

**Achtergrondrapportage  
HR2011 voor zee en estuaria**

WTI - HR2011





# **Achtergrondrapportage HR2011 voor zee en estuaria**

**WTI - HR2011**

Caroline Gautier  
Jacco Groeneweg

1204143-002



**Titel**

Achtergrondrapportage HR2011 voor zee en estuaria

**Opdrachtgever**

RWS - Waterdienst

**Project**

1204143-002

**Kenmerk**

1204143-002-HYE-0037

**Pagina's**

97

**Trefwoorden**

Hydraulische randvoorwaarden, WT12011, waterstanden, golven, Hydra-K

**Samenvatting**

De Waterwet schrijft voor dat iedere zes jaar alle primaire waterkeringen in Nederland op veiligheid moeten worden getoetst. Bij de toetsing gaan de beheerders na of de keringen voldoen aan de veiligheidsnorm. Deze veiligheidsnorm is voor elk dijkkringgebied gedefinieerd als een toegestane overschrijdingskans - per jaar - van de waterstand die een primaire waterkering nog veilig moet kunnen keren. Om de toetsing uit te kunnen voeren moeten onder andere de maatgevende hydraulische belastingen, ook wel genoemd de Hydraulische Randvoorwaarden (HR), bekend zijn. De HR bestaan uit een waterstand, significante golfhoogte, spectrale golfperiode en gemiddelde golfrichting.




Eén van de deelsystemen waarvoor HR moeten worden afgeleid is 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 gegevens en methoden om te komen tot de HR voor keringen langs de zoute wateren. Voor de HR2011 zijn alleen voor het Waddengebied en de harde keringen van de Westerschelde nieuwe berekeningen uitgevoerd, waarbij deels nieuwe methoden zijn gehanteerd. In de overige gebieden zijn de waarden van de HR2006 overgenomen.

Voor de harde keringen zijn de maatgevende golven – net als bij de HR2006 – bepaald met Hydra-K. Een belangrijk verschil is echter dat de vertaling van offshore naar de kust nauwkeuriger is uitgevoerd, doordat ook de aanwezigheid van stroming en het effect van het stormverloop in rekening zijn gebracht. Bovendien is de golfstatistiek op diep water aangepast op basis van nu beschikbare langere meetreeksen.

De methode om voor de duinen de HR te bepalen is ook gewijzigd ten opzichte van de HR2006. Het belangrijkste verschil is de locatie van de golfrandvoorwaarden die niet automatisch op de NAP - 20 m dieptecontour wordt gekozen, maar op een representatieve locatie meestal dicht bij de kust. Ook het probabilistisch instrumentarium is verbeterd.

**Referenties**

Wettelijk Toetsinstrumentarium, projectplan, december 2008.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	jan. 2012	Caroline Gautier		Joost Beckers		Marcel van Gent	
		Jacco Groeneweg					
2	maart 2012	Caroline Gautier		Joost Beckers		Marcel van Gent	
		Jacco Groeneweg					

**Status**

definitief



## Inhoud

Lijst van Tabellen	v
Lijst van Figuren	vii
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Hydraulische randvoorwaarden in het kader van de Waterwet	1
1.2 Doelstelling van dit rapport	2
1.3 Verdeling van normen over dijkringen	2
1.4 Opzet van dit rapport	3
1.5 Auteurs en organisatie	4
1.6 Status van het rapport	4
<b>2 Uitgangspunten en gemaakte keuzes</b>	<b>7</b>
2.1 Inleiding	7
2.2 Gemaakte keuzes voor aanpassingen ten aanzien van HR2006	7
2.3 Uitgangspunten bij bepaling HR	9
2.4 Consequenties van de nieuwe randvoorwaarden	10
<b>3 Methode voor het bepalen van HR op hoofdlijnen</b>	<b>11</b>
3.1 Inleiding	11
3.2 Methode voor het bepalen van HR voor harde keringen m.b.t. kruinhoogte	11
3.2.1 Inleiding	11
3.2.2 Beschrijving van HR-keten op hoofdlijnen	11
3.3 Methode voor het bepalen van HR voor harde keringen m.b.t. bekleding	13
3.4 Methode voor het bepalen van HR voor duinen	15
<b>4 Probabilistische rekenmethode HR voor harde keringen</b>	<b>19</b>
4.1 Inleiding	19
4.2 Probabilistische aanpak van Hydra-K	19
4.3 Berekenen van de faalkans	20
4.3.1 Methode 'De Haan'	20
4.3.2 Benodigdheden voor methode 'De Haan'	21
4.3.3 Het opschalen van waarnemingen	22
4.3.4 Vertaling naar de waterkering met een transformatiematrix	23
4.3.5 De kansberekening	24
4.3.6 Asymptotische afhankelijkheid	24
4.4 Bepalen van hydraulische randvoorwaarden	25
4.4.1 Berekening illustratiepunt	25
4.4.2 Waterstand gelijk aan toetspeil ('IP2')	27
4.5 Opmerkingen bij methode 'De Haan'	27
<b>5 Rekenmethode HR voor duinen in het Waddengebied</b>	<b>29</b>
5.1 Inleiding	29
5.2 Probabilistische aanpak voor duinen	30
5.2.1 Inleiding	30
5.2.2 Het hydraulische belastingmodel	30
5.2.3 Het duinafslagmodel D++	34
5.2.4 Het probabilistische rekenmodel	34

5.3	Berekenen van de faalkans	37
5.4	Bepalen van HR	40
5.4.1	Rekenregel	40
5.4.2	Waterstand	40
5.4.3	Randvoorwaardenlocatie	40
5.4.4	Golfhoogte	40
5.4.5	Golfperiode $T_{m-1,0}$	41
<b>6</b>	<b>Meetgegevens</b>	<b>43</b>
6.1	Inleiding	43
6.2	Metingen van waterstand	43
6.3	Metingen van wind	44
6.4	Metingen van golven	44
6.4.1	De meetgegevens	44
6.4.2	Verwerking golfmetingen ten behoeve van de marginale statistiek	45
6.5	Metingen ten behoeve van gecombineerde statistiek	46
<b>7</b>	<b>Extreme waarden statistiek</b>	<b>49</b>
7.1	Inleiding	49
7.2	Verdelingsfunctie voor wind, waterstand en golven	50
7.3	Windstatistiek	51
7.4	Waterstandstatistiek	51
7.4.1	Inleiding	51
7.4.2	Toets- en rekenpeilen	52
7.4.3	Waterstandstatistiek voor Hydra-K en voor de duinen op de Waddeneilanden	54
7.5	Golfstatistiek	56
7.5.1	Inleiding	56
7.5.2	Omni-directionele golfstatistiek	57
7.5.3	Windrichtingsafhankelijke golfstatistiek	58
<b>8</b>	<b>Berekening van waterstand en golven op kustlocaties</b>	<b>61</b>
8.1	Inleiding	61
8.2	Berekening van waterstanden op kustlocaties	61
8.3	Methode voor de berekening golven op kustlocaties	62
8.4	SWAN simulaties	65
8.4.1	Inleiding	65
8.4.2	Het SWAN golfmodel en de instellingen	66
8.4.3	Offshore golfrandvoorwaarden	67
8.4.4	Wind, stroming, waterstand	68
8.4.5	SWAN berekeningen Waddenzee	71
8.4.6	SWAN berekeningen Westerschelde	73
<b>9</b>	<b>HR2011 voor dijken en vergelijking met HR2006</b>	<b>77</b>
9.1	Inleiding	77
9.2	Waddenzee	77
9.2.1	Profielendatabase	77
9.2.2	Toetspeilen	78
9.2.3	Golfrandvoorwaarden	79
9.3	Westerschelde	80
9.3.1	Profielen database	80



9.3.2	Toets- en rekenpeilen	81
9.3.3	Golfrandvoorwaarden	81
<b>10</b>	<b>HR2011 voor duinen en vergelijking met HR2006</b>	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>Conclusies</b>	<b>87</b>
<b>12</b>	<b>Overzicht rapportages WTI 2011 – HR Zout</b>	<b>89</b>
<b>13</b>	<b>Referenties</b>	<b>93</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Rekenvoorbeeld methode ‘De Haan’</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Vergelijkingen afslagprofiel volgens afslagmodel D++</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Figuren</b>	<b>C-1</b>



## Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Gemaakte keuzes en argumentatie t.a.v. gebiedsoverschrijdende aspecten	9
Tabel 3.1	Faalmechanismen voor verschillende typen dijkbekledingen in Hydra-K	14
Tabel 5.1	Kansbijdrage windrichtingen aan waterstandsniveau $h^*$ (afkomstig uit Diermanse, 2012)	33
Tabel 6.1	Overzicht golfmeetlocaties die gebruikt zijn voor HR2011	45
Tabel 6.2	Overzicht locatie-combinaties van gebruikte meetstations per regio.	47
Tabel 6.3	Overzicht van de gebruikte simultane waarnemingsbestanden in de HR2006 en in WTI-2011. bron: HKV (2010)	47
Tabel 7.1	Weibull parameters voor de windstatistiek (afkomstig van de Hydra-K database)	51
Tabel 7.2	Omni-directionele Weibull parameters voor de waterstand (bron: Hydra-K 3.6.3 m.u.v. Texel Noordzee)	56
Tabel 7.3	Extremes diep water golven met een herhalingstijd van 10.000 jaar, gebaseerd op meetreeksen 1979-2002 (gebruikt voor HR2006) en op meetreeksen 1979-2008 (gebruikt voor Waddenzee en Westerschelde t.b.v. HR2011); overgenomen uit Roscoe (2009b).	58
Tabel 8.1	Steunpunten voor transformatie offshore waterstand (gebaseerd op: Nicolai, 2010)	61
Tabel 8.2	Labelwaarden voor variabelen windsnelheid, windrichting, windopzet en het faseverschil tussen getij en windopzet, waarvoor voor elke combinatie SWAN berekeningen worden uitgevoerd op de Waddenzee en Westerschelde.	65
Tabel 8.3	In de productieberekening toegepaste windsnelheid en –richting als functie van de potentiële windsnelheid, hoofdwindrichting en moment ten opzichte van de piek van de storm (bron: Klein en Kroon, 2011b).	70
Tabel 9.1	Globale verschillen tussen HR2011 en HR2006. Zie Figuur 9.3 voor de kilometrering.	80
Tabel 9.2	Globale verschillen Hydra 2011 – Hydra 2006 per segment en oorzaken verschillen voor de Westerschelde. De segmentnummering loopt van noordwest met de klok mee naar zuidwest. Segmenten 1 t/m 8 liggen op de noordoever, de overige op de zuidoever.	82
Tabel A.1	Resultaten voor verschillende waarden van $v$	A-4



## Lijst van Figuren

Figuur 1.1	Dijkkringgebieden van Nederland met de bijbehorende normfrequenties (dijkringen langs de Maas in Limburg zijn in deze figuur niet weergegeven).	3
Figuur 1.2	Boomstructuur van WTI rapportages.	4
Figuur 3.1	Schematische weergave van HR-keten voor de zoute wateren ( $U_{10}$ : windsnelheid, $\theta_w$ : windrichting, $h_{s0}$ offshore windopzet, $\varphi_0$ : faseverschil tussen getij en moment van maximale windsnelheid, $h$ : lokale waterstand)	12
Figuur 3.2	Schematische weergave van HR-keten voor duinen in het Waddengebied ( $U_{10}$ : windsnelheid; $\theta_w$ : windrichting; $h$ : lokale waterstand; $H_{m0}$ : significante golfhoogte; $T_{m-1,0}$ : spectrale golfperiode; $C_m$ , $C_d$ : onzekerheidstoelagen; $D_{50}$ : korreldiameter)	16
Figuur 4.1	Voorbeeld van de golfploophoogte (in m+NAP) op de dijk als functie van waterstand en golfhoogte voor de kering.	20
Figuur 4.2	Schematische weergave van het opschalen van stormgebeurtenissen tot nabij of zelfs in het faalgebied.	22
Figuur 4.3	Voorbeeld van het verschuiven van een simultane waarneming, bestaande uit twee stochasten	23
Figuur 4.4	Voorbeelden van niet uitwaaiëren (asymptotisch afhankelijk) en van wel uitwaaiëren (asymptotisch onafhankelijk).	25
Figuur 4.5	Schematische weergave van de methode ter bepaling van de illustratiepunten IP1 en IP2	27
Figuur 5.1	Grafische weergave van de ruimtelijke interpolatie voor 18 duinraaien op de Waddeneilanden. De vier met zwart aangeduide locaties zijn (vlnr) steunpuntlocaties Den Helder (DH), Texel Noordzee (TXN), steunpunt Waddenzee en Huibergat (HBG) (afkomstig uit: Diermanse et al.,2011).	31
Figuur 5.2	Schematische weergave van het probabilistische rekenmodel, zoals toegepast in het kader van WTI 2011 (bron: Diermanse et al. 2011)	35
Figuur 5.3	Voorbeeld van de afslaglengte (m) als functie van waterstand en golfhoogte	37
Figuur 5.4	Het illustratiepunt (IP) in de ruimte van standaard normaal verdeelde variabelen.	39
Figuur 8.1	Schematische weergave van bepaling transformatiematrix ( $U_{10}$ : windsnelheid, $\theta_w$ : windrichting, $h_{s0}$ , offshore windopzet, $\varphi_0$ : faseverschil tussen getij en moment van maximale windsnelheid, $h$ waterstand, $\underline{U}_{cur}$ : stroomsnelheid, $\underline{U}$ : windsnelheid, $H_{m0}$ : significante golfhoogte, $T_{m-1,0}$ : spectrale golfperiode, $x_{bc}$ : locaties op rand van Kuststrookmodel of Waddenmodel)	64
Figuur 8.2	Gemiddeld en geschematiseerd tijdsverloop van de windsnelheid (bron: Beckers et al. 2009)	69
Figuur 8.3	Gemiddeld en geschematiseerd tijdsverloop van de windrichting	69
Figuur 8.4	Overzicht van het rekenrooster gebruikt voor de SWAN productieberekeningen voor de Waddenzee (bron: Klein en Kroon, 2011b).	72

Figuur 8.5 – Bodemligging van het Waddenzee model.	72
Figuur 8.6 Overzicht van het rekenrooster gebruikt voor de SWAN productieberekeningen voor de Westerschelde (bron: Klein en Kroon (2011a)).	74
Figuur 8.7 Bodemligging van het Westerschelde model.	74
Figuur 9.1 Standaardprofiel 3 voor alle Waddenzeelocaties.	78
Figuur 9.2 Verschil in toetspeil: 2017 – 2011 (bron: Groeneweg en Gautier (2011b))	79
Figuur 9.3 Standaardprofielen in de Westerschelde. Links standaardprofiel 2, rechts standaardprofiel 1 (bron: Nicolai, 2011)	81
Figuur 9.4 Toetspeilen Hydra 2011 en HR2006 op vaste land Waddenzee	
Figuur 9.5.a Golfhoogte en -periode Hydra 2011 en HR2006 op vaste land Waddenzee	
Figuur 9.5.b Golfhoogte en -periode Hydra 2011 en HR2006 op Waddeneilanden	
Figuur 9.6 Verschil in golfhoogte $H_{m0}$ Hydra 2011 – HR2006, Waddenzee	
Figuur 9.7 Verschil in spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ Hydra 2011 – HR2006, Waddenzee	
Figuur 9.8 Standaardprofielen in de Westerschelde	
Figuur 9.9 Kilometreringslijn Westerschelde	
Figuur 9.10 Toetspeilen Hydra 2011 Westerschelde	
Figuur 9.11.a Golfhoogte en -periode Hydra 2011 en Hydra 2006 op noordoever Westerschelde	
Figuur 9.11.b Golfhoogte en -periode Hydra 2011 en Hydra 2006 op zuidoever Westerschelde	
Figuur 9.12 Verschil in golfhoogte $H_{m0}$ Hydra 2011 – HR2006, Westerschelde	
Figuur 9.13 Verschil in spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ Hydra 2011 – HR2006, Westerschelde	
Figuur 10.1 Golfhoogte $H_{m0}$ HR2011 en HR2006 voor de duinen op de Waddeneilanden	
Figuur 10.2 Golfperiode $T_{m-1,0}$ HR2011 en HR2006 voor de duinen op de Waddeneilanden	
Figuur 10.3 Globale afslaglengte HR2011 en HR2006 voor de duinen op de Waddeneilanden	

# 1 Inleiding

## 1.1 Hydraulische randvoorwaarden in het kader van de Waterwet

Sinds 2009 is de Waterwet van kracht. Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat iedere zes 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 waterkeringen voldoen aan de wettelijke veiligheidsnorm. Voor het toetsen op veiligheid is door het toenmalige ministerie van Verkeer en Waterstaat een voorschrift uitgebracht: "Voorschrift Toetsen op Veiligheid" (VTV). 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.

De toetsing wordt uitgevoerd met behulp van zogenaamde Hydraulische Randvoorwaarden (HR). De HR vormen een maatgevende combinatie van waterstand en golfcondities (golfhoogte, golfperiode, golfrichting). Een dijk die in staat is om deze maatgevende condities te keren, voldoet aan de gestelde veiligheidsnorm voor het betreffende faalmechanisme, uitgedrukt in een jaarlijkse overschrijdingskans<sup>1</sup>.

De HR worden per toetsronde vastgesteld en tot en met 2006 gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische Randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen", oftewel het Hydraulische Randvoorwaarden boek. Het randvoorwaardenboek voor de eerste toetsronde (1996-2001) is gepubliceerd in 1996. Het randvoorwaardenboek voor de tweede toetsronde (2001-2006) kwam uit in 2001. Het meest recente randvoorwaardenboek is gebruikt voor de derde toetsronde (2006-2011) en is vastgesteld en uitgekomen in 2006. Voorliggend rapport dient ter voorbereiding op de volgende versie, welke was beoogd in 2011, ten behoeve van de vierde toetsronde (2011-2017).

De formele vaststelling van de afgeleide concept HR door de minister van Infrastructuur en Milieu heeft (nog) niet plaatsgevonden. Inmiddels is duidelijk geworden dat er geen vierde toetsronde komt en is het nog maar zeer de vraag of de concept HR in de toekomst überhaupt voor toetsing gebruikt gaan worden. Desalniettemin zullen we in dit rapport gemakshalve naar de nieuw afgeleide getallen verwijzen als HR2011.

Toetsvoorschriften en Hydraulische Randvoorwaarden zijn samengebracht in het Wettelijk Toetsinstrumentarium 2011, afgekort WTI 2011. WTI 2011 is opgebouwd uit de volgende drie onderdelen:

- 1 Het VTV-Algemeen deel: dit deel beschrijft het toetsproces op hoofdlijnen en schetst onder andere de kaders waarbinnen de toetsing wordt uitgevoerd en de beoordelings- en rapportageverplichtingen;
- 2 Het VTV-Technisch deel: dit deel beschrijft de toetsmethoden en uitwerking van toetsregels;

---

1. Artikel 2.2, lid 1 van de Waterwet: In de bij deze wet behorende bijlage II is voor elke dijkkring de veiligheidsnorm aangegeven als gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op de overige het waterkerend vermogen bepalende factoren.

- 3 Het HR-Technisch deel: dit deel beschrijft de voor de toetsing te hanteren HR en de wijze waarop deze dienen te worden toegepast.

