.5 laat zien dat bij ν gelijk aan 8 er wel een aantal (21) punten in het faalgebied terecht komt.



Figuur D.5 Opschalen in de werkelijke ruimte. $\nu = 8$

Nu kan de faalkans (faalfrequentie) van de kering berekend worden met de volgende formule:

$$\mu = \frac{\kappa}{\Delta} e^{-\nu}$$

met:

- μ = de faalfrequentie (per jaar);
- κ = aantal punten dat in het faalgebied geschoven is;
- υ = de grootte van de verschuiving;
- Δ = de lengte van de meetreeks (in jaren).

In dit rekenvoorbeeld geeft dit als uitkomst

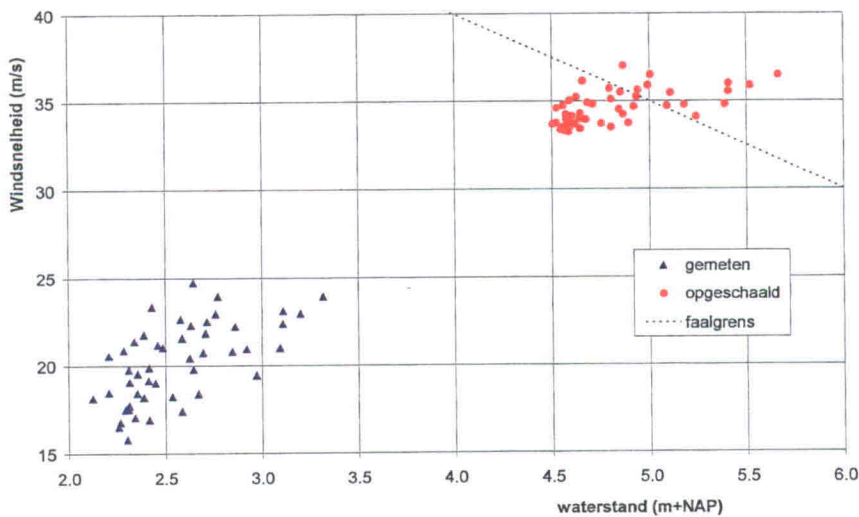
$$\mu = \frac{21}{50}e^{-8} = 1.41 \cdot 10^{-4}$$

ofwel een geschatte herhalingstijd van 7100 jaar.

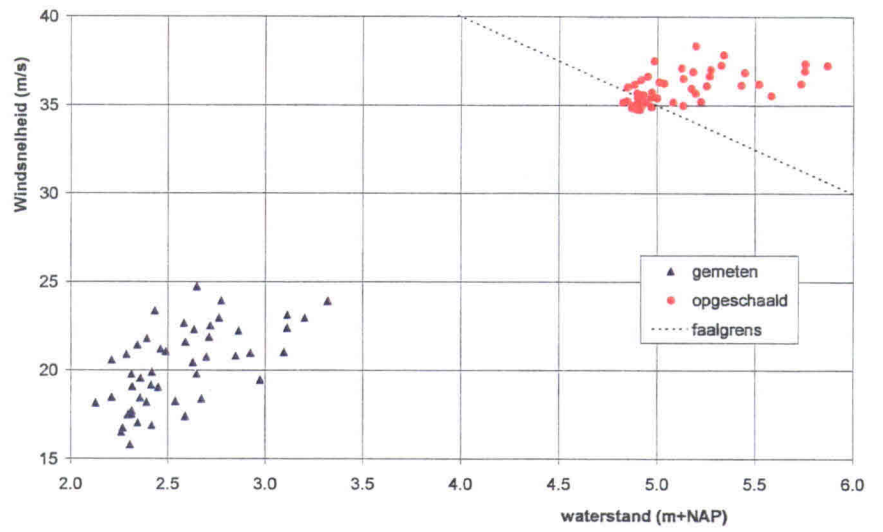
De keuze van υ in het bovenstaande verhaal is enigszins willekeurig geweest. Tabel D.1 toont aan dat bij een relatief kleine verandering in de waarde van υ de uitkomst van de geschatte faalfrequentie nauwelijks verandert. Echter, bij grotere verandering komen (vrijwel) alle punten in het faalgebied terecht, of juist (vrijwel) geen één en wordt de uitkomst onbetrouwbaar (zie WL & TNO Bouw 2004a). Het is derhalve zaak om voldoende waarnemingen in het faalgebied te plaatsen, maar niet te veel. HYDRA-K lost dit op door dié waarde van υ te kiezen waarvoor het aantal waarnemingen in het faalgebied gelijk is aan κ , waarbij κ een getal is dat door de gebruiker ingevoerd wordt.