De voorliggende rapportage heeft betrekking op het HR-Technisch deel.

## 1.2 Doelstelling van dit rapport

Eén van de deelsystemen waarvoor HR 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 HR langs de Nederlandse kust voor HR2011. De aanpak verschilt op een aantal onderdelen van de aanpak in het kader van HR2006, om uiteenlopende redenen. De vergelijking tussen de resultaten van HR2006 en HR2011 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 HR worden afgeleid. De diverse studies en projecten staan beschreven in een groot aantal achtergrondrapporten.

Dit rapport is geschreven met als doel een overzicht te geven 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 HR langs de Nederlandse kust.

## 1.3 Verdeling van normen over dijkringen

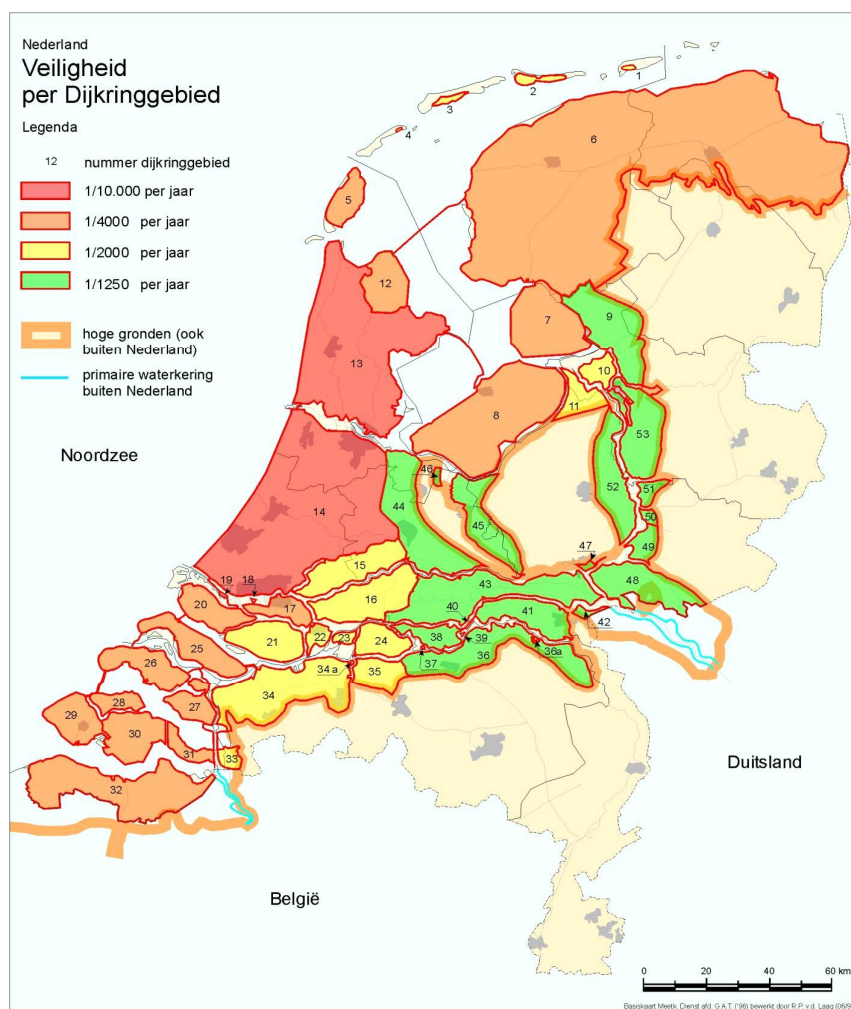
De Waterwet (2009) schrijft ten behoeve van de periodieke toetsing voor aan welke normfrequenties de primaire waterkeringen dienen te voldoen. Deze normfrequenties zijn vastgesteld per dijkkringgebied. Figuur 1.1 geeft een overzicht van dijkkringgebieden in Nederland en de bijbehorende normfrequenties. Deze normfrequenties geven de jaarlijkse overschrijdingskans 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 voor de kustgebieden zijn 1/2.000 per jaar (Waddeneilanden, excl. Texel), 1/4.000 per jaar (Texel, Waddenkust Friesland, Groningen, Wieringen, de Zeeuwse kust, de Westerschelde en de Oosterschelde<sup>2</sup>) en 1/10.000 per jaar (Hollandse kust). De voor dit rapport relevante dijkkringgebieden zijn: 1-6, 12-14, 20, en 25-32.

---

2. 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 Waterwet.





Figuur 1.1 Dijkringgebieden van Nederland met de bijbehorende normfrequenties (dijkeringen langs de Maas in Limburg zijn in deze figuur niet weergegeven).

#### 1.4 Opzet van dit rapport

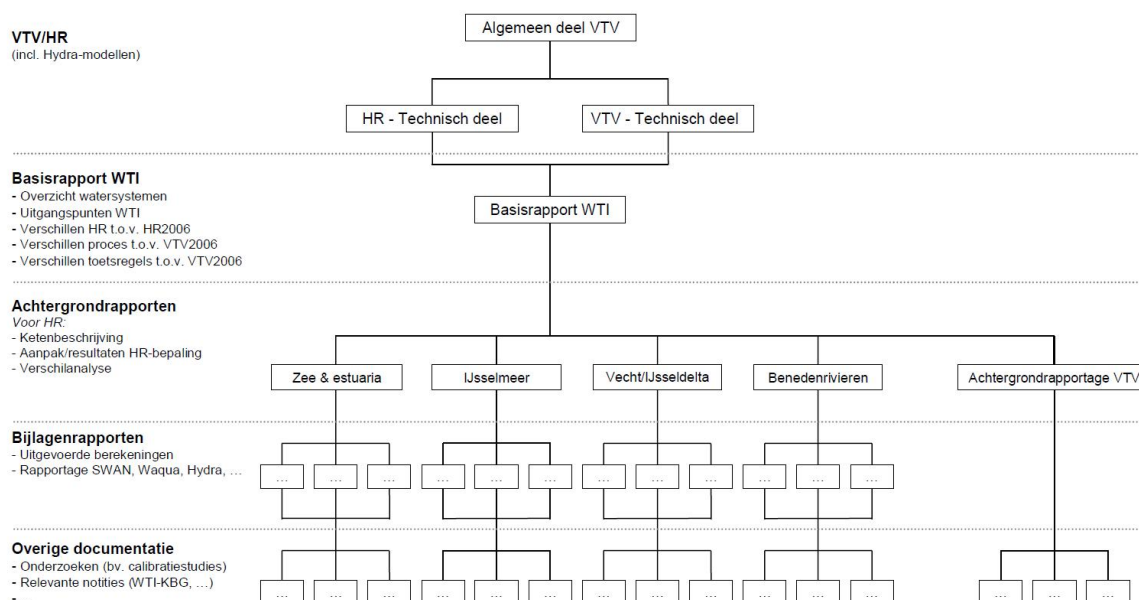
Voorliggend rapport is onderverdeeld in drie delen:

- 1 Hoofdstuk 2 en 3 zijn de inleidende hoofdstukken. Hoofdstuk 2 geeft een beknopt overzicht van de gemaakte keuzes om te komen tot WTI 2011 en een opsomming van de belangrijkste uitgangspunten bij de bepaling van de HR. Hoofdstuk 3 beschrijft in detail de keten die wordt doorlopen om HR af te leiden voor dijken, kunstwerken en duinen.
- 2 Hoofdstuk 4 t/m 8 bevatten de beschrijvingen van de methoden voor de bepaling van de HR. Allereerst wordt in hoofdstuk 4 een overzicht gegeven van de probabilistische rekenmethode waarmee de HR voor de harde keringen worden bepaald. Hoofdstuk 5 beschrijft hoe de HR voor de duinen worden bepaald. In hoofdstuk 6 worden de 'ruwe' meetgegevens (en hun bewerking) behandeld waarmee de HR zijn bepaald. De extrapolatie van bewerkte meetgegevens tot een statistische verdeling van extreme waarden (extreme waarden statistiek) is gegeven in hoofdstuk 7. De transformatie van golven op diep water naar de teen van de dijk of de HR locatie voor duinen is beschreven in hoofdstuk 8.

3 Hoofdstuk 9-10 geeft een overzicht van de rekenresultaten voor HR2011 voor de Waddenzee en Westerschelde en een vergelijking met HR2006.

De conclusies en aanbevelingen van dit rapport zijn gegeven in hoofdstuk 11.

Een overzicht van de rapportages die zijn opgeleverd voor het onderdeel HR-Zout van WTI2011 is te vinden in hoofdstuk 12. Daar is een uitsplitsing gemaakt naar bijlagenrapporten en overige rapporten/memo's, de termen die ook gehanteerd zijn in de boomstructuur van WTI rapportages, zie Figuur 1.2. Voorliggend achtergrondrapport voor zee en estuaria maakt daarbij onderdeel uit van de derde laag in de boomstructuur en verschaft noodzakelijke achtergrondinformatie ten behoeve van de algemene beschrijvingen die in de eerste twee lagen worden gegeven.



Figuur 1.2 Boomstructuur van WTI rapportages.

## 1.5 Auteurs en organisatie

Dit rapport is samengesteld door Caroline Gautier en Jacco Groeneweg (beide Deltares). Ferdinand Diermanse, Douwe Dillingh (beide Deltares) en Robin Nicolai (HKV<sub>LJN</sub> IN WATER) hebben een significante bijdrage geleverd. De review van het rapport is uitgevoerd door Joost Beckers (Deltares).

In Den Heijer et al. (2007) is uitgebreid beschreven welke uitgangspunten, methoden, gegevens en resultaten zijn gebruikt om tot de HR2006 te komen. De methoden om tot HR 2011 te komen zijn grotendeels dezelfde. Om deze reden hebben we in dit rapport delen van de tekst van Den Heijer et al. (2007) overgenomen.

## 1.6 Status van het rapport

De status van het achtergrondrapport wordt vanuit het project HR Zout een Definitief Concept. Vanuit het project WTI2011 wordt daarmee dit rapport afgerond. Mogelijke wijzigingen/aanvullingen op het achtergrondrapport voor deze definitief gemaakt kan worden, kunnen nog volgen uit:

- beleidskeuzes omtrent het gebruik van de concept HR;
- toepasbaarheidstoets.



## 2 Uitgangspunten en gemaakte keuzes

### 2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft beknopt de aanpak voor het samenstellen van de HR van 2011 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 tussen de HR bepaling voor harde waterkeringen en duinen. De reden hiervoor is het verschil in de definitie van de toetsregels voor de beide typen waterkering, zie Paragraaf 5.1. Daarom is het verschil in aanpak ook nu gehandhaafd.

Waterstanden en golfkarakteristieken zoals golfhoogte en golfperiode vormen samen de HR langs de kust en dienen als invoergegevens voor de rekenregels voor het uitvoeren van de toetsing op veiligheid (opgenomen in HR-Technisch deel). Het VTV-Technisch deel 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. Daarmee is 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 per jaar (of frequentie), is impliciet verdisconteerd in de HR. De HR zijn te beschouwen als een maatgevende gebeurtenis voor het betreffende faalmechanisme bij de gestelde veiligheidsnorm.

Om het toetsproces handzaam te houden bestaan de HR 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 het VTV-Technisch deel bepaald of de kering in staat is om dergelijke hydraulische condities te weerstaan.

Een deel van de HR2011 is gebaseerd op eerder berekende HR2006. Daarnaast zijn er voor een aantal deelgebieden nieuwe berekeningen uitgevoerd. De overwegingen om tot nieuwe berekeningen over te gaan worden in dit hoofdstuk toegelicht.

### 2.2 Gemaakte keuzes voor aanpassingen ten aanzien van HR2006

In 2008 is een lijst van de mogelijke verbeteringen aan WTI 2006 gemaakt, met daarbij de reden en de mogelijke gevolgen van het al dan niet doorvoeren van deze verbeteringen. De volledige lijst van mogelijke verbeteringen is echter te lang voor de beschikbare tijd en middelen van het project WTI 2011. Daarom zijn aan het begin van het traject om tot het WTI 2011 te komen, in 2008, de volgende criteria overeengekomen op basis waarvan besloten is of een potentiële aanpassing van het WTI 2006 wordt doorgevoerd:

- 1 Haalbaarheid
- 2 Betrouwbaarheid (scherp toetsen)
- 3 Robuustheid
- 4 Technisch draagvlak

- 5 Beleidsmatig draagvlak
- 6 Consistentie en uniformiteit

De uiteindelijke keuze voor de aanpassingen is gemaakt door DGW op advies van RWS-Waterdienst en een voor WTI 2011 samengestelde groep van leden uit het ENW, genaamd de ENW\_Klankbordgroep.

De activiteiten en overwegingen om tot een lijst van verbeteringen te komen zijn hieronder aangegeven per gebied:

- Waddenzee

De HR2006 voor het Waddengebied zijn grotendeels gebaseerd op een inventarisatie van in het verleden gehanteerde, soms wel 50 jaar oude, ontwerpwaarden. Het verwerken van nieuwe inzichten uit onderzoek naar mogelijke aanpassingen van het HR instrumentarium ten behoeve van nieuwe HR voor de harde keringen van de Waddenzee hebben de hoogste prioriteit gekregen. De aanpassingen aan het HR instrumentarium hebben betrekking op verbeteringen in de hydraulische modellen (SWAN, WAQUA) en van reguliere activiteiten zoals het updaten van diepwaterstatistiek en toetspeilen. Overgang op een probabilistische aanpak leidt tot een vergroting van de betrouwbaarheid van de resulterende HR. Gecombineerd met deze aanpassingen leidt dit tevens tot vergroting van het technisch draagvlak en consistentie met de aanpak in andere kustwatersystemen.

In 2006 zijn de HR voor de duinen op de Waddeneilanden geactualiseerd. Toch zijn aanpassingen in het instrumentarium nodig om rekening te houden met een afwijkende bodemligging ten opzichte van de Hollandse Kust, en met de fysische condities bij de koppen van de eilanden.

- Zeeland

De modelaanpak zoals toegepast in de Waddenzee, is ook toegepast voor de harde keringen langs de Westerschelde in combinatie met een verbetering van de bodemligging. Daarnaast draagt een reguliere update van statistiek voor waterstanden en offshore golfparameters bij aan de betrouwbaarheid en consistentie van de HR in de Westerschelde en aan (meer) draagvlak bij de Zeeuwse keringbeheerders.

Ten behoeve van het vergroten van de betrouwbaarheid van de HR in de Oosterschelde is een update gewenst van de toetspeilen, aangezien deze bepaald zijn met een verouderde en niet meer reproduceerbare aanpak, waarbij gebruik is gemaakt van het model IMPLIC. Daarnaast zijn vraagtekens gezet bij de betrouwbaarheid van de HR als gevolg van de wijze waarop het effect van de Oosterscheldekering in rekening is gebracht in het probabilistisch instrument Hydra-K. Echter, het bleek niet haalbaar om het complexe HR instrumentarium voor de Oosterschelde binnen het tijdsbestek van WTI 2011 te verbeteren tot een gewenst niveau. Bovendien bestaat het beeld dat er in de Oosterschelde op dit moment geen acuut veiligheidsprobleem is. Daarom is besloten de HR voor de Oosterschelde niet aan te passen.

Het duineninstrumentarium voor Zeeland is eveneens niet aangepast, omdat de in 2006 berekende HR nog voldoende betrouwbaar worden geacht.

Voor Zeeland worden dus alleen de HR voor de harde keringen in de Westerschelde aangepast.

- **Hollandse kust**

Het toetsinstrumentarium voor dijken en duinen is in 2006 vernieuwd en is daarmee technisch gezien vrijwel up-to-date. Ook zijn nieuwe aanpassingen vanwege robuustheid en continuïteit (mede gezien de uitvoeringswerkzaamheden aan de zwakke schakels) beleidsmatig niet gewenst. Daarom is besloten voor de Hollandse Kust geen aanpassingen aan te brengen in het toetsinstrumentarium, met uitzondering van de bekledingmodule, de zogenaamde Q-variant in Hydra-K (zie paragraaf 3.3).

Naast de beslissing om alleen nieuwe HR voor de harde keringen in de Waddenzee en de Westerschelde en voor de duinen op de Waddeneilanden af te leiden, is een aantal gebiedsoverstijgende beslissingen genomen ten aanzien van te hanteren statistische informatie in het toetsinstrumentarium. De gemaakte keuzes en de daarbij behorende argumentatie staan vermeld in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Gemaakte keuzes en argumentatie t.a.v. gebiedsoverschrijdende aspecten

Keuze	Argumentatie
Waterstandstatistiek op meetlocaties aanpassen o.b.v. geactualiseerde meetreeksen, geen nieuwe basispeilen, wel nieuwe toetspeilen (voor definities van deze peilen zie par. 7.4.2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Op voorhand was bekend dat in Eems-Dollard de invloed van antropogene effecten op de statistiek significant zou zijn.</li> <li>• Afleiden nieuwe basispeilen niet haalbaar binnen beschikbare tijdsbestek.</li> <li>• Toetspeilen zijn wel aangepast op basis van verlengde meetreeksen.</li> </ul>
Windstatistiek op meetlocaties en vertaling naar open water blijft ongewijzigd t.o.v. HR2006	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschil nieuwe windstatistiek (o.a. verlengde meetreeksen) t.o.v. HR2006 klein;</li> <li>• Naar verwachting nieuwere statistiek en vertalingsmethode voor WTI 2017.</li> </ul>
Golfstatistiek o.b.v. geactualiseerde meetreeksen en vigerende statistische methode.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effect recente metingen is significant;</li> <li>• Geen technisch draagvlak voor alternatieve methode.</li> </ul>

### 2.3 Uitgangspunten bij bepaling HR

Bij de bepaling van de HR zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- 1 De overschrijdingskans in de Waterwet wordt geïnterpreteerd als een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van een natuurlijk stochastisch proces. Dit is de wijze waarop wordt omgegaan met onzekerheden die voortkomen uit de natuurlijke variabiliteit van het systeem, zoals het weer. Modelonzekerheden (epistemische onzekerheden) zijn niet verwerkt in de overschrijdingskans. Hieronder vallen zowel statistische onzekerheid als onzekerheid in de waterbewegings- en golfmodellen. Feitelijk is hiermee een nadere invulling gegeven aan 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 het hanteren van de zogenaamde thermometergedachte: Er wordt een "foto" genomen van het fysische systeem, waarbij deze representatief verondersteld wordt voor de volgende toetsperiode. Dit uitgangspunt is bijvoorbeeld gebruikt bij de bodemligging. De meest recente bathymetrie wordt verondersteld geldig te zijn voor de komende toetsperiode.
- 3 De peildatum waarop de afgeleide HR, zoals gepresenteerd in dit rapport, betrekking hebben is 2017. Voor bijvoorbeeld de waterstand is in verband met de zeespiegelstijging het peiljaar 2017 gekozen. Aanvankelijk werd dit jaar gezien als het einde van de vierde toetsperiode. Op het moment van afleiding van de HR was nog niet bekend dat de vierde toetsronde niet in 2012 van start zou gaan.

Er is een verschil in toetsingsmethode van duinen en dijken, dat mede is ingegeven door het feit dat er bij een duin nagenoeg geen reststerkte is, terwijl voor een dijk die juist aan de norm voldoet altijd nog reststerkte aanwezig is. In de Waterwet (2009) wordt geëist dat er bij maatgevende omstandigheden nog 'veilig' gekeerd moet kunnen worden. Voor dijken wordt daarvoor impliciet de reststerkte ingevuld zonder die overigens te kwantificeren. Voor duinen is het begrip 'veilig' ingevuld door een 10 maal lagere normfrequentie te kiezen. Dit vertaalt zich in de volgende uitgangspunten:

- 1 Een uitgangspunt voor de harde keringen is dus dat de reststerkte van de kering na bezwijken niet in de veiligheidsnorm is meegenomen en dat de HR dus representatief moeten zijn voor de gestelde normfrequentie.
- 2 Een uitgangspunt voor duinen is dat de HR representatief moeten zijn voor een frequentie die een factor 10 kleiner is dan de veiligheidsnorm (dus bijvoorbeeld 1/40.000 per jaar in plaats van 1/4000 per jaar).

## 2.4 Consequenties van de nieuwe randvoorwaarden

De nieuwe HR waren beoogd te worden gebruikt voor de toetsing op veiligheid van de primaire waterkeringen. Of dat nog gaat gebeuren is zeer de vraag. Gebruik van de nieuwe HR zou kunnen leiden tot het afkeuren van keringen die in de vorige toetsronde nog aan de norm voldeden. DG Water heeft behoefte aan inzicht in de verschillen tussen de nieuwe HR en de eerder afgegeven HR2006. Daartoe zijn de nieuwe HR in de Waddenzee en Westerschelde vergeleken met de HR2006.

De verschilanalyse is in eerste instantie uitgevoerd om de verschillen t.o.v. HR2006 inzichtelijk te maken en te verklaren, hetgeen heeft bijgedragen aan de kwaliteitscontrole van WTI 2011. De verschilanalyse vormde tevens de basis voor de effectanalyse die het WTI-team heeft uitgevoerd voor DG Water om de gevolgen van het nieuwe WTI in beeld te brengen.

De uitwerking hiervan is gegeven in hoofdstukken 9 en 10.



## 3 Methode voor het bepalen van HR op hoofdlijnen

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de keten van modellen, technieken en gegevens die gebruikt worden voor het bepalen van HR voor de zoute wateren. In de volgende paragrafen wordt een beschrijving op hoofdlijnen gegeven. Verdere uitwerking vindt plaats in hoofdstukken 4-8. We maken onderscheid tussen:

- HR voor harde keringen met betrekking tot kruinhoogte,
- HR voor harde keringen met betrekking tot dijkbekledingen,
- HR voor duinen.

Deze HR kunnen verschillen omdat dezelfde omstandigheden meer of minder belastend kunnen zijn voor de verschillende faalmechanismen. De nadruk van dit hoofdstuk ligt bij de ketenbeschrijving voor het bepalen van HR voor de toetsing van de kruinhoogte van de harde keringen (paragraaf 3.2). Naast het falen van de kering ten gevolge van een te lage kruinhoogte, bestaan er ook faalmechanismen die betrekking hebben op de bekleding van de dijk. De ketenbeschrijving voor het bepalen van de HR met betrekking tot bekleding (zie par. 3.3) is een variant op die voor de kruinhoogte, en wordt daarom minder uitgebreid beschreven. De ketenbeschrijving voor de HR voor de duinen wordt beschreven in paragraaf 3.4.

De ketenbeschrijvingen zijn deels overgenomen uit Van der Klis et al. (2010).

### 3.2 Methode voor het bepalen van HR voor harde keringen m.b.t. kruinhoogte

#### 3.2.1 Inleiding

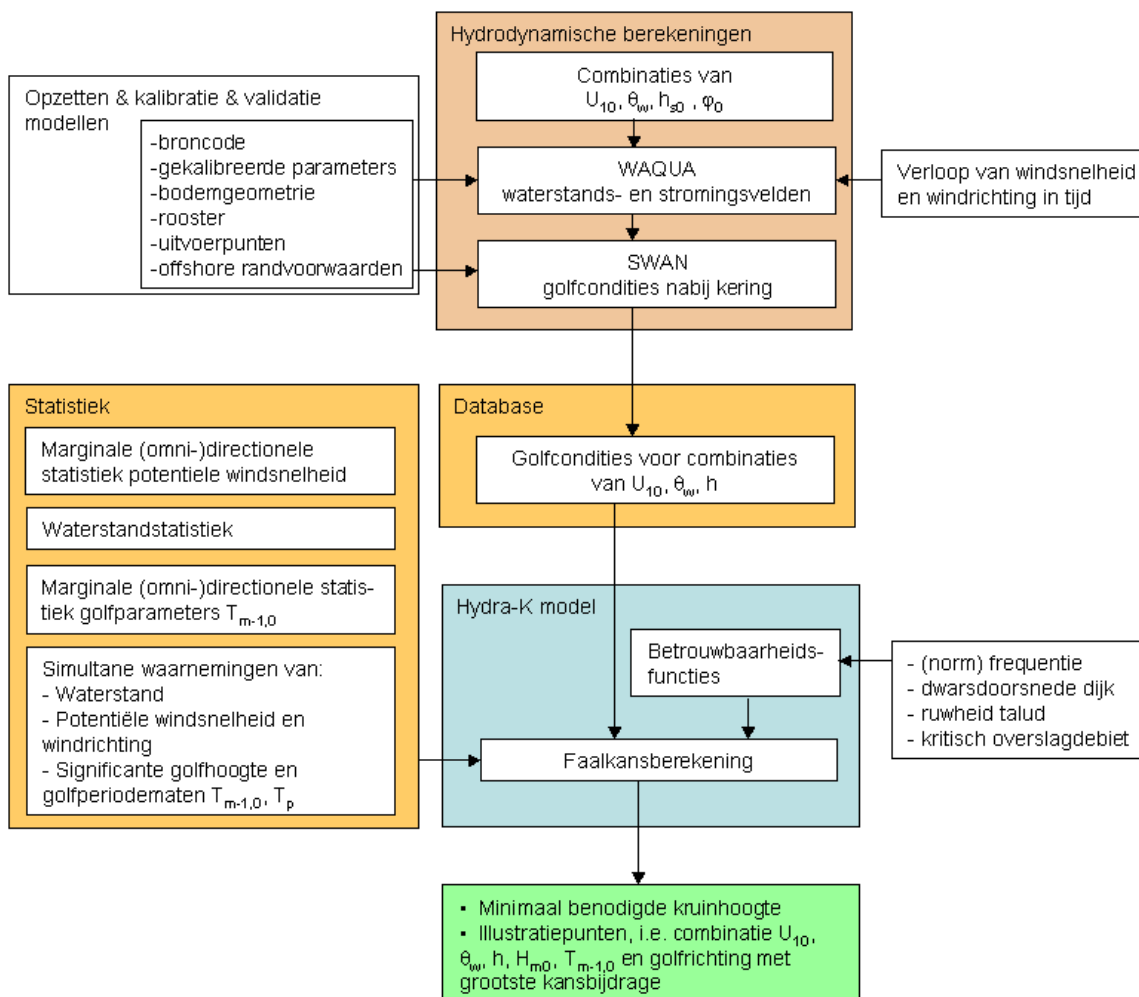
Deze paragraaf behandelt de onderdelen voor het bepalen van de HR voor de toetsing van harde keringen langs de zoute wateren op kruinhoogte, op basis van het faalmechanisme golfoverslag. In Figuur 3.1 wordt een schematische weergave van de keten van modellen, technieken en gegevens gegeven. Met beperkte aanpassingen is deze keten ook geldig voor andere faalmechanismen. Figuur 3.1 geeft de methode weer voor de in 2011 geactualiseerde HR voor de Waddenzee en de Westerschelde. Voor de Hollandse kust en de Oosterschelde is dezelfde lijn gevolgd, met dien verstande dat de hydrodynamische berekeningen minder geavanceerd zijn uitgevoerd. Voor de Hollandse kust en Oosterschelde is geen gebruik gemaakt van geschematiseerde verlopen van de wind en resulterende waterstands- en stromingsvelden.

#### 3.2.2 Beschrijving van HR-keten op hoofdlijnen

De HR-keten voor de harde keringen langs de zoute wateren bestaat op hoofdlijnen uit:

- Numerieke modellen voor waterbeweging, golfopwekking en golfvoortplanting;
- Statistiek van wind, waterstand en offshore golfparameters;
- Omgevingsinformatie, zoals de geometrie en bekledingseigenschappen van de dijk;
- Het probabilistische model Hydra-K.

De HR zelf worden bepaald aan de hand van een probabilistische berekening met het Hydra-K model. Hieronder wordt nader ingegaan op de verschillende onderdelen van de keten, te beginnen bij het eindresultaat.



**Figuur 3.1** Schematische weergave van HR-keten voor de zoute wateren<sup>3</sup> ( $U_{10}$ : windsnelheid,  $\theta_w$ : windrichting,  $h_{s0}$  offshore windopzet,  $\phi_0$ : faseverschil tussen getij en moment van maximale windsnelheid,  $h$ : lokale waterstand)

## 1. Eindresultaat (groen blok in Figuur 3.1)

- Het eindresultaat is op locaties aan de teen van de waterkering (hierna te noemen: oeverlocatie) de minimaal benodigde kruinhoogte voor het dijkvak, gegeven een waarde van het kritieke overslagdebiet.
- Daarnaast kan per oeverlocatie het zogenaamde illustratiepunt worden berekend. Dit is de combinatie van stochastwaarden van windsnelheid, windrichting en waterstand en de bijbehorende waarden van golfhoogte en golfperiode die het meest waarschijnlijk is te midden van alle combinaties die tot de minimaal benodigde kruinhoogte leiden. Het illustratiepunt geeft dus de HR.

<sup>3</sup> De marginale statistiek van golfparameter  $T_{m-1,0}$  wordt alleen bij de Hollandse Kust toegepast als invoer voor Hydra-K. Voor de overige gebieden is golfstatistiek geen invoer voor Hydra-K, behalve voor het afleiden van de diepwater golftrandvoorwaarden voor de SWAN berekeningen.

## 2. Hydra-K model (blauw blok in Figuur 3.1)

Hydra-K is de spil in de HR-keten, waarmee de probabilistische berekening wordt uitgevoerd. Hydra-K koppelt combinaties van waterstand, wind en golven en de daarbij behorende kansen aan de kans op falen van een kering. Hiervoor is een betrouwbaarheidsfunctie nodig, waarmee de sterkte van de kering wordt vergeleken met de hydraulische belasting. Hydra-K berekent vervolgens de benodigde kruinhoogte voor een gegeven normfrequentie en het bijbehorende illustratiepunt (de HR).

## 3. Invoer van Hydra-K (oranje blokken in Figuur 3.1)

De invoer van Hydra-K bestaat uit:

- De marginale statistiek van waterstand, wind en offshore golven, en simultane waarnemingen van deze grootheden ten behoeve van het in rekening brengen van de correlatie tussen de grootheden.
- Een database gevuld met golfparameters op oeverlocaties voor verschillende combinaties van windsnelheid, windrichting en waterstand.
- Gegevens met betrekking tot dijkdimensies, taludruwheid, normfrequentie en kritisch overslagdebiet.

## 4. Hydrodynamische berekeningen (roze blok in Figuur 3.1)

4a. Om de Hydra-K database te vullen met golfparameters is een groot aantal berekeningen uitgevoerd met WAQUA en SWAN. Voor combinaties van in de tijd variërende windsnelheid en windrichting, offshore windopzet en faseverschil tussen maximale windsnelheid en getij zijn waterstands- en stromingsvelden berekend met WAQUA. De wind en hydrodynamica vormen invoer voor de SWAN berekeningen. Het tijdverloop van de windsnelheid en de draaiing van de wind is in de hydrodynamische berekeningen en de golfberekeningen meegenomen. Het tijdverloop zelf is niet als stochast behandeld. De windsnelheid en de windrichting zijn dat wel.

4b. Voor die gebieden waarvoor in 2011 geen nieuwe HR zijn afgeleid (te weten de Hollandse Kust en Zeeland met uitzondering van de Westerschelde) zijn geen hydrodynamische berekeningen uitgevoerd. Stroming is achterwege gelaten, de waterstand was uniform en er is geen rekening gehouden met het tijdverloop van de windsnelheid of draaiing van de wind.

### 3.3 Methode voor het bepalen van HR voor harde keringen m.b.t. bekleding

Ook indien als faalmechanisme instabiliteit van de dijkbekleding wordt beschouwd, wordt Hydra-K ingezet om de HR te bepalen. De methode is daarbij vrijwel gelijk aan die beschreven is in Paragraaf 3.2. Echter, de belastingfuncties voor bekledingen uit de VTV2006 zijn soms irregulier. Men spreekt van een irreguliere belastingfunctie indien toename van een stochast leidt tot afname van de belasting. Voor de met deze belastingfuncties verkregen irreguliere faalgebieden kan Hydra-K soms geen oplossing bepalen. Daarom is voor bekledingen de zogenaamde Q-variant ontwikkeld (Hydra-K-Q). De Q-variant berekent de golfbelasting voor een gegeven – op voorhand vastgestelde - waterstand. De resulterende

conditionele belasting (gegeven de waterstand) die Hydra-K-Q bepaalt is wezenlijk verschillend van de belasting voor de kruinhoogte, waarbij de waterstand namelijk het resultaat van de berekening is. Men bepaalt met Hydra-K-Q dus de HR voor een bepaald niveau van de kering (= de beschouwde waterstand).

Voor de bekledingstypen genoemd in Tabel 3.1 zijn binnen Hydra-K-Q belastingfuncties gedefinieerd, in de vorm van:

$$S = H_{m0}^a \cdot T_p^b \cdot (\cos \beta)^c \quad (3.1)$$

waarbij :

- $H_{m0}$  = significante golfhoogte
- $T_p$  = piekperiode
- $\beta$  = hoek van inval
- $a, b, c$  = faalmechanisme afhankelijke coëfficiënten

Vanwege deze vorm is de belastingfunctie monotoon stijgend en kunnen er geen irreguliere faalgebieden optreden.

Tabel 3.1 Faalmechanismen voor verschillende typen dijkbekledingen in Hydra-K

Dijkbekleding	Faalmechanisme
Gras	• Erosie door golfklappen
Beton blokken	• Schade door golfklappen • Afschuiving (op zand / op klei)
Beton zuilen	• Schade door golfklappen • Afschuiving (op zand / op klei)
Asfalt	• Schade door golfklappen
Breksteen	• Schade door golfklappen

Om aan de uiteindelijke belasting op een zeker dijkniveau te komen, wordt een veronderstelling gedaan over de mogelijke waterstanden tijdens een storm. Als een bepaalde windsnelheid en windrichting optreden tijdens een storm, levert dat een maximale waterstand nabij de kust tijdens de storm. In de berekening van de belasting wordt, bij de beschouwde windsnelheid en windrichting tijdens de storm, aangenomen dat deze windsnelheid en windrichting niet alleen tijdens de maximale waterstand binnen de storm voorkomen, maar ook tijdens alle lagere waterstanden tijdens de storm.

De belasting is hiermee een functie die afhangt van het beschouwde dijkniveau. Om de belasting op de gehele bekleding te verkrijgen, wordt het maximum genomen van de belastingen over de verschillende niveaus die deel uitmaken van de bekleding.

De Q-variant is geïmplementeerd in Hydra-K voor de harde keringen langs de Waddenzee, Hollandse Kust en Westerschelde. Voor de Oosterschelde is de Q-variant niet beschikbaar in Hydra-K. Een uitgebreidere beschrijving van Hydra-K-Q is te vinden in Smale en Beckers (2011).

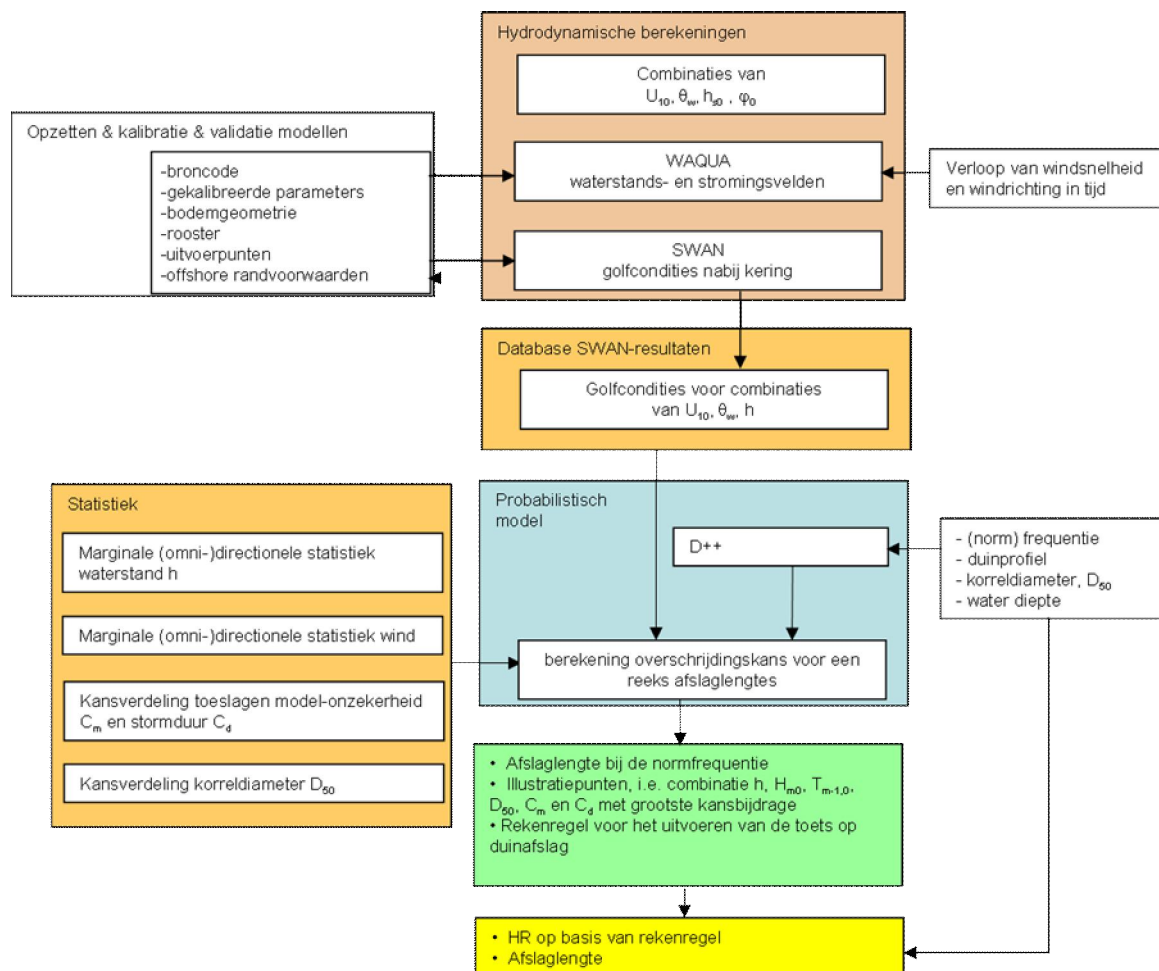
### 3.4 Methode voor het bepalen van HR voor duinen

Ook voor het bepalen van de HR voor duinen wordt een semi-probabilistische methode gebruikt. De belangrijkste aanpassing ten opzichte van 2006 is dat nu de golfaanval ter plaatse van een representatieve dieptelijn beschouwd wordt, in plaats van op NAP-20 m zoals dat voorheen gebeurde. Voor kusten beschermd door voordelta's is de golfhoogte op 20 m diepte niet representatief voor de mate van duinafslag. Dit leidde met name bij de eilandkoppen van de Waddeneilanden en de Zeeuwse voordelta tot overschatting van de duinafslag. Met de nieuwe aanpak kunnen hier betrouwbaarder HR worden afgeleid.