Tabel D.1 resultaten voor verschillende waarden van υ

υ	7.5	8	8.5
κ	13	21	35
Δ	50	50	50
μ	1.44E-04	1.41E-04	1.42E-04
herhalingstijd	6954	7098	7021



Figuur D.6 Opschalen in de werkelijke ruimte. $\upsilon = 7.5$



Figuur D.7 Opschalen in de werkelijke ruimte. $\nu = 8.5$

Bijlage E Kwaliteitscontrole voor HR2006

Dit rapport beschrijft de diverse stappen die zijn uitgevoerd om de hydraulische randvoorwaarden 2006 (HR2006) te bepalen. Deze bijlage beschrijft de interne kwaliteitsborging die gedurende het traject is verzorgd op de volgende onderdelen:

1. de vertaalslag van golfcondities op diep water naar het ondiepe deel van de Nederlandse kust met het golfmodel SWAN;
2. het probabilistische rekenmodel voor harde waterkeringen: HYDRA-K;
3. rekenresultaten van HYDRA-K voor harde waterkeringen ten behoeve van de HR2006; en
4. rekenresultaten voor duinwaterkeringen ten behoeve van de HR2006.

[ad 1] De SWAN resultaten zijn opgeslagen in de database 'KUSTDB2006'. Deze KUSTDB2006 is speciaal gemaakt ten behoeve van het HR2006 project. De kwaliteit van dit instrument is gecontroleerd door (Haskoning ,2005a). Vervolgens zijn met behulp van de KUSTDB2006 de rekenresultaten van SWAN op systematische wijze gecontroleerd, met name op fysische consistentie (zie ook paragraaf 6.3.8). Een belangrijk resultaat van deze controle is de zwarte lijst; een lijst van kustlocaties waar SWAN twijfelachtige rekenresultaten laat zien. De omvang van deze zwarte lijst is beperkt; de meeste SWAN resultaten zijn namelijk goed bevonden tijdens deze controle. De controle van de rekenresultaten van SWAN staat beschreven in (Haskoning 2006).

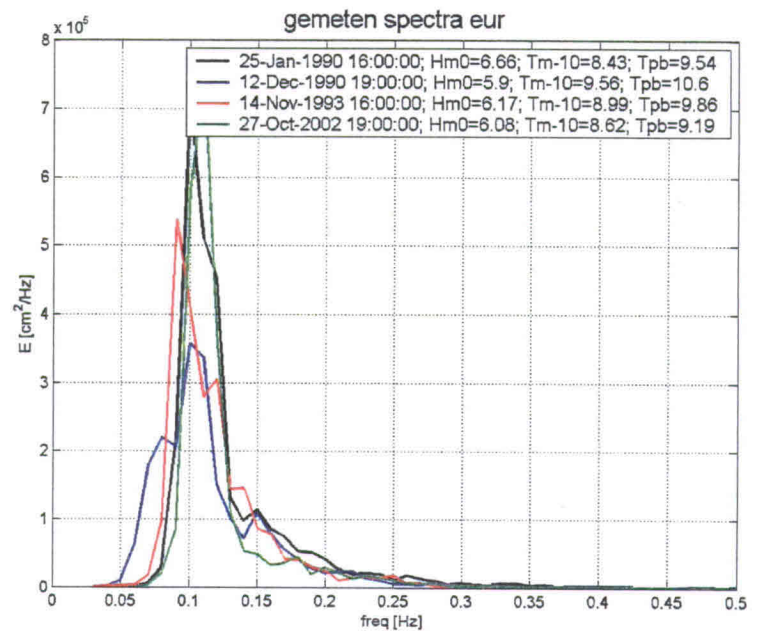
[ad 2] Het probabilistische model HYDRA-K genereert uiteindelijk de randvoorwaarden voor harde waterkeringen voor HR2006. HYDRA-K is binnen het HR2006 project uitgebreid getest op de juiste werking (HKV/WL 2005). Rijkswaterstaat is eigenaar van HYDRA-K en heeft de bewaking van de kwaliteit ondergebracht in het "Hydraulische Randvoorwaarden Beheer en Onderhoud".

[ad 3] De rekenresultaten van HYDRA-K in het kader van HR2006 zijn beoordeeld door een vergelijking te maken met de resultaten van de zogenaamde "CRASH actie" uit 2002/2003. De CRASH-actie is destijds uitgevoerd om een actueel beeld te krijgen van de hydraulische belasting naar aanleiding van het TAW advies (TAW 02-78). Paragraaf 10.2 beschrijft de vergelijking tussen resultaten van de CRASH-actie en de resultaten van HR2006. Verder zijn de resultaten voor HR2006 ook vergeleken met de resultaten van HR2001. Deze vergelijking staat beschreven in paragraaf 9.2.