In het kader van WTI 2011 is de nieuwe probabilistische methode alleen toegepast voor de duinen op de Waddeneilanden. Voor de duinen langs de Hollandse Kust en Zeeland zijn geen nieuwe HR bepaald. Daar blijft het toetsinstrumentarium zoals beschreven in het VTV2006 van kracht.

Figuur 3.2 is een schematische weergave van de HR-keten voor de duinen in het Waddengebied, die bestaat uit:

- Fysische modellen voor waterbeweging en golfopwekking en –voortplanting;
- Statistiek van waterstand en wind;
- Diverse invoergegevens, zoals het duinprofiel, normfrequentie, korreldiameter, waterdiepte;
- Het probabilistische model, waar het afslagmodel D++ deel van uit maakt;
- De rekenregel, gebaseerd op het probabilistische model.



**Figuur 3.2** Schematische weergave van HR-keten voor duinen in het Waddengebied ( $U_{10}$ : windsnelheid;  $\theta_w$ : windrichting;  $h$ : lokale waterstand;  $H_{m0}$ : significante golfhoogte;  $T_{m-1,0}$ : spectrale golfperiode;  $C_m$ ,  $C_d$ : onzekerheidstoelagen;  $D_{50}$ : korreldiameter)

Hieronder wordt nader ingegaan op de verschillende onderdelen van de keten.

1. Eindresultaat (geel blok in Figuur 3.2)

- Voor elk van de 600 uitvoerraaien de afslaglengte bij de gegeven normfrequentie
- De HR, ofwel de maatgevende golfhoogte, golfperiode  $T_{m-1,0}$  en waterstand per uitvoerraai.

2. Tussenresultaat (groen blok in Figuur 3.2)

- Voor elk van de voorgedefinieerde 18 duinenraaien<sup>4</sup> de afslaglengte bij de gegeven normfrequentie.
- Voor elk van de 18 duinraaien een illustratiepunt. Dit is de meest waarschijnlijke combinatie van stochastwaarden (waterstand, golfhoogte en -periode,

4. Voor 18 representatieve locaties zijn met behulp van het probabilistische model kansen op afslag van de duinen en de daarbij behorende waterstanden en golfcondities bepaald door Diermanse et al. (2011). Voor de toetsing van alle 600 locaties op de Waddeneilanden is het echter niet gewenst om dit complexe probabilistische model in te zetten.

korreldiameter, onzekerheidstoelagen) die tot de afslaglengte uit de vorige bullet leidt.

- Een algemene rekenregel voor het uitvoeren van de toets op duinafslag. Deze rekenregel kan beschouwd worden als een vereenvoudigde versie van het probabilistische model. Met gebruik van de rekenregel kan de afslaglengte bepaald worden bij de normfrequentie voor alle duinlocaties. De rekenregel is gebaseerd op uitkomsten van het probabilistische model (afslaglengtes en illustratiepunten bij de normfrequentie) voor 18 representatieve locaties.

### 3. Probabilistisch model (blauwe blok in Figuur 3.2)

Het bovengenoemde tussenresultaat is afkomstig uit het probabilistische model. In dat model worden sterkte en belasting aan elkaar gekoppeld. De afslaglengte wordt bepaald met het empirische afslagmodel D++, de belasting wordt bepaald door de wind en de waterstand, en de daarvan afgeleide door SWAN berekende golfparameters. Voor een groot aantal combinaties van waterstand, golfparameters, korreldiameters en onzekerheidsfactoren wordt de afslaglengte bepaald. Vervolgens wordt de kans berekend dat een bepaalde afslaglengte wordt overschreden. Deze overschrijdingskans wordt voor een breed bereik aan afslaglengtes bepaald. Uit deze resultaten wordt afgelezen wat de afslaglengte is die correspondeert met de normfrequentie. Vervolgens wordt bij deze afslaglengte het illustratiepunt bepaald, en op basis daarvan is de rekenregel afgeleid.

### 4. Invoer van het probabilistische model (oranje blokken in Figuur 3.2)

De invoer van het probabilistische model bestaat uit statistische informatie en een database met informatie over de fysische omstandigheden (oranje blokken):

- De statistische component bevat (omni-)directionele statistiek van waterstand en wind, en de statistiek van onzekere factoren zoals de korreldiameter, de modelfout en de invloed van de stormduur.
- De fysische informatie is verzameld in een database gevuld met golfparameters langs raaien voor verschillende combinaties van windsnelheid, windrichting en waterstand (zie ad 5).
- Naast bovenstaande componenten dienen als invoer het duinprofiel, de waterdiepte, de normfrequentie en de korreldiameter. Deze laatste wordt plaatsafhankelijk verondersteld en hiervoor dienen de waarden uit Kohsiek (1984) gebruikt te worden.

### 5. Hydrodynamische berekeningen (roze blok in Figuur 3.2)

Ter bepaling van lokale golven, waterstanden en stroming is een groot aantal berekeningen uitgevoerd met WAQUA en SWAN. Voor combinaties van in de tijd variërende windsnelheid en windrichting, offshore windopzet en faseverschil tussen maximale windsnelheid en getij worden waterstands- en stromingsvelden berekend met WAQUA. Samen met de wind vormen de waterstands- en stromingsvelden invoer voor de SWAN berekeningen. Het tijdsverloop van de windsnelheid en de draaiing van de wind wordt in de hydrodynamische berekeningen en de golfberekeningen meegenomen.

In hoofdstuk 5 worden de verschillende ketenonderdelen in meer detail toegelicht. Meer uitleg over de methode ter bepaling van de HR voor duinen in het Waddengebied is tevens te vinden in Diermanse et al. (2011), Diermanse (2012) en Boers (2011).



## 4 Probabilistische rekenmethode HR voor harde keringen

### 4.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 is een beschrijving gegeven van de keten van modellen, technieken en gegevens die gebruikt worden voor het bepalen van HR voor de harde keringen langs de zoute wateren. In voorliggend hoofdstuk gaan we in meer detail in op de probabilistische rekenmethode waarmee de HR voor de harde keringen worden bepaald.

De HR voor de harde keringen worden bepaald met het probabilistische model Hydra-K. Hydra-K berekent de kans op falen van een kering op basis van de kansen op voorkomen van vele combinaties van golven en waterstanden. Omgekeerd zijn met Hydra-K ook de HR behorende bij een bepaalde normfrequentie af te leiden.

Dit hoofdstuk richt zich op de rekenmethode voor de HR voor de hoogtetoets. De berekening van HR voor de toetsing van dijkbekledingen is enigszins analoog, behalve dat men bij bekledingen aparte berekeningen voor verschillende waterstanden kan uitvoeren. De bekledingenmodule die deze berekening uitvoert (Hydra-K-Q, zie Paragraaf 3.3) is alleen beschikbaar voor de Waddenzee, Westerschelde en Hollandse Kust.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt de probabilistische aanpak van Hydra-K toegelicht in paragraaf 4.2. In Paragraaf 4.3 wordt uitgelegd hoe de faalkans berekend wordt. Het bepalen van de HR wordt in Paragraaf 4.4 behandeld. In Paragraaf 4.5 wordt een belangrijk voordeel van van methode 'De Haan' uitgelegd. Een uitgebreide beschrijving van Hydra-K staat in Van Marle et al. (2005).

### 4.2 Probabilistische aanpak van Hydra-K

Het probabilistische model Hydra-K berekent de kans op falen van een kering aan de hand van vele combinaties van waterstanden en golven (hydraulische belasting) die leiden tot falen. Er zijn verschillende faalmechanismen die het falen van een waterkering kunnen veroorzaken, zoals golfoploop/overslag, instabiliteit van de dijkbekleding of instabiliteit van het dijklichaam/ondergrond. De combinaties die leiden tot falen (het faaldomein) kunnen voor elk faalmechanisme anders zijn. Alle combinaties die tot falen leiden, dragen bij aan de faalkans. Uit de verzameling van mogelijke belastingen bepaalt Hydra-K een representatieve combinatie van waterstand en golven. Een dijk die in staat is om deze condities te keren, voldoet aan de gestelde veiligheidsnorm voor het betreffende faalmechanisme, uitgedrukt in een jaarlijkse overschrijdingskans.

Voor de meeste faalmechanismen zijn in Hydra-K zogenoemde "betrouwbaarheidsfuncties" geïmplementeerd. Betrouwbaarheidsfuncties zijn wiskundige formuleringen waarmee de sterkte van de kering wordt vergeleken met de hydraulische belasting:

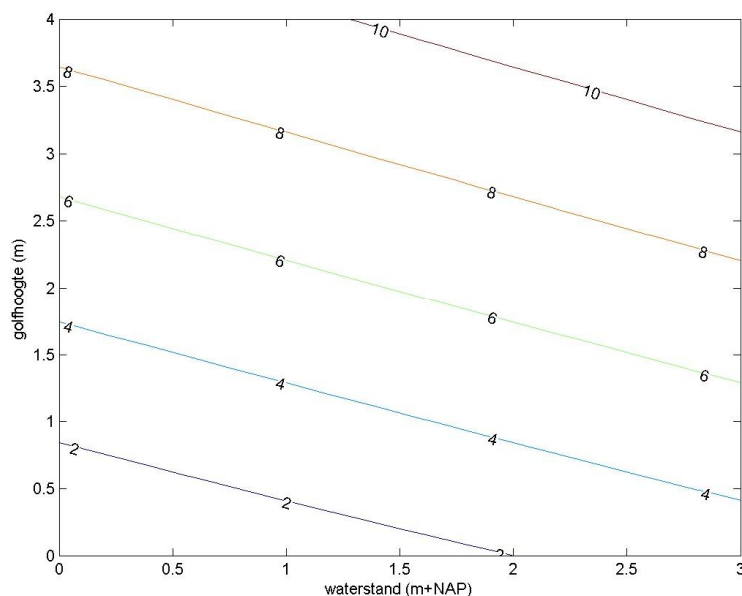
$$Z = R - S, \quad (4.1)$$

ofwel de betrouwbaarheidsfunctie  $Z$  is gelijk aan sterkte  $R$  min belasting  $S$ . De grenstoestandsfunctie bevat die situaties (de grenstoestanden) waarin de betrouwbaarheidsfunctie precies nul is. De belasting is dan precies gelijk aan de sterkte van de constructie.

Het principe van een betrouwbaarheidsfunctie is te illustreren aan de hand van het voorbeeld in Figuur 4.1. Daarin is middels gekleurde contourlijnen de hoogte van de golfloop tegen de dijk weergegeven als functie van de 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+8 m ligt. Deze golfploophoogte wordt precies bereikt bij combinaties van waterstand en golfhoogte op de oranje lijn in Figuur 4.1. Het gebied (rechts-)boven de oranje lijn wordt gevormd door alle mogelijke combinaties van de waterstand en de golfhoogte die een golfloop van boven de NAP+8m opleveren en dus tot falen leiden. Dit wordt 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.

De faalkans van de constructie is gelijk aan de kans op voorkomen van combinaties van waterstand en golfhoogte waarbij de betrouwbaarheidsfunctie kleiner is dan nul. In het voorbeeld van Figuur 4.1 en een kruinhoogte van NAP+8m is dat dus het gebied rechtsboven de lijn die een golfploophoogte van NAP+8 m aangeeft.



Figuur 4.1 Voorbeeld van de golfploophoogte (in m+NAP) op de dijk als functie van waterstand en golfhoogte voor de kering.

## 4.3 Berekenen van de faalkans

### 4.3.1 Methode 'De Haan'

De kans op voorkomen van combinaties van waterstand en golfcondities wordt door Hydra-K bepaald door middel van het opschalen van waargenomen condities tijdens historische stormen naar extreme condities en vervolgens bepalen of deze opgeschaalde waarnemingen leiden tot falen. Het toepassen van waarnemingen is een vorm van sampling, zoals dat ook in

een Monte Carlo analyse wordt gedaan. In een standaard Monte Carlo analyse worden uit de kansverdelingen van (in het voorbeeld van paragraaf 4.2 en Figuur 4.1) 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.

In een standaard Monte Carlo procedure worden trekkingen genomen uit een bekend veronderstelde multivariate kansverdeling, die ook de correlatie tussen de variabelen beschrijft. 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 weliswaar geen extreme gebeurtenissen (de meetreeksen beslaan enkele decennia, terwijl we condities zoeken met een herhalingsjijd van duizenden jaren), maar methode 'De Haan' neemt als uitgangspunt dat de afhankelijkheidsstructuur tussen de verschillende parameters gelijk blijft in het extreme gebied (asymptotische afhankelijkheid, zie Paragraaf 4.3.6). 'De Haan' verschuift onder deze aanname de waargenomen gebeurtenissen naar het extreme gebied. Het opschuiven van de waarnemingen is enigszins te vergelijken met de 'importance sampling' bij een Monte Carlo analyse. Bij importance sampling worden alleen trekkingen gedaan in het extreme bereik. De Haan verplaatst de reguliere trekkingen naar het extreme bereik.

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 Van Marle et al. (2005) is de praktische uitwerking van de methode in detail omschreven. In deze paragraaf wordt een globaal overzicht gegeven.

#### 4.3.2 Benodigdheden voor methode 'De Haan'

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

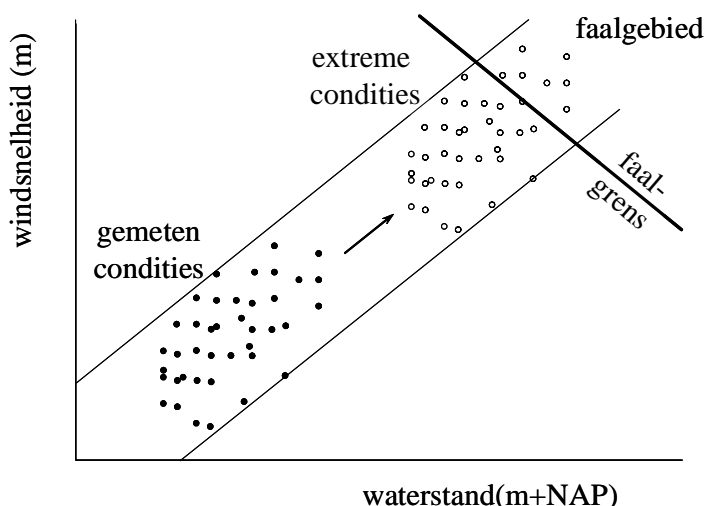
- De keuze ten aanzien van de *stochastische variabelen* die het faaldomein vastleggen. Niet alle meteorologische en hydrologische variabelen worden als stochast in het proces betrokken. Een variabele is van belang als enerzijds het effect van een variabele op het resultaat van de toetsing groot is (zoals dat van de waterstand op golfoverslag), en anderzijds ook de natuurlijke variatie groot is. Voor de Waddenzee en Westerschelde is op basis van deze afweging gekozen voor de variabelen windsnelheid, windrichting en waterstand. Omdat het effect van de offshore golfperiode op de keringen langs de Hollandse Kust significant is, is deze parameter voor dit watersysteem als stochast gebruikt, voor de andere systemen niet.
- De *statistiek op diep water*: marginale (individuele) statistiek van de wind, de waterstand en golfparameters, zie ook hoofdstuk 7. Merk op dat de statistiek van de golfparameters in de Waddenzee en Westerschelde alleen wordt gebruikt om de diepwatergolfrandvoorwaarden voor de SWAN berekeningen te bepalen (zie Paragraaf 8.4.3 en Stijnen en Kallen, 2010), de golven worden niet als stochast gebruikt. Voor de Hollandse Kust is aanvullend de marginale statistiek van de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  gebruikt in de probabilistische methode.
- 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 6.

- De *transformatiematrix* voor vertaling van de hydraulische omstandigheden van diep water naar ondiep water nabij de kering. Deze wordt beschreven in hoofdstuk 8.
- De *grenstoestandsfunctie* of de *betrouwbaarheidsfunctie* behorende bij een *faalmechanisme*, d.w.z. de wiskundige beschrijving – gebaseerd op het Voorschrift Toetsten op Veiligheid (opgenomen in VTV-Technisch deel) - die de sterkte van de kering vergelijkt met de belasting. De grenstoestand vormt de grens tussen niet-falen en falen van de waterkering. Voor bekledingen is dit verpakt in een eenvoudige belastingformule.

#### 4.3.3 Het opschalen van waarnemingen

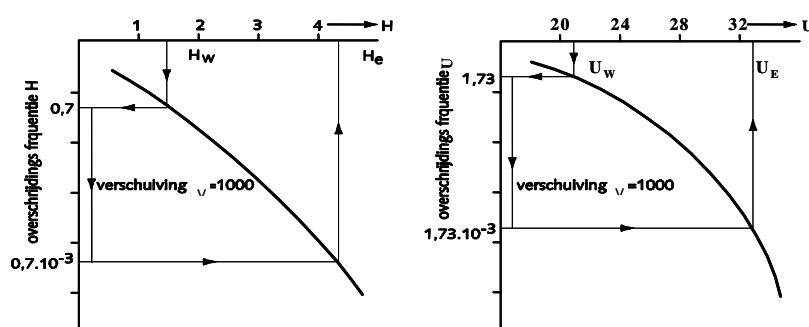
Met de methode De Haan wordt elke waargenomen stormgebeurtenis getransformeerd in een voor de faalkans relevante extreme stormgebeurtenis (zie Figuur 4.2). Hiertoe worden de marginale verdelingsfuncties van de afzonderlijke stochasten die niet exponentieel verdeeld zijn eerst getransformeerd in een overeenkomstige exponentiële verdeling. Dit is een praktische tussenstap om de verschuiving te vereenvoudigen. Vervolgens worden alle variabelen van een gemeten conditie in termen van hun getransformeerde marginale overschrijdingsfrequentie over een even grote factor verschoven, bijvoorbeeld een factor 1000. Daarmee wordt de waarde van elke variabele zodanig vergroot dat de overschrijdingskans 1000 keer zo klein wordt.

De waargenomen gebeurtenis is gemeten op een combinatie van een waterstands-, wind- en golflocatie, waarvan de golflocatie op diep water ligt. De opgeschaalde gebeurtenissen zijn dus ook representatief voor diep water. De getekende faalgrens in figuur 4.2 geeft aan naar welk niveau de gebeurtenissen worden opgeschaald. Omdat dit niveau voorafgaande aan de berekening nog niet bekend is, wordt de verschuiving van de waarnemingen op iteratieve wijze bijgesteld net zolang tot het gewenste niveau is bereikt.



Figuur 4.2 Schematische weergave van het opschalen van stormgebeurtenissen tot nabij of zelfs in het faalgebied.

Het principe van verschuiven wordt geïllustreerd aan de hand van het voorbeeld in Figuur 4.3 waarin een simultane waarneming van waterstand,  $H$ , en windsnelheid,  $U$  staat afgebeeld. Voor de eenvoud wordt hierbij de transformatie naar een exponentiële ruimte achterwege gelaten.



Figuur 4.3 Voorbeeld van het verschuiven van een simultane waarneming, bestaande uit twee stochasten

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 bijvoorbeeld een overschrijdingsfrequentie heeft van 1,73 per jaar.

Stel nu dat verschuiving  $v$  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 uitgevoerd voor alle beschikbare simultane waarnemingen. De overschrijdingsfrequenties worden allemaal met dezelfde factor  $v$  opgeschaald, in lijn met de aanname van asymptotische afhankelijkheid (zie Paragraaf 4.3.6).

#### 4.3.4 Vertaling naar de waterkering met een transformatiematrix

De locaties waar de kansverdelingen van bekend zijn, liggen niet direct voor de waterkering. Daarom moet er na de opschaling een vertaalslag worden gemaakt van wind, waterstand en golven op de meetlocaties naar waterstanden en golven bij de kering. De vertaling gebeurt o.a. op basis van de transformatiematrix met rekenresultaten van het golfmodel SWAN. De resultaten worden opgeslagen in een database, genaamd KustDB2011.

De driedimensionale matrix bevat voor alle uitvoerpunten langs de kering de lokale golfhoogte, golfperiode en golfrichting behorende bij zeer veel combinaties van waterstand, windrichting en windsnelheid. Bij elke opgeschaalde trekking van waterstand, windsnelheid en windrichting is door interpolatie van de waarden in de database de lokale golfhoogte, golfperiode en golfrichting ter plaatse van iedere uitvoerlocatie nabij de kering te vinden.

Meer uitleg over de transformatiematrix is te vinden in hoofdstuk 8.

#### 4.3.5 De kansberekening

Na opschaling van de waarneming en vertaling naar golfparameters nabij de kering, wordt een betrouwbaarheidsfunctie toegepast om te bepalen of de kering voor die situatie faalt voor de betreffende combinatie en het betreffende faalmechanisme. De kans op falen wordt berekend aan de hand van het aantal opgeschaalde combinaties dat binnen het faaldomein valt.

De grootte van de opschaling of verschuiving  $v$  wordt uitgedrukt in termen van frequentie, maar de verschuiving in de exponentiële ruimte ( $v$ ) is dimensieloos. Het verschuiven van de waarnemingen is zodanig dat er voldoende waarnemingen in het faalgebied terechtkomen zodat de faalfrequentie van de kering nauwkeurig kan worden bepaald. Daarna kan de faalfrequentie bepaald worden met de volgende formule:

$$\mu = \frac{\kappa}{\Delta} e^{-v} \quad (4.1)$$

De faalfrequentie  $\mu$  (per jaar) is afhankelijk van:

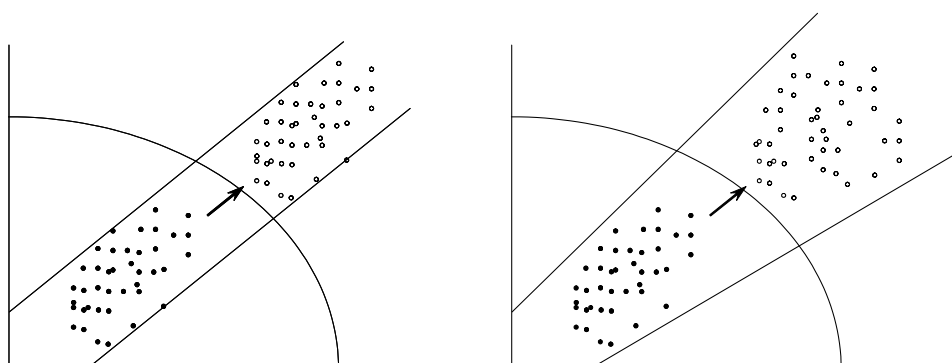
- $\kappa$ : het aantal stormgebeurtenissen waarvoor (na opschaling) wordt vastgesteld dat deze tot falen van de kering leiden. Hoe meer faalgebeurtenissen, des te groter de faalkans;
- $v$ : de grootte van de verschuiving die gebruikt is om de stormgebeurtenissen op te schalen. Hierbij geldt dat hoe groter de mate van opschaling, des te kleiner de faalkans. Vergelijk bijvoorbeeld twee dijken met een kruinhoogte van NAP+8 m respectievelijk NAP+10 m (en verder gelijke dimensies en eigenschappen). Voor het faalmechanisme golfoverslag heeft de tweede dijk 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 om eenzelfde aantal gebeurtenissen binnen het faaldomein te laten vallen;
- $\Delta$ : de lengte van de meetreeks (in jaren). Hoe langer de meetreeks hoe meer stormgebeurtenissen zijn waargenomen. Een groter aantal stormgebeurtenissen zal aanleiding geven tot meer faalgebeurtenissen na opschaling. Hiervoor moet gecompenseerd worden in de berekening van de faalkans.

In Bijlage A staat een getallenvoorbeeld uitgewerkt van een berekening met de methode 'De Haan'.

#### 4.3.6 Asymptotische afhankelijkheid

Afhankelijkheid tussen twee 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 voorkomen. De mate van afhankelijkheid tussen twee stochasten wordt vaak 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. Daarbij wordt er van uitgegaan dat de puntenwolk van de waarnemingen te verschuiven is naar het extreme gebied zonder dat de puntenwolk uitwaaiert (zie Figuur 4.4).



Figuur 4.4 Voorbeelden van niet uitwaaiëren (asymptotisch afhankelijk) en van wel uitwaaiëren (asymptotisch onafhankelijk).

In Argoss (2006) is de onderlinge afhankelijkheid van hoge waarden van windsnelheid, waterstand, significante golfhoogte en golfperiode onderzocht aan de hand van meetgegevens, zie ook Den Heijer et al. (2007). De resultaten laten zien dat de aanname van asymptotische afhankelijkheid van de methode ‘De Haan’ de werkelijke afhankelijkheid enigszins overschat. 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, dat wil zeggen in de richting van een overschatting. 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. Dit impliceert een volledige afhankelijkheid over het gehele bereik van de variabelen. De aanname van asymptotische afhankelijkheid in methode De Haan leidt tot minder conservatieve (robuuste) schattingen dan de deterministische benadering (zie Den Heijer et al., 2007).

#### 4.4 Bepalen van hydraulische randvoorwaarden

##### 4.4.1 Berekening illustratiepunt

De probabilistische berekening zoals beschreven in paragraaf 4.3 geeft de faalkans van de kering voor alle mogelijke combinaties van waterstand en golfparameters (de stormgebeurtenissen). Voor de HR zijn we op zoek naar een maatgevende combinatie die gebruikt kan worden in de toetsing. Binnen Hydra-K worden deze randvoorwaarden vastgesteld middels een berekening van het zogenaamde illustratiepunt, afgekort IP1. 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 HR (c.q. het illustratiepunt) wordt altijd een ‘ontwerpberekening’ uitgevoerd (om bijvoorbeeld de kruinhoogte te bepalen die nodig is om aan de 1/10.000 jaar norm te voldoen) om de faalgrens voor de gewenste faalfrequentie te bepalen.

Figuur 4.5 geeft een schematische weergave van de bepaling van het illustratiepunt voor twee stochasten (waterstand en windsnelheid). Hierin is te zien dat het illustratiepunt op de faalgrens ligt. Vervolgens wordt de faalgrens “langs gelopen” 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.

Deze schatting is gebaseerd op een lijn door het midden van de puntenwolk (bestaande uit alle punten die tot falen leiden) die onder een hoek van 45 graden in de standaard exponentiële ruimte loopt. Het illustratiepunt ligt op het kruispunt van die lijn met de faalgrens (zie Figuur 4.5). De exacte locatie van de lijn wordt bepaald door de term  $C_L$  in Figuur 4.5. Deze wordt als volgt bepaald:

1 De gemeten en opgeschaalde waarden van wind en waterstand worden eerst omgezet naar standaard-exponentieel verdeelde stochastische grootheden  $A_1$  en  $A_2$  (zie Van Marle et al., 2005).

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

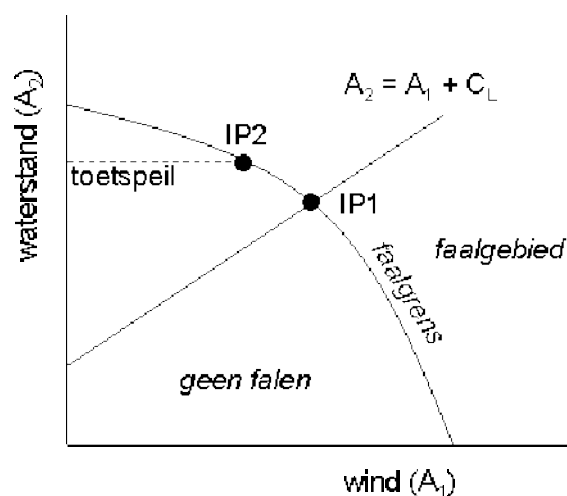
$$T = \frac{A_1 - A_2}{2} \quad (4.2)$$

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.

Het illustratiepunt bij een terugkeertijd van bijvoorbeeld 4000 jaar kan gezien worden als een representatieve belasting voor die herhalingstijd. 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. Zo heeft bijvoorbeeld de golfhoogte in het illustratiepunt dat bij een herhalingstijd van 4000 jaar hoort, in de regel een lagere herhalingstijd dan 4000 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 7.4.2 voor een nadere beschrijving van het toetspeil).





Figuur 4.5 Schematische weergave van de methode ter bepaling van de illustratiepunten IP1 en IP2

#### 4.4.2 Waterstand gelijk aan toetspeil ('IP2')

Voor veel praktijktoepassingen is het toetspeil een belangrijke randvoorwaarde. Daarom is in Hydra-K een extra rekenoptie gemaakt om een tweede illustratiepunt (IP2) te bepalen waarbij de waterstand per definitie gelijk is aan het toetspeil. Het toetspeil is meestal hoger dan de waterstand in het oorspronkelijk berekende illustratiepunt (IP1). Het illustratiepunt moet echter wel op de faalgrens blijven liggen. In vergelijking met het IP1 zijn de golfcondities van het IP2 dan minder zwaar. De resulterende hydraulische belasting van de twee punten is immers gelijk, omdat ze per definitie beide op de faalgrens liggen. Om te compenseren voor de hogere waterstand daalt de golfbelasting dan automatisch bij deze rekenoptie.

In het kader van HR2011 is besloten om deze laatste rekenoptie toe te passen. De waterstanden in HR2011 zijn (evenals in HR2006) derhalve gelijk aan het toetspeil.

Overigens zijn de HR op de meeste locaties relatief ongevoelig voor kleine wijzigingen van het faal criterium (kritiek overslagdebiet) of de keuze tussen het eerste of het tweede illustratiepunt. Ook variatie van het dijkprofiel levert meestal geen andere HR op. Benaderingen in het werkelijke dijkprofiel zijn daarom toegestaan.

#### 4.5 Opmerkingen bij methode 'De Haan'

Een alternatieve 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 voor elke tweede en volgende variabele een conditionele kansverdeling bepaald, die afhangt van de waarde van eerste variabele. Dit is een voorbeeld van een zogenaamde *parametrische* methode.

De methode 'De Haan' maakt echter gebruik van een *niet-parametrische* methode. Hierbij behoeft er geen aparte kansverdeling van de samenhang bepaald te worden. Er wordt direct gebruik gemaakt van de reeks van gemeten simultane waarnemingen om de onderlinge

samenhang van de stochastische variabelen te modelleren. Er is dus geen functiebeschrijving nodig is van de gezamenlijke kansverdeling van de betrokken stochasten<sup>5</sup>.

Daarin onderscheidt de methode zich van andere, parametrische methoden, waarin de samengestelde kansverdelingen expliciet vooraf gemaakt moeten worden, en er dus voor verschillende faalmechanismen, locaties en dijkgeometrieën andere dataselecties gemaakt moeten worden. Bij de uitwerking van de methode 'De Haan' is gekozen de volledige tijdreeksen van de waargenomen stormgebeurtenissen op te nemen in de databestanden in Hydra-K. Het stormmaximum wordt hier vervolgens uit geselecteerd, waarbij er twee keuzemogelijkheden zijn:

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

Voor de faalmechanismen golfoploop 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 HR2011 gekozen voor de eerste optie. In het rekenmodel zijn wel beide opties beschikbaar, zij het alleen voor de geavanceerde gebruiker.

Bij sommige faalmechanismen speelt het tijdverloop, of de duur van de storm, geen rol in de mate van belasting. De definitie van "het stormmaximum" speelt dan wel een belangrijke rol. De maximale belasting door golfoverslag zal rond het moment van het maximale stormvloedpeil liggen. De maximale belasting voor een dijkbekleding op het ondertalud zal op een ander moment plaatsvinden. Het precieze moment is voor elke storm anders maar ook voor elke locatie en dijkgeometrie. In de gekozen methode 'De Haan' is het mogelijk deze keuze van het stormmaximum tijdens het rekenproces te maken.

Een ander voordeel van methode 'De Haan' is de relatief beperkte rekentijd.

---

<sup>5</sup> 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.

## 5 Rekenmethode HR voor duinen in het Waddengebied

### 5.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 is een beschrijving gegeven van de keten van modellen, technieken en gegevens die gebruikt worden voor het bepalen van HR voor de duinen in het Waddengebied. In voorliggend hoofdstuk gaan we in meer detail in op de probabilistische rekenmethode waarmee de HR voor de duinen in dit gebied worden bepaald.

Voor het toetsen van duinwaterkeringen geldt het faalmechanisme duinafslag. Voor duinen is de vertaling van de veiligheidsnorm in een set HR anders tot stand gekomen dan voor de harde waterkeringen. De belangrijkste redenen voor de verschillen in aanpak zijn:

- Een duin is daadwerkelijk bezwaken zodra falen optreedt. Het uitgangspunt uit de Waterwet (2009) is dat een waterkering bij maatgevende omstandigheden nog ‘volledig standzeker’ moet zijn. Bij de harde waterkeringen is er na falen door bv. teveel golfoverslag veelal nog reststerkte aanwezig. Bij duinen is de term ‘volledig standzeker’ vertaald door het veiligheidsniveau met een factor 10 te verhogen (TAW, 1984).
- Bij de HR berekening voor de harde waterkeringen wordt een deterministisch sterktemodel gebruikt. Daarbij worden beste schattingen voor de sterkteparameters gebruikt, bijvoorbeeld de kruinhoogte of de dikte van de bekleding op het talud. Bij de duinen wordt voor de sterkteparameters niet een beste schatting, maar een “rekenwaarde” gebruikt, bijvoorbeeld de gemiddelde korreldiameter min een deel van de standaardafwijking. Deze rekenwaarde wordt vastgesteld op basis van probabilistische berekeningen waarbij de korreldiameter als stochastische variabele is meegenomen. Op deze manier houdt het duinenmodel niet alleen rekening met statistische onzekerheden aan de belastingkant (waterstand, golven), maar ook met onzekerheden van de variabelen aan de sterktekant.
- De locatie waarvoor de HR gelden dient voor een duinafslagberekening buiten het afslagprofiel te liggen, terwijl die voor een dijk juist nabij de kering moet liggen.

De rekenregel ter bepaling van de HR en afslaglengte van duinen in het Waddengebied is recent vernieuwd (Diermanse et al., 2011). De belangrijkste wijziging ten opzichte van de methode voor HR2006 is dat de golfaanval nu ter plaatse van een representatieve dieptelijns wordt beschouwd, die niet noodzakelijk gelijk is aan de voor HR2006 gehanteerde NAP-20 m lijn. De rekenregel is afgeleid op basis van rekenresultaten van een probabilistisch model dat gebruik maakt van het nieuwe afslagmodel D++. In Diermanse et al. (2011) is aangetoond dat de met deze rekenregel berekende afslaglengte zeer goed overeenkomt met de afslaglengte bij de normfrequentie, zoals berekend met het probabilistische model.

De nieuwe rekenregel is alleen toegepast op de duinen van de Waddeneilanden. Voor de overige duinenkusten blijven de HR ongewijzigd ten opzichte van HR2006, zoals bijvoorbeeld gepresenteerd in Den Heijer et al. (2007).

Overigens zijn de verschillen tussen de huidige aanpak voor de HR2011 voor de Waddeneilanden en de methode die voor de HR2006 voor de Zeeuwse duinen is gehanteerd aanzienlijk, aangezien de HR2006 voor de Zeeuwse duinen deterministisch zijn bepaald. De

HR2006 voor de Hollandse kust zijn destijds ook probabilistisch bepaald, maar met een andere rekenregel.

Paragraaf 5.2 beschrijft de aanpak voor de HR voor de duinen van de Waddeneilanden, opgesplitst in het hydraulische belastingmodel, het sterktemodel en het probabilistische rekenmodel. In Paragraaf 5.3 wordt de faalkansberekening behandeld en in Paragraaf 5.4 de daadwerkelijke bepaling van de HR voor duinen. Veel van de tekst van dit hoofdstuk is afkomstig uit Diermanse et al. (2011) en Diermanse (2012).

## 5.2 Probabilistische aanpak voor duinen

### 5.2.1 Inleiding

Zoals in Hoofdstuk 3 al is genoemd, wordt het probabilistische model niet direct gebruikt om de HR te berekenen, maar om een vereenvoudigde rekenregel af te leiden waarmee vervolgens de HR worden bepaald. De rekenregel is eenvoudig toe te passen in de praktijk, in tegenstelling tot het complexe probabilistische model. Het probabilistische model is voor slechts 18 raaien toegepast. Op basis van de berekende 18 afslaglengtes is de rekenregel afgeleid. Toepassing van de rekenregel leidt tot vergelijkbare mate van duinafslag als berekend met het probabilistische model.

Het probabilistische model voor duinafslag voor de Waddeneilanden bestaat grofweg uit drie onderdelen:

- Het hydraulische belastingmodel: de rekenprogrammatuur waarmee de statistieken van de waterstanden en wind en de daarbij horende golfhoogte en golfperiode worden beschreven. De vertalingsmatrix van SWAN modelresultaten maakt hiervan onderdeel uit.
- Het sterktemodel: het deterministische duinafslagmodel D++ waarmee voor gegeven condities van de waterstand, golfhoogte, golfperiode, waterdiepte en korreldiameter de positie van de afslagrand berekend wordt.
- Het probabilistische rekenmodel: het "overkoepelende" model waarmee overschrijdingkansen van afslagranden bepaald worden op basis van de koppeling tussen de hydraulische belasting en het sterktemodel.

### 5.2.2 Het hydraulische belastingmodel

#### Waterstand

De basis voor de waterstandstatistiek voor de Waddeneilanden is de statistiek op een drietal meetstations, te weten Den Helder, Texel Noordzee en Huibergat. Tussen de laatste twee is een extra punt gedefinieerd waarvoor de waterstanden geïnterpoleerd zijn. Dit maakt in het totaal vier zogenaamde steunpunten. Overigens is de verdeling van Texel Noordzee over de richtingen gelijk genomen aan het nabijgelegen Den Helder.