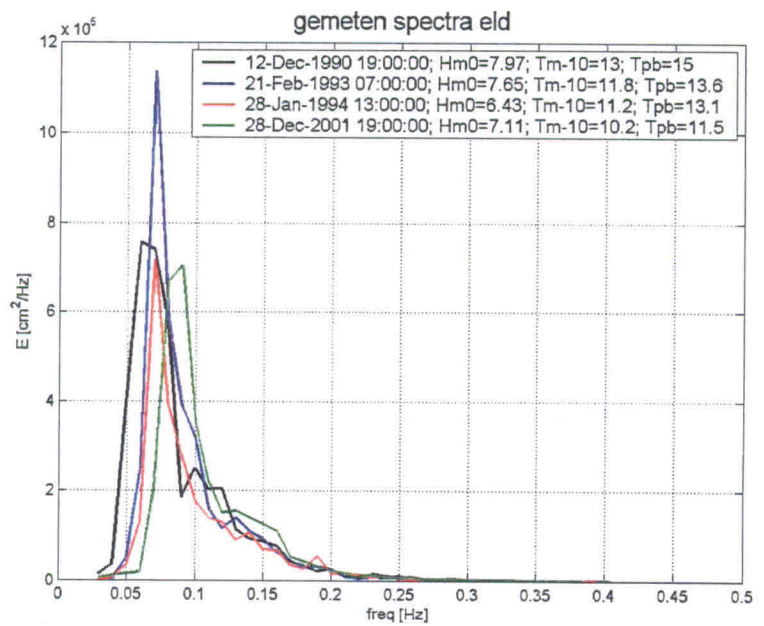
[ad 4] Voor duinwaterkeringen is een andere methode gebruikt dan voor harde waterkeringen. De rekenresultaten voor duinen van HR2006 zijn vergeleken met de HR2001. Deze vergelijking staat beschreven in de paragrafen 9.3 en 10.3.

Binnen het HR2006 project zijn additioneel producten gemaakt met het oogmerk om de kwaliteit van de HR2006 door externe partijen te controleren. Zo is er de 'WAS-WORDT' lijst (zie bijlage G) waarin per dijkvak cq duinsectie een vergelijking is gemaakt tussen HR2006 en HR2001. Deze lijst is aan de beheerders van de waterkering gegeven ter controle. Verder maakt ook het voorliggende rapport onderdeel uit van de kwaliteitsborging.

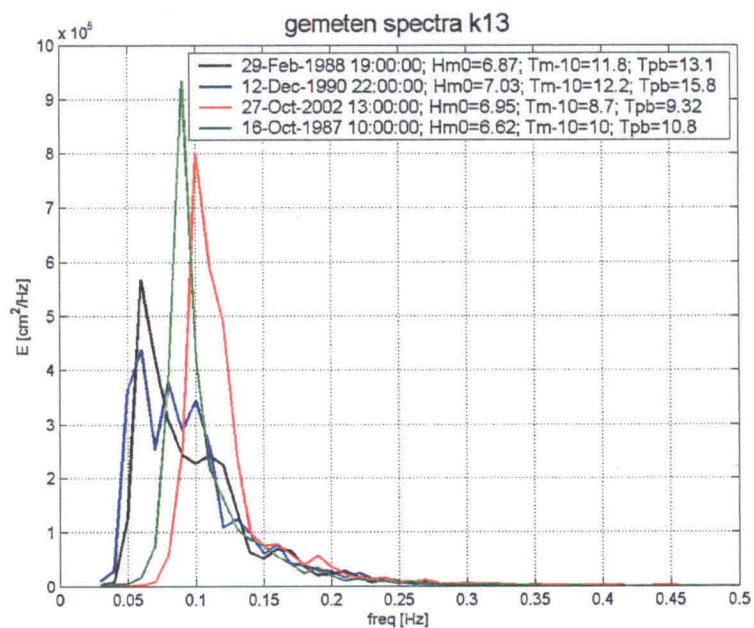
Bijlage F Gemeten golfspectra voor stormen



Figuur F.1 Gemeten golfspectra voor Europlatform



Figuur F.2 Gemeten golfspectra voor Eierlandse rgat



Figuur F.3 Gemeten golfspectra voor K13

Bijlage G Was-wordt tabellen met CONCEPT HR2006

Deze bijlage bevat de Was-wordt tabellen van de hydraulische randvoorwaarden voor 2006.

Bijlage H Gesorteerde Was-wordt tabellen

In deze bijlage staan de Was-wordt tabellen per regio gesorteerd naar hun volgnummer. Er zijn 4 regio's voor harde keringen en 2 regio's voor de zachte keringen onderscheiden (zie bijlage C en Tabel H.1). De volgnummers zijn door RIKZ toegekend en geven de dijkvakken in een regio weer in een geografische rangschikking.

In de tabellen die hier worden gepresenteerd kan per volgnummer (conform de locatienummers in de *langsfiguren* van bijlage C) de hydraulische randvoorwaarden worden teruggevonden. De volgnummers zijn in kleur weergegeven, zodat de regio hieraan direct herkenbaar is. De volgende regionummers en kleuren zij gehanteerd:

Tabel H.1 Gehanteerde kleuren voor elke regio.

Regio	Type	Kleur
1. Oosterschelde	Harde kering	oranje
2. Westerschelde	Harde kering	groen
3. Hollandse Kust	Harde kering	roze
4. Waddenzee	Harde kering	blauw
5. Hollandse kust en Wadden	Zachte kering	rood
6. Zeeland (ten zuiden van Maasvlakte)	Zachte kering	bruin