De waterstand in de steunpunten wordt als invoer van het afslagmodel (D++) toegepast. De statistiek van de waterstand is beschreven met een conditionele Weibull-verdeling:

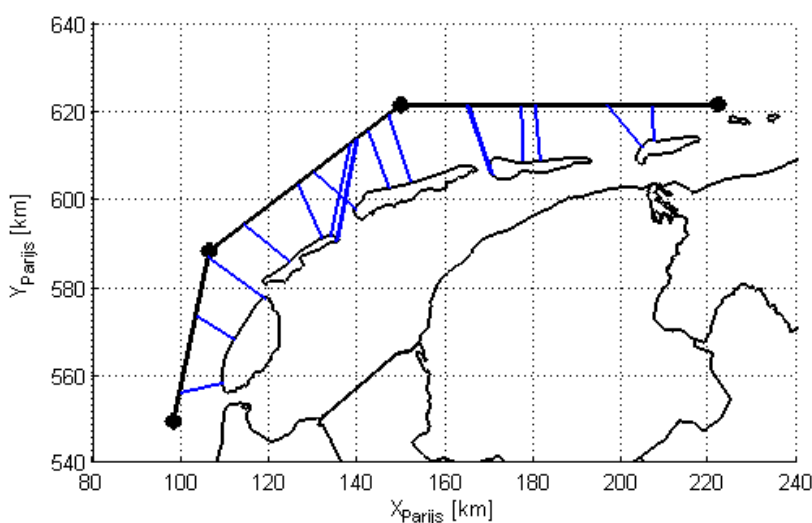
$$F(H > h) = \rho \exp \left\{ - \left( \frac{h}{\sigma} \right)^\alpha + \left[ \frac{\omega}{\sigma} \right]^\alpha \right\} ; h \geq \omega \quad (5.1)$$

waarin:

$F$	= overschrijdingsfrequentie;
$H$	= de waterstand;
$h$	= mogelijke realisatie van variabele $H$ ;
$\alpha$	= vorm- of krommingparameter;
$\sigma$	= schaalparameter;
$\omega$	= drempelwaarde, waarboven de statistieken zijn afgeleid; en
$\rho$	= overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde $\omega$ .

De waarden van de Weibull parameters zijn afkomstig uit Dillingh en Rego (2010), zie ook Tabel 7.2. Ze gelden voor de toestand in 2017. De vier parameters zijn beschikbaar per windrichtingssector van 30 graden en ook omni-directioneel.

Op basis van de parameters en vergelijking (5.1) kunnen waterstanden bepaald worden voor de drie basislocaties. De waterstand voor het extra steunpunt wordt vastgesteld op basis van lineaire interpolatie tussen de twee omliggende steunpunten (Texel Noordzee en Huibertgat), waarbij de verhouding van de afstanden tot deze twee punten respectievelijk 0.43 tegen 0.57 is. Voor tussenliggende locaties worden de waterstanden bepaald op basis van ruimtelijke interpolatie tussen de vier steunpunten.



Figuur 5.1 Grafische weergave van de ruimtelijke interpolatie voor 18 duinraaien op de Waddeneilanden. De vier met zwart aangeduide locaties zijn (vlnr) steunpunt-locaties Den Helder (DH), Texel Noordzee (TXN), steunpunt Waddenzee en Huibertgat (HBG) (afkomstig uit: Diermanse et al., 2011).

Figuur 5.1 geeft een schematische weergave van de methode van interpoleren tussen de vier steunpunten die voor de Waddeneilanden relevant zijn. De blauwe lijnen zijn duinraaien die doorgetrokken zijn, in de richting loodrecht op de kustlijn. Elke duinraai wordt doorgetrokken tot deze één van de lijnen snijdt die getrokken zijn tussen de vier steunpunten. Vanuit het snijpunt van de twee lijnen wordt de afstand bepaald tot de twee punten waartussen de lijn op diep water is opgespannen. Deze afstand is bepalend voor de wegingsfactoren van de interpolatie.

Wind

De wind is nodig om de juiste golfcondities te kunnen bepalen. Voor alle raaien wordt aangenomen dat de windsnelheid bij locatie Terschelling-West representatief is. Voor dit station wordt de windsnelheid beschreven met de conditionele Weibull-verdeling:

$$F(U > u) = \rho \exp \left\{ - \left( \frac{u}{\sigma} \right)^\alpha + \left[ \frac{\omega}{\sigma} \right]^\alpha \right\} ; U \geq \omega \quad (5.2)$$

waarin:

$F$	= overschrijdingsfrequentie;
$U$	= de potentiële windsnelheid
$u$	= mogelijke realisatie van variabele $U$ ;
$\alpha$	= vorm- of krommingparameter;
$\sigma$	= schaalparameter;
$\omega$	= drempelwaarde, waarboven de statistieken zijn afgeleid; en
$\rho$	= overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde $\omega$ .

De Weibullparameters van station Terschelling, zoals gebruikt voor de duinen zijn ook beschikbaar in Hydra-K, zie Tabel 7.1. De parameters zijn zowel omni-directioneel beschikbaar, als per windrichtingssector van 30 graden. De windsnelheid uit de statistiek betreft de potentiële windsnelheid.

De windsnelheid wordt verondersteld 100% gecorreleerd te zijn met de waterstand, ongeacht de windrichting. Dus in een storm waar bijvoorbeeld de waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 1/1000 per jaar optreedt, wordt aangenomen dat deze gepaard gaat met de windsnelheid met dezelfde overschrijdingsfrequentie. Een dergelijke aanname van volledige correlatie is enigszins aan de conservatieve kant.

Golven

De golfhoogte en golfperiode, gegeven de waterstand en de windsnelheid, worden bepaald op basis van simulaties met het golfmodel SWAN. In plaats van telkens een nieuwe SWAN simulatie uit te voeren wordt gebruik gemaakt van een database met vooraf berekende simulaties. De SWAN rekenresultaten beslaan een matrix van o.a. significante golfhoogte en golfperiodes  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$  op alle 600 duinenraaien, voor 280 combinaties van waterstand (NAP + 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 m), windsnelheid (20, 25, 30, 35, 40 m/s) en windrichting (90, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360 °N), zie hoofdstuk 8 voor meer details

Voor elke raai worden de gevonden golfhoogtes en golfperiodes vervolgens gewogen gemiddeld over de windrichtingen. Het gewicht dat daarbij aan elke windrichting is toegekend, is evenredig met de kans dat bij die windrichting de waterstand wordt overschreden.

Ter verduidelijking geeft Tabel 5.1 een getallenvoorbeeld van overschrijdingsfrequenties van een waterstandsniveau  $h^*$ . Voor de zeven richtingssectoren van kolom 1 toont kolom 2 de overschrijdingsfrequentie van de heersende waterstand. In de derde kolom zijn deze frequenties omgerekend naar een fractie van het totaal, waarbij de som van kolom 3 gelijk is aan 1. De waarden in kolom 3 worden gebruikt als weegfactoren voor de windrichtingen.

Tabel 5.1 Kansbijdrage windrichtingen aan waterstandsniveau  $h^*$  (afkomstig uit Diermanse, 2012)

Windrichting (°)	Overschrijdingsfrequentie per jaar	fractie van totaal ( $P_i$ )
0	5.358E-08	0.001
30	5.000E-09	0.000
210	5.000E-09	0.000
240	5.000E-09	0.000
270	6.441E-06	0.069
300	3.972E-05	0.428
330	4.666E-05	0.502

Uit deze tabel blijkt dat bij het optreden van de bewuste waterstand  $h^*$  de kans het grootst is dat hier een windrichting bij hoort uit noordwestelijke richting (de sectoren  $300^\circ$ - $330^\circ$ ). Met de aldus bepaalde kansbijdragen van de verschillende windrichtingen aan de waterstand worden de SWAN berekeningsresultaten gewogen opgeteld. In formule:

$$X = \sum_i P_i X_i \quad (5.3)$$

waarin:

$X$  = resulterende waarde van de golfhoogte

$X_i$  = waarde van de golfhoogte bij windrichting  $i$

$P_i$  = kanswaarde van windrichting  $i$  (laatste kolom van Tabel 5.1)

Aflandige golven worden in deze procedure niet meegenomen. Voor windrichtingen waarbij de resulterende golven op de randvoorwaardenlocatie aflandig gericht zijn, wordt de golfhoogte dus gelijk aan 0 gesteld.

De berekende golfhoogte op basis van formule (5.3) wordt beschouwd als de *verwachtingswaarde* van de golfhoogte, gegeven het feit dat de waterstand gelijk is aan het rekenpeil. Vervolgens wordt daar één keer de standaarddeviatie bij opgeteld. De standaarddeviatie wordt aangenomen overall 0.6 m te zijn, analoog aan het probabilistische model dat in het kader van de VTV2006 is toegepast. Ten slotte wordt in de rekenregel (niet in het probabilistische model) opgelegd dat de golfhoogte minimaal gelijk moet zijn aan 1 m.

De keuze van de locatie op een raai waar de randvoorwaarden voor het afslagmodel worden opgelegd, afhankelijk van de bathymetrie en golfkarakteristieken en dus per raai verschillend, is cruciaal bij het bepalen van afslagvolumes. De *rvw*-locatie dient zo dicht mogelijk bij de kust gekozen, maar zeewaarts van de afslagzone. Daarnaast geldt nog een tweede criterium dat er voor zorgt dat de lokale korte golfenergie nog een goede maat is voor de totale golfenergie<sup>6</sup>, namelijk:

6. De totale hoeveelheid duinafslag wordt bepaald door de totale hoeveelheid golfenergie die het duin bereikt. In de brekerzone wordt een deel van de windgedreven korte golf energie door breken en niet-lineaire wisselwerking omgezet in roller energie en lange golf energie. Deze omzetting van golfenergie is niet met een golfmodel als SWAN te berekenen. Buiten de brekerzone is de hoeveelheid lange golf energie te verwaarlozen ten opzichte van de korte golf energie; roller energie is per definitie daar niet aanwezig. In Huisman et al. (2010) is criterium (5.4) afgeleid met het idee dat de korte golfenergie op de bewuste locatie een redelijke maat is voor de totale golfenergie, om zodoende een onderschatting van de duinafslag te voorkomen.

$$\frac{H_{m0}}{d} < 0.29kd + 0.25 \quad (5.4)$$

met  $d$  de waterdiepte en  $k$  het golfgetal ( $2\pi/L$  met  $L$  de golflengte). De golfhoogte is bepaald volgens het model van Baldock et al. (1998) in combinatie met het breker criterium van Ruessink et al. (2003). In principe is het meest landwaartse punt gekozen waarbij bovenstaand criterium nog geldig. Voor alle raaien is op basis van deze twee criteria een randvoorwaardenlocatie bepaald (Diermanse, 2012). De diepte van deze locatie wordt expliciet vermeld in de tabellen met HR, omdat deze een invoerparameter is van het duinafslagmodel D++.

### 5.2.3 Het duinafslagmodel D++

Als sterktemodel wordt het duinafslagmodel D++ (Boers, 2011) gebruikt, dat gebaseerd is op een aantal uitgangspunten:

- Tijdsafhankelijke HR: Het afslagmodel is afgeleid op basis van experimenten met vaste waarden voor de waterstand, de golfhoogte en de golfperiode. Deze vaste HR vormen een benadering voor het tijdsafhankelijke stormverloop op de Noordzee.
- Evenwichtsprofiel: Er wordt aangenomen dat het duinafslagprofiel na een storm met maatgevende omstandigheden een evenwichtsprofiel benadert. Dit betekent dat de vorm van het beginprofiel voor de storm niet van invloed is op de vorm van het profiel na afloop van de storm. De sterkte van het duin wordt alleen bepaald door het zandvolume en de korreldiameter.
- Sedimentbalans: Er wordt aangenomen dat het volume aan zand in een dwarsprofiel tijdens een storm niet verandert. Dit betekent dat het zand dat voor het duin wordt afgezet gelijk is aan het volume duinafslag.

Bij de bepaling van het duinafslagprofiel met D++ wordt eerst met behulp van de waterstand, de golfhoogte, de golfperiode, de waterdiepte en de korreldiameter het evenwichtsprofiel na afloop van een storm berekend. Vervolgens wordt het berekende afslagprofiel gekoppeld aan het beginprofiel, zodanig dat er sprake is van een volumebalans.

Op deze manier kan men eenvoudig en snel een afslagprofiel bepalen. Dit is vooral van belang voor probabilistische berekeningen waarin een groot aantal berekeningen met het afslagmodel wordt uitgevoerd. Het afslagprofiel dat berekend wordt is het profiel na afloop van de storm, waarbij er van wordt uitgegaan dat dit profiel bij benadering in evenwicht is. In Appendix B zijn de vergelijkingen voor het afslagprofiel gegeven.

### 5.2.4 Het probabilistische rekenmodel

Het probabilistische model voor duinafslag combineert de volgende aspecten:

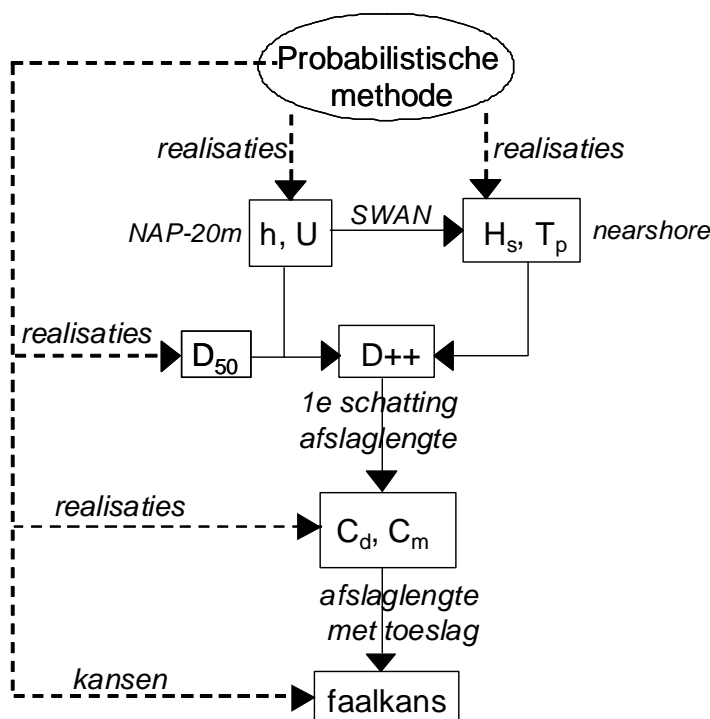
- Kansverdelingen van hydraulische belastingen (kans op voorkomen van hoge waterstanden en golven, inclusief de onderlinge correlatie);
- Kansverdelingen van onzekerheden (in de grootte van de korreldiameter en in de resultaten van het afslagmodel);
- De oorspronkelijke vorm van het duinprofiel (deze vorm bepaalt het zandvolume boven het rekenpeil); en



- Het model D++ waarmee afslaglengtes worden berekend, gegeven de belasting, de korreldiameter en de vorm van het duinprofiel.

Op basis van een probabilistische rekentechniek worden uit deze gegevens overschrijdingskansen van afslaglengtes bepaald. Er zijn verschillende probabilistische rekentechnieken beschikbaar. Hier is FORM (First Order Reliability Method) toegepast.

Het probabilistische model wordt in de praktijk eigenlijk niet toegepast voor de berekening van afslagpunten of HR voor alle duinraaien. Het model is echter wel van groot belang om resultaten te genereren waarop de rekenregel gebaseerd wordt.



Figuur 5.2 Schematische weergave van het probabilistische rekenmodel, zoals toegepast in het kader van WT/ 2011 (bron: Diermanse et al. 2011)

Een schematische weergave van het probabilistische model is te vinden in Figuur 5.2. Het probabilistische model gebruikt de volgende zes stochasten:

- Waterstand: Voor de statistiek van het stormvloedpeil wordt gebruik gemaakt van de overschrijdingsfuncties voor de waterstand die voor een aantal meetstations langs de Nederlandse kust is afgeleid.
- Golfhoogte: Gebaseerd op SWAN resultaten, gegeven de waterstand. Rond de verwachtingswaarde wordt een normale kansdichtheidsverdeling verondersteld met een standaardafwijking van 0,6 m.
- Golfperiode  $T_{m-1,0}$ : Gebaseerd op SWAN resultaten, gegeven de waterstand. Rond de verwachtingswaarde wordt een normale kansdichtheidsverdeling verondersteld met een standaardafwijking van 1,0 s.
- Korreldiameter: Voor de statistiek van de korreldiameters van het duinzand wordt gebruik gemaakt van Kohsiek (1984).

- Stormduur: Een langere stormduur leidt tot een grotere hoeveelheid duinafslag. In het probabilistische model wordt rekening gehouden met een standaardafwijking van 1 uur ten opzichte van een standaardstorm met een 5 uur durende vaste waterstand. Dit correspondeert met een standaardafwijking van 10% van het berekende volume duinafslag.
- Onnauwkeurigheid van het morfologische afslagmodel: Het morfologische afslagmodel kan de meetresultaten slechts bij benadering voorspellen. Daarom wordt in het probabilistische model rekening gehouden met modelonnauwkeurigheid. Voor de onnauwkeurigheid van het morfologische afslagmodel wordt gerekend met een standaardafwijking van 15% van het berekende volume duinafslag boven stormvloedpeil.

De windsnelheid ( $U$ ) is ook genoemd als variabele maar deze is verondersteld volledig afhankelijk te zijn van waterstand. In feite wordt dus geen trekking uitgevoerd van de stochast windsnelheid, maar wordt gebruik gemaakt van een deterministische relatie met de waterstand (namelijk dat de windsnelheid dezelfde overschrijdingskans heeft als het rekenpeil). Vandaar dat de windsnelheid niet als aparte stochastische variabele wordt beschouwd. Ook voor de golfparameters,  $H_s$  en  $T_{m-1,0}$ , geldt dat deze sterk gerelateerd zijn aan de waterstand (en windsnelheid), maar deze afhankelijkheid is niet volledig, zodat  $H_s$  en  $T_{m-1,0}$ , wel als aparte stochasten gekenmerkt worden.

Voor elke combinatie van kanswaarden worden de realisaties van de zes stochasten bepaald op basis van hun kansverdelingen en onderlinge afhankelijkheden. Voor bijvoorbeeld de waterstand ( $h$ ) wordt hier de inverse van de Weibull-verdeling gebruikt. Uit de realisatie van de waterstand wordt de waarde van de windsnelheid ( $U$ ) afgeleid op basis van de deterministische relatie die volgt uit de aanname van volledige afhankelijkheid en de statistieken van  $h$  en  $U$ . Vervolgens worden golfhoogte en periode bepaald uit de SWAN data base – gegeven de waterstand en windsnelheid (zie paragraaf 5.2.2). Daar wordt nog de afwijking ten opzicht van de verwachtingswaarde bij opgeteld, die aangenomen is normaal verdeeld te zijn rond de berekende golfhoogte en golfperiode, met een standaarddeviatie van respectievelijk 0.6 m en 1 s.

Op basis van de aldus verkregen waarden van de waterstand, significante golfhoogte, spectrale periode en korreldiameter wordt met D++ de eerste schatting van het afslagvolume bepaald van het duin (en, daarmee corresponderend, de afslagrand). De definitieve schatting van het afslagvolume wordt vervolgens bepaald door de realisaties van twee toeslagen ( $C_d$  en  $C_m$ ) voor respectievelijk stormduur en modelonzekerheden op te tellen bij deze eerste schatting. De toeslagen ( $C_d$  en  $C_m$ ) zijn dus een soort “nabewerking” op het met D++ berekende afslagvolume (afslagrand). Beide variabelen zijn normaal verdeeld, met een gemiddelde waarde gelijk aan 0 en een standaarddeviatie van:

$$\begin{aligned} C_d &: 0,1 \cdot A; \\ C_m &: 0,15 \cdot A. \end{aligned}$$

Hierin is  $A$  het door D++ berekende afslagvolume boven stormvloedpeil.

Na herhaaldelijk doorlopen van deze stappen zijn er voldoende combinaties doorgerekend om een betrouwbare schatting te kunnen maken van de overschrijdingskans van een gegeven afslagrand.

### 5.3 Berekenen van de faalkans

Er zijn verschillende faalmechanismen die het bezwijken van waterkeringen kunnen veroorzaken. Voor duinen wordt in de huidige studie alleen het mechanisme duinafslag beschouwd. In probabilistische analyses worden faalmechanismen beschreven met grenstoestandsfuncties. Dit zijn wiskundige formuleringen waarmee de sterkte van de kering wordt vergeleken met de heersende hydraulische belasting. In het geval van duinafslag kan deze formulering gebaseerd worden op een bepaalde kritische afslaglengte,  $A^*$ , waarvoor de overschrijdingsfrequentie bepaald moet worden:

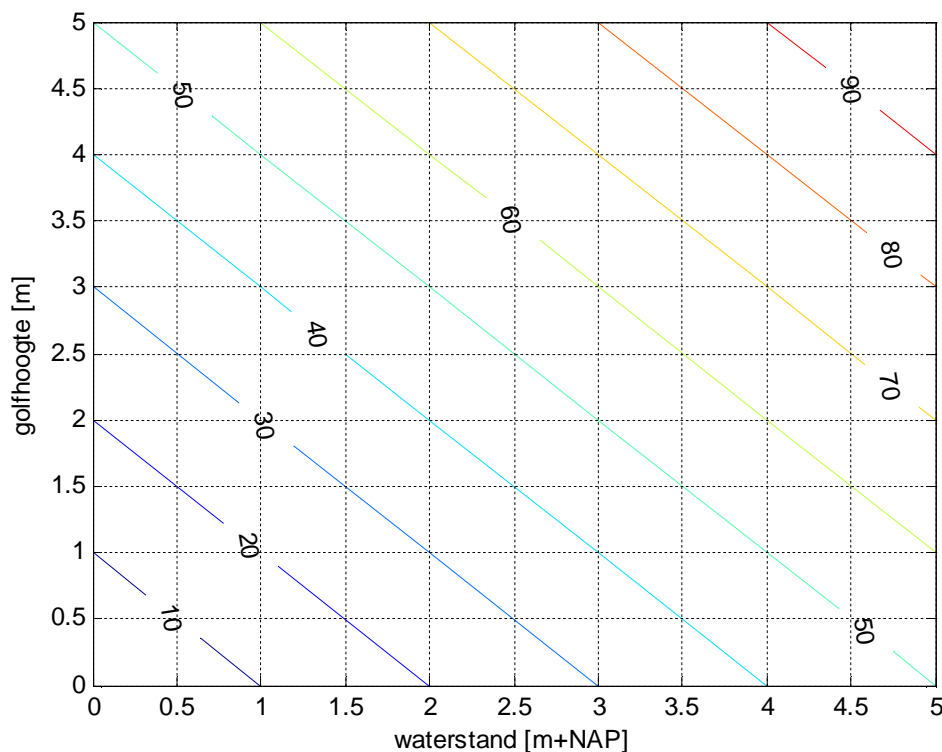
$$Z = A^* - A, \quad (5.5)$$

waarin:

- A = opgetreden afslaglengte gedurende een stormgebeurtenis;
- $A^*$  = kritische afslaglengte waarvoor de overschrijdingskans bepaald wordt;
- Z = grenstoestandsfunctie.

Als Z negatief is dan is er sprake van overschrijding van de kritische afslaglengte. Het doel van de probabilistische berekening is om de kans vast te stellen dat Z negatief wordt. Ten behoeve van de eenduidigheid in terminologie wordt gesproken over “falen” indien  $Z < 0$ . De kans dat dit gebeurt wordt de faalkans genoemd.

De waarde van de kritische afslaglengte  $A^*$  dient eerst bepaald te worden door voor een aantal gekozen afslaglengtes (bijvoorbeeld van 0 tot 100 m met een stapgrootte van 5 m) de bijbehorende overschrijdingsfrequentie te berekenen. Daaruit kan vervolgens de afslaglengte bij de normfrequentie worden afgelezen, ofwel  $A^*$ .



Figuur 5.3 Voorbeeld van de afslaglengte (m) als functie van waterstand en golffhoogte

Het principe van de grenstoestandsfunctie kan geïllustreerd worden aan de hand van het (fictieve) voorbeeld in Figuur 5.3. Daarin is middels gekleurde contourlijnen de afslaglengte weergegeven als functie van de heersende waterstand (horizontale as) en golfhoogte (verticale as). Deze contourlijnen worden bepaald door meerdere berekeningen uit te voeren met een rekenprogramma als D++. Voor de inzichtelijkheid zijn in het voorbeeld van Figuur 5.2 andere invloeden, zoals de golfperiode en de korreldiameter, buiten beschouwing gelaten.

Stel nu dat de kritische afslaglengte  $A^*$  gelijk is aan 70 m. Deze lengte wordt weergegeven door de gele lijn in Figuur 5.3. Het gebied rechtsboven de gele lijn wordt gevormd door alle mogelijke combinaties van de waterstand en de golfhoogte die een grotere afslaglengte dan 70 m geven en dus tot een negatieve waarde van  $Z$  leiden. Doel is nu om de totale kans van voorkomen van deze combinaties te bepalen. Dit is alleen mogelijk als de gezamenlijke kansverdeling van de betrokken stochasten (in dit voorbeeld: waterstand en golfhoogte) bekend is.

De eerste stap in de methode is het bepalen van het illustratiepunt. Dit is de combinatie van realisaties van de betrokken stochasten waarvoor geldt dat:

- $Z=0$ , d.w.z deze combinatie leidt tot een afslaglengte die exact gelijk is aan  $A^*$
- van alle combinaties die tot  $Z=0$  leiden is dit de combinatie met de grootste kans van voorkomen.

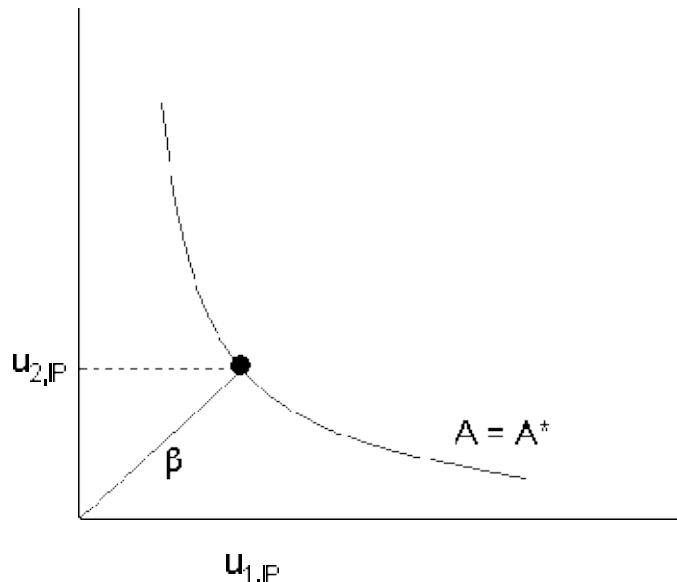
Het illustratiepunt kan beschouwd worden als de meest waarschijnlijke combinatie die tot afslaglengte  $A^*$  leidt. Zodra het illustratiepunt gevonden is, wordt de overschrijdingskans van  $A^*$  geschat door linearisatie van de lijn  $Z=0$  in het illustratiepunt. Dit lineariseren heeft als voordeel dat de kans direct geschat kan worden en dat dus niet het "hele" gebied verkend hoeft te worden met alle combinaties die tot  $Z<0$  leiden. Een nadeel is uiteraard dat met de linearisatie een schattingsfout wordt geïntroduceerd. Over het algemeen is deze fout niet groot, omdat het gebied met de grootste kansbijdrage aan de overschrijdingskans zich in de omgeving van het illustratiepunt bevindt en in die omgeving is de fout door linearisatie klein. Indien de verzameling combinaties die leiden tot  $Z<0$  echter niet geconcentreerd is rond het illustratiepunt of als de lijn  $Z=0$  sterk niet-lineair is, zal de fout toenemen tot mogelijk onacceptabele proporties. De prestatie van FORM is daarmee afhankelijk van het rekenprobleem. Een ander nadeel is dat de methode niet altijd convergeert, of soms een lokaal optimum vindt tijdens de zoektocht naar het illustratiepunt. Het is daarom raadzaam om de uitkomsten van FORM regelmatig te controleren met andere probabilistische rekentechnieken.

Over het algemeen wordt bij de toepassing van FORM gebruik gemaakt van een verzameling van standard normaal verdeelde stochasten  $u_1, \dots, u_n$  die corresponderen met de "werkelijke" stochasten  $X_1, \dots, X_n$ . De transformatie van  $u$  naar  $X$  of vice versa wordt gedaan door gelijkstelling van hun respectievelijke over- of onderschrijdingskansen:

$$F_i(x_i) = \Phi(u_i) \quad (5.6)$$

waar  $F_i$  de kansverdelingsfunctie is van variabele  $X_i$  en  $\Phi$  de standaard normale verdelingsfunctie is. The  $u$ -variabelen hebben een gemiddelde van 0 en een standaarddeviatie van 1. Verder geldt dat ze onderling onafhankelijk zijn. Een voordeel van de transformatie van en naar  $u$ -variabelen is dat daarmee een duidelijke illustratie

betekenis aan het illustratiepunt gegeven kan worden: In de  $u$ -ruimte is het illustratiepunt namelijk het punt op de grenstoestand dat het dichtst bij de oorsprong ligt, zie Figuur 5.4.



Figuur 5.4 Het illustratiepunt (IP) in de ruimte van standaard normaal verdeelde variabelen.

De afstand,  $\beta$ , van het illustratiepunt naar de oorsprong is de *betrouwbaarheidsindex*. Een relatief grote waarde van  $\beta$  betekent een relatief grote afwijking van de  $u$ -waarden van het gemiddelde (0) en dat wijst op "extreme gebeurtenissen". De geschatte faalkans op basis van FORM kan direct uit de waarde van  $\beta$  bepaald worden:

$$P(Z < 0) \approx P(z_L < 0) = \Phi(-\beta) \quad (5.7)$$

Waar  $\Phi$  de standaard normale verdelingsfunctie is en  $z_L$  is de gelineariseerde versie van de  $Z$ -functie in het illustratiepunt:

$$z_L = B + A_1 u_1 + \dots + A_n u_n \quad (5.8)$$

Zodra het illustratiepunt gevonden is, is het dus eenvoudig om de schatting van de faalkans te geven. Het cruciale element van de methode zit dus in het bepalen van de locatie van het illustratiepunt. Dit is een iteratief proces waarin de  $U$ -ruimte wordt doorlopen totdat het illustratiepunt is gevonden. Om de juiste zoekrichting te vinden en om vast te stellen of het illustratiepunt bereikt is moet tijdens het doorlopen van de  $U$ -ruimte meerdere malen de waarde van de  $Z$ -functie bepaald worden. Dit gebeurt telkens in twee stappen:

- 1 De  $u$ -waarden worden vertaald naar realisaties van de "werkelijke" stochasten (zoals de waterstand en golfhoogte) op basis van vergelijking 5.6. Voor deze vertaalslag zijn de kansverdelingen van deze stochasten benodigd.
- 2 Op basis van de waarden van de werkelijke stochasten wordt de afslaglengte,  $A$ , bepaald met het afslagmodel D++. Op basis van vergelijking 5.5 kan dan eenvoudig de waarde van  $Z$  bepaald worden.

## 5.4 Bepalen van HR

### 5.4.1 Rekenregel

De rekenregel waarmee de HR en ook de afslaglengtes bepaald worden is gebaseerd op de resultaten van probabilistische berekeningen met D++. De rekenregel is eigenlijk een voorschrift voor de rekenwaarden die gebruikt dienen te worden als invoer voor D++. De locatie-afhankelijke invoer zoals voorgeschreven door de rekenregel bestaat, naast het Jarkusprofiel, uit zes parameters te weten:

- waterstand: rekenpeil (=toetspeil + 2/3 decimeringshoogte)
- golfhoogte: 1\* de standaarddeviatie (=0.6 m) boven de verwachtingswaarde zoals die - gegeven de waterstand - door SWAN is berekend, met een minimum van 1 m
- golfperiode: de verwachtingswaarde  $T_{m-1,0}$  zoals die – gegeven de waterstand – door SWAN is berekend.
- korreldiameter: rekenwaarde volgens Kohsiek (1984)
- waterdiepte: ter plaatse van de HR locatie
- toeslagvolume: 18% van het initieel berekende afslagvolume

### 5.4.2 Waterstand

Voor iedere duinenraai wordt eerst het rekenpeil bepaald uit de beschikbare statistische verdelingsfuncties van waterstanden, volgens het recept van TAW (1984):

$$\text{Rekenpeil} = \text{waterstand bij de normfrequentie} + 2/3 \times \text{decimeringshoogte}$$

De normfrequentie is gelijk aan 1/4.000 per jaar voor Texel en 1/2.000 per jaar voor de overige Waddeneilanden. De toeslag van 2/3 decimeringshoogte hangt samen met het hogere veiligheidsniveau dat voor duinen nodig is ten opzichte van dijken, aangezien duinen geen reststerkte bezitten. De decimeringshoogte is het absolute verschil in hoogte tussen het toetspeil en een waterstand met een overschrijdingsfrequentie die 10 keer zo klein is als die van het toetspeil. Dat slechts 2/3 van de decimeringshoogte in rekening wordt gebracht en niet de hele decimeringshoogte komt omdat meer onzekerheden dan alleen die van de waterstand in de probabilistische benadering zijn meegenomen. De waterstand bij de normfrequentie, de decimeringshoogte en het rekenpeil is voor alle Jarkusraaien in het Waddengebied, te vinden in Dillingh en Rego (2010).

### 5.4.3 Randvoorwaardenlocatie

De locatie op de uitvoerraaien waar de golfrandvoorwaarden genomen moeten worden - inclusief de lokale diepte - is berekend en weergegeven in Diermanse (2012).

### 5.4.4 Golfhoogte

De maatgevende golfhoogte voor de duinen van de Waddenzee wordt bepaald door de verwachtingswaarde ter plaatse van de randvoorwaardenlocatie op basis van de SWAN database - gegeven de waterstand en de windsnelheid – met de aangenomen standaarddeviatie (= 0.6 m) te verhogen (zie ook Paragraaf 5.2.2). Hier is geen afslagmodel of iets dergelijks voor nodig.

#### 5.4.5 Golfperiode $T_{m-1,0}$

De procedure voor het afleiden van de golfperioden voor de duinen is grotendeels analoog aan de procedure voor golfhoogtes (zie sectie 5.4.4). Een verschil is dat voor de periode de verwachtingswaarde wordt gekozen, en dus niet zoals bij de golfhoogte de verwachtingswaarde plus één keer de standaarddeviatie. Bij het afleiden van de rekenregel bleek – op basis van vergelijking met de probabilistische resultaten - de verwachtingswaarde een geschikte maat te zijn (Diermanse et al., 2011).

Werd bij de HR2006 voor de Waddeneilanden nog de  $T_p$  gebruikt, voor de HR2011 wordt als periodemaat de  $T_{m-1,0}$  gebruikt in dit gebied.

Verder is van belang te melden dat het bereik van de piekperiode is gesteld op [12 s - 20 s] en van de periode  $T_{m-1,0}$  op [10.8 – 18 s] omdat voor piekperioden buiten dit bereik geen proeven zijn uitgevoerd waarop D++ gebaseerd kon worden. Voor hogere of lagere waarden dient men de boven- respectievelijk ondergrens aan te houden.





## 6 Meetgegevens

### 6.1 Inleiding

Een belangrijk onderdeel van de bepaling van de HR zijn de metingen van de wind, waterstand en golven en de daaruit afgeleide statistiek. Het onderhavige hoofdstuk behandelt de meetgegevens, opgesplitst in waterstand (Paragraaf 6.2), wind (Paragraaf 6.3) en golven (Paragraaf 6.4).

De noodzaak van meetgegevens is vierledig. Het eerste punt betreft de waterstanden langs de hele Nederlandse Kust, dus de Wadden, Hollandse kust en Zeeland. De overige drie punten hebben betrekking op het afleiden van de golfgegevens voor HR2011 en betreffen alleen de Waddenzee en de Westerschelde:

- 1) metingen van waterstanden om de toets- en rekenpeilen af te leiden.
- 2) metingen van waterstand, wind en offshore golven. De eerste twee om de marginale statistieken af te leiden die als invoer voor Hydra-K en het probabilistische duinenmodel gebruikt worden. De marginale statistiek voor golven is ook nodig om offshore golfrandvoorwaarden voor de SWAN simulaties te bepalen.
- 3) simultane waarnemingen tijdens stormen om de samenhang tussen de wind, waterstand en golven te kunnen kwantificeren, als invoer voor Hydra-K.
- 4) tijdsafhankelijke windmetingen om het stormverloop te bepalen. Hiertoe is gebruik gemaakt van metingen ter plaatse van De Kooy (Den Helder) van 1972 t/m 2004 (Lopez de la Cruz et al., 2010).

### 6.2 Metingen van waterstand

Waterstandsmetingen zijn niet alleen nodig om toets- en rekenpeilen af te leiden, maar ook om de waterstandsstatistiek op te stellen die gebruikt wordt door Hydra-K en het duinenmodel. In beide gevallen wordt uitgegaan van de toestand in 1985 zoals beschreven in Philippart et al. (1995). Bij de peilen van 1985 dient echter wel de stijging van het gemiddelde hoogwater tussen 1985 en 2017 te worden opgeteld. Om te bepalen hoe groot die stijging tot 2017 is, zijn jaargemiddelde gemeten hoogwaterstanden gebruikt tot en met 2008. De gemiddelde trend is geëxtrapoleerd naar 2017. Het begin van de meetreeksen varieert per station. Voor de meeste stations begint de meetreeks in de tweede helft van de 19<sup>e</sup> eeuw.

Voor het afleiden van de toetspeilen ten behoeve van de HR2011 is gebruikt gemaakt van dezelfde 23 locaties als 5 jaar geleden voor de HR2006 zijn gebruikt. In alfabetische volgorde zijn dat: Bath, Cadzand, Delfzijl, Den Helder, Den Oever buiten, Eemshaven, Hansweert, Harlingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Kornwerderzand buiten, Lauwersoog, Nes, Nieuwe Statenzijl, Oudeschild, Petten Zuid, Scheveningen, Schiermonnikoog, Terneuzen, Vlieland Haven, Vlissingen, Westkapelle en West-Terschelling (Dillingh en Rego, 2010).

De marginale waterstandstatistiek die Hydra-K gebruikt om maatgevende golfcondities af te leiden is beschikbaar op de volgende twaalf locaties: Delfzijl, Den Helder, Den Oever, Hansweert, Harlingen, Hoek van Holland, Huibertgat, IJmuiden, Lauwersoog, Terschelling West, Vlissingen en OS11 (geschat basispeil). Ondanks de 6 jaar verlenging van de meetreeksen is de statistiek die opnieuw is afgeleid voor de HR2011 op locaties Huibertgat,

Den Helder, Harlingen, Lauwersoog, IJmuiden identiek aan de statistiek die voor HR2006 in Hydra-K beschikbaar was. De statistiek van de overige stations is wel gewijzigd.

Voor het afleiden van de HR voor de duinen wordt dezelfde marginale waterstandstatistiek (en dus dezelfde metingen) gebruikt als voor de dijken, dus, zoals hierboven genoemd, gebaseerd op meetreeksen t/m 2008. Voor het Waddengebied gaat het om drie locaties: Den Helder, Huibertgat en Texel Noordzee. Texel Noordzee is geen standaard station, en is ook niet opgenomen in Hydra-K, maar de statistiek is er wel afgeleid (Dillingh en Rego, 2010). De richtingsverdeling is overgenomen van Den Helder.

### 6.3 Metingen van wind

In Rijkooft (1983) zijn metingen van wind gebruikt om de statistiek af te leiden, die nu – in enigszins aangepaste vorm, zie Paragraaf 7.2 - gebruikt wordt door het probabilistische model voor duinafslag in het Waddengebied (ter plaatse van Terschelling), en door Hydra-K voor de harde keringen. Dit betreft potentiële windsnelheden, dat wil zeggen de wind op 10 m hoogte, gecorrigeerd voor omgevingsfactoren en met homogene oppervlakteruwheid. Hydra-K maakt gebruik van windstatistiek van de potentiële windsnelheid ter plaatse van vijf stations, te weten (de w-\*\*\*.e30 bestanden uit de Hydra-K data directory): Texel, IJmuiden, Terschelling, Hoek van Holland en Vlissingen.

De metingen waarop de windstatistiek is gebaseerd zijn uurlijkse meetreeksen van het KNMI, over de periode 1962-1976. Op twaalf locaties (waaronder LS Texel en Vlissingen) is de statistiek direct op metingen gebaseerd, en op 15 additionele locaties is de statistiek via een ruimtelijke interpolatie bepaald aangezien er geen metingen van precies diezelfde twaalf jaar beschikbaar waren. De uitkomsten zijn wel geverifieerd met metingen die plaatsvonden tussen 1949 en 1980 (Rijkooft, 1983). Beschrijving van de metingen voor het afleiden van de statistiek is te vinden in Wieringa en Rijkooft (1983).

Omdat het verlengen van de meetreeksen (1970-2008) nauwelijks invloed heeft op de windstatistiek (zie Caires, 2009), is besloten de vigerende windstatistiek gebaseerd op meetreeksen over de periode 1962-1976 ook voor HR2011 te hanteren (zie Tabel 2.1).

De mv-bestanden met simultane waarnemingen van potentiële windsnelheid, windrichting, waterstand en golven zijn wel bijgewerkt tot 2008. Voor de metingen ten behoeve van deze bestanden wordt verwezen naar Paragraaf 6.5.

### 6.4 Metingen van golven

#### 6.4.1 De meetgegevens

Golfmetingen op diep water zijn de basis voor de golfstatistiek van significante golfhoogte ( $H_{m0}$ ) en spectrale golfperiode ( $T_{m-1,0}$ ). Voor de Hollandse Kust wordt de marginale statistiek van de spectrale golfperiode gebruikt als invoer voor Hydra-K. Voor de overige watersystemen is de golfstatistiek alleen van belang voor de bepaling van de offshore golfbrandvoorwaarden voor de SWAN berekeningen (zie Hoofdstuk 8).

Binnen Hydra-K wordt de data van vijf meetlocaties gebruikt, te weten: Schiermonnikoog Noord, Eierlandse Gat, Scheur West, IJmuiden munitiestort en Europlatform. Voor de gebieden waar de HR2011 nieuw worden bepaald zijn Schiermonnikoog Noord en Eierlandse Gat voor de Waddenzee gebruikt, en Scheur West voor de Westerschelde.

Tabel 6.1 Overzicht golfmeetlocaties die gebruikt zijn voor HR2011

naam	afkorting	latitude	longitude	waterdiepte [m]
Schiermonnikoog Noord	SON	53°35'44"	6°10'00"	19
Eierlandse Gat	ELD	53°16'37"	4°39'42"	26
IJmuiden-06 (=IJmuiden munitiestort)	YM6	52°33'00"	4°03'30"	21
Europplatform	EUR	51°59'55"	3°16'35"	32
Scheur West	SCW	51°23'32"	3°02'57"	15

De golfstatistiek is geactualiseerd ten opzichte van HR2006 (zie Roscoe, 2009b). De meetreeksen waar de statistiek op gebaseerd is beslaan de dertigjarige periode van 1979 tot 2008. De meetreeks voor HR2006 liep van 1979 tot 2002. De resulterende golfhoogtes en golfperiodes zijn voor de noordelijke stations nu over het algemeen iets hoger dan bij de HR2006. Dit komt voornamelijk door een aantal zware stormen die optraden tussen 2003 en 2008. Voor Scheur West zijn de resultaten juist iets lager.

Twee soorten bestanden zijn gebruikt om de statistiek af te leiden, te weten bestanden met de extensies "KLS" en "VTA". De KLS bestanden bevatten uurlijkse data, en de VTA bestanden drie uurlijkse data. De reden voor deze twee soorten bestanden is historisch. De golfspectra die nodig zijn om bepaalde golfperiodes ( $T_{m-1,0}$ ,  $T_p$ , and  $T_{pb}$ ) te kunnen berekenen werden oorspronkelijk met een tijdstap van 3 uur bewaard, terwijl standaard parameters zoals  $H_{m0}$  en  $T_{m02}$  wel om het uur werden opgeslagen. Voor een gedetailleerde beschrijving van de bestanden wordt verwezen naar de appendix van Weerts en Diermanse (2004a).

Naast de vijf genoemde stations zijn er nog vier stations waar golven worden gemeten en waarvan de statistiek is bepaald in Roscoe (2009b), te weten K13, Meetpost Noordwijk, Lichteiland Goeree en Schouwenbank. Deze worden echter niet gebruikt om de HR af te leiden. Ze worden wel gebruikt om middels een RFA (regional frequency analysis) betere schattingen te verkrijgen voor de parameters van de statistische verdelingen voor de vijf eerder genoemde locaties.

Ook voor de vernieuwde HR voor de duinen in de Waddenzee, is alleen gebruik gemaakt van golfmetingen en golfstatistiek voor het afleiden van de randvoorwaarden voor de SWAN berekeningen.

#### 6.4.2 Verwerking golfmetingen ten behoeve van de marginale statistiek

Aangezien vooral de extreme golfcondities relevant zijn, wordt de statistiek afgeleid op basis van de zwaarste golfcondities per stormgebeurtenis. Deze paragraaf beschrijft beknopt de procedure waarmee de extremen van de golfhoogte en golfperiode uit de meetreeksen worden geselecteerd. Die methode is identiek aan de methode die gebruikt is voor de HR2006. Er is gebruik gemaakt van het programma Golfstat (Weerts en Diermanse, 2004a). Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar Den Heijer et al. (2007) en Weerts en Diermanse (2004b).

Waarnemingen van extremen die kort na elkaar optreden zijn (wellicht) afhankelijk van elkaar. Deze moeten uit de reeks worden gefilterd om te voorkomen dat een stormgebeurtenis twee

keer wordt meegenomen bij het afleiden van de statistieken. De volgende criteria zijn daarbij gehanteerd:

1. De tijd tussen twee extremen moet minimaal 48 uur zijn (de zogenaamde “zichtduur”).
2. De laagste waarde tussen twee extremen in moet voldoende klein zijn, in ieder geval kleiner dan 0.7 voor golfhoogte resp. 0.8 voor golfperiode maal de waarde van het voorgaande maximum.

Alleen waarnemingen in het stormseizoen, dat is gedefinieerd als de periode van 1 oktober t/m 31 maart, worden beschouwd. Grote golfperiodes die optreden in combinatie met lage waarden van de golfhoogte, zoals bij deining, zijn niet relevant voor de extreme waarden statistiek van de lokaal opgewekte golven en worden daarom ook niet geselecteerd.

De metingen zijn gecorrigeerd voor het feit dat gemeten maxima vaak geen zuivere schatters zijn van de werkelijk opgetreden maxima. De meting wordt beïnvloed door toevallige fouten die zowel hogere als lagere metingen kunnen geven. Door het optreden van die toevallige fouten is het bij een relatief lange stormduur zeer waarschijnlijk dat de hoogste waarde uit de tijdreeks een overschatting is. Hiertoe wordt een filterprocedure gebruikt die gebaseerd is op Forristall et al. (1996). Deze filterprocedure is alleen toegepast voor de omni-directionele statistiek omdat hij speciaal voor stormmaxima is ontworpen. Voor de richtingsafhankelijke statistiek geldt dat een geselecteerde extreme waarde niet noodzakelijkerwijs de piek van de storm is, maar juist vaak voor of na de stormpiek optreedt. Het filter zou dan zelfs een negatief effect kunnen hebben.

## 6.5 Metingen ten behoeve van gecombineerde statistiek

Hydra-K maakt gebruik van simultane waarnemingen. Dit zijn waarnemingen waarbij op één tijdstip in een storm de golfmetingen, windmetingen en waterstandsmetingen (meestal op verschillende locaties) worden gecombineerd. In Tabel 6.1 is een overzicht gegeven van de gebruikte combinaties van meetstations per regio. De stationscombinaties zijn in de loop der jaren gewijzigd. In de tabel staan de meest recente gegevens. Alleen de regio's Waddenzee-Oost, Waddenzee-West en Westerschelde zijn van belang voor de nieuw afgeleide HR2011. In de tabel staat 'Kust' voor Hollandse Kust.

Tabel 6.2 Overzicht locatie-combinaties van gebruikte meetstations per regio.

Regio	golfstation	windstation	waterstandstation
Kust-Noord	ELD	Texel (TXH)	Den Helder (HLD)
Kust-Midden	YM6	IJmuiden (YMS)	IJmuiden Buiten (YMB)
Kust-Zuid	EUR	Hoek van Holland (HVH)	Hoek van Holland (HVH)
Waddenzee-Oost	SON	Terschelling-West (TSW) vanaf sep 1996: Hoorn Terschelling (TSH)	Lauwersoog (LWO)
Waddenzee-West	ELD	Terschelling-West (TSW) vanaf sep 1996: Hoorn Terschelling (TSH)	Harlingen (HRL)
Westerschelde	SCW	Vlissingen 310 (VLS)	Vlissingen (VLS)

In Tabel 6.2 is een overzicht gegeven van de gebruikte mv-bestanden voor HR2011 en HR2006. Hun naam is als volgt samengesteld. Na de eerste twee letters in de naam van een mv-bestand staan de drieletterige afkortingen van de drie stations voor respectievelijk de golven, wind en waterstand. Ten opzichte van HR2006 is het aantal waarnemingen (stormen) voor de HR2011 toegenomen. Ook is voor het bepalen van diepwaterrandvoorwaarden de Waddenzee-West toegevoegd als extra regio. De golflocatie ELD wordt voor zowel 'Kust-Noord' als 'Waddenzee-West' gebruikt, daarbij gekoppeld aan verschillende wind- en waterstandstations.

Tabel 6.3 Overzicht van de gebruikte simultane waarnemingsbestanden in de HR2006 en in WTI-2011. bron: HKV (2010)

Regio	beschikbaar voor HR2011	beschikbaar voor HR2006
Kust-Noord	mveltdtxhhld.dat (912 stormen)	mveltdtxhhld.dat (721 stormen)
Kust-Midden	mvym6ymsymb.dat (717 stormen)	mvym6ymsymb.dat (717 stormen)
Kust-Zuid	mveurhvhhvh.dat (718 stormen)	mveurhvhhvh.dat (718 stormen)
Waddenzee-Oost	mvsontshlwo.dat (838 stormen)	mnsontshhbg.dat (687 stormen)
Waddenzee-West	mveltdtshhrl.dat (912 stormen)	n.v.t.
Westerschelde	mzscwvlsvls.dat (864 stormen)	mzscwhvhvls.dat (729 stormen)

Omdat in 2011 alleen de HR van de Waddenzee en de Westerschelde zijn vernieuwd, zijn ook alleen voor die gebieden de geactualiseerde mv-bestanden gebruikt, gebaseerd op tijdseries van 1979 t/m 2008 (Roscoe, 2010).

Voor het samenstellen van mv-bestanden is een matlabscript ontwikkeld (Weerts en Diermanse, 2004b) dat ook is toegepast voor de actualisatie van de bestanden (Roscoe, 2010). Dit script voert de volgende bewerkingen uit, waarbij station 1 de golflocatie is, station 2 de windlocatie, en station 3 het waterstandsstation:

1. Combineer drie-uurlijkse en uurlijkse golfdata van station 1.
2. Pas een licht Forristall filter toe op de golf- en winddata  $(X(i)=(X(i-1) + 3X(i) + X(i+1)))/5$ , om te corrigeren voor het feit dat metingen vaak een overschatting vormen voor de werkelijk opgetreden maxima (zie ook Weerts en Diermanse, 2004b).
3. Eerste selectie van stormperiodes: indien bij minimaal één van vijf locatie-combinaties de drempelwaarde van tenminste één van de parameters golfhoogte, windsnelheid en opzet wordt overschreden, dan geldt dat als een stormperiode. De drempelwaarde is overgenomen van Weerts en Diermanse (2004a) en was oorspronkelijk zo gekozen dat deze resulteert in een overschrijding van 2.5% van de tijd. Met de vijf stations worden voor de Westerschelde bedoeld: MPN, EUR, LEG, SWB, SCW en voor de Waddenzee: SON, ELD, K13, YM6 en EUR.
4. Voeg de bijbehorende wind en waterstand toe aan de geselecteerde stormperiodes.
5. Markeer de deininggolven en reduceer hun golfperiode zodat ze passen bij de verwachtingswaarde gegeven hun golfhoogte (zie Weerts en Diermanse, 2004a).
6. Pas de stormselectie aan door nu per station een drempelwaarde te hanteren die leidt tot 5% overschrijding van golfhoogte, windsnelheid en opzet.
7. Tenslotte worden stormen korter dan 6 uur, uit de selectie verwijderd.

Voor de mv-bestanden zijn veel meer stormen geselecteerd dan voor de marginale statistiek, die gebaseerd is op 200 maxima (Den Heijer et al., 2007). Zoals in Tabel 6.2 is te zien bestaan de mv-bestanden uit zo'n 700 à 900 stormen. Alleen de hoogste 50 stormen worden gebruikt in de faalkansberekeningen. Dat zijn niet per definitie de stormen met de hoogste waterstand en/of windsnelheid. De selectie van 50 stormen door Hydra-K verschilt per kustlocatie en per faalmechanisme. Dit is een belangrijke eigenschap van Hydra-K (zie Den Heijer et al., 2007).

## 7 Extreme waarden statistiek

### 7.1 Inleiding

Een belangrijk onderdeel van de bepaling van de hydraulische belastingen op de waterkeringen is de extreme waarden statistiek van de waterstanden, wind en offshore golfcondities. Dit hoofdstuk beschrijft hoe deze statistiek is vastgesteld.

De condities die de HR bepalen zijn zo extreem en zeldzaam, dat ze nog nooit zijn gemeten. Toch is de kans op deze omstandigheden uit metingen af te leiden, door de overschrijdingsfrequenties van opgetreden stormen te extrapoleren naar situaties met kleinere overschrijdingskansen. Daartoe zijn verdelingsfuncties nodig, die in Paragraaf 7.2 worden toegelicht.

Het grootste deel van dit hoofdstuk betreft de zogenaamde “marginale statistiek”. Dat is de individuele statistiek per variabele (stochast) windsnelheid, waterstand, golfhoogte en golfperiode. Indien men niet slechts één variabele beschouwt, maar juist de combinatie van meerdere variabelen, dan spreekt men van simultane of multivariate statistiek.

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 10 jaar in dit voorbeeld wordt de herhalingstijd genoemd. Dit is een gemiddelde duur tussen twee overschrijdingen. De kans op een overschrijding is echter elk jaar gelijk. Een overschrijding van NAP+3.0 m kan in twee of drie opeenvolgende jaren plaatsvinden. Evengoed zouden we kunnen zeggen:

*“De kans op het overschrijden van een waterstand van NAP+3.0 m bij Hoek van Holland is 10% per jaar”*

De windrichting is sterk gekoppeld aan de optredende windsnelheid, waterstand en golven. De statistieken van wind, waterstand en golven worden daarom afgeleid als functie van de windrichting, die daartoe is opgedeeld in 12 sectoren van elk 30 graden. Voor elke sector zijn apart statistieken afgeleid. 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 is de statistiek die voor alle richtingen tezamen wordt afgeleid. 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 nauwkeuriger dan de statistiek per windrichting, vanwege het veel grotere aantal meetgegevens dat beschikbaar is. Daarom geldt de omnidirectionele statistiek als uitgangspunt voor de windrichtings-afhankelijke statistiek. Ten behoeve van de

consistentie wordt de windrichtings-afhankelijke statistiek gecorrigeerd zodanig dat de omnidirectionele overschrijdingsfrequentie gelijk is aan de optelsom van de frequenties per windrichtingssector.

De paragrafen 7.3, 7.4 en 7.5 beschrijven de statistiek van respectievelijk de wind, de waterstand en golven.

## 7.2 Verdelingsfunctie voor wind, waterstand en golven

Per windrichtingssector wordt een verdelingsfunctie gefit op de metingen, zodat voor de extreme situaties die niet gemeten zijn, toch een overschrijdingskans voor de wind, waterstand en golfparameters bepaald kan worden.

Voor de wiskundige beschrijving van overschrijdingsfrequenties – de verdelingsfunctie - van de windsnelheid, waterstand en golfparameters is, evenals in voorgaande jaren, gekozen voor een conditionele Weibull verdeling (Conditional Weibull Distribution, CWD), ook al wordt deze niet ondersteund door de extreme waarden theorie. De gegeneraliseerde Pareto verdeling (Generalised Pareto Distribution, GPD) is wel een theoretisch zuivere extremewaarden verdeling. Een discussie over de keuze voor de CWD is te vinden in Caires (2007). Roscoe (2009b) heeft voor de golfgegevens onderzocht of de GPD tot betrouwbaardere resultaten zou leiden, maar in dat rapport werd toch aanbevolen vooralsnog de CWD te blijven gebruiken vanwege zijn robuustheid.

De CWD verdelingsfunctie is voor elke windrichtingssector gegeven in de vorm van een overschrijdingsfrequentie en wordt als volgt geformuleerd:

$$F(X > x) = \rho \exp \left\{ - \left( \frac{x}{\sigma} \right)^\alpha + \left[ \frac{\omega}{\sigma} \right]^\alpha \right\} ; x \geq \omega \quad (7.1)$$

waarin:

- $F$  = overschrijdingsfrequentie;
- $X$  = de variabele waarvoor de verdelingsfunctie is afgeleid (de stochast);
- $x$  = mogelijke realisatie van stochast  $X$ ;
- $\alpha$  = vorm- of krommingparameter;
- $\sigma$  = schaalparameter;
- $\omega$  = drempelwaarde, waarboven de statistieken zijn afgeleid; en
- $\rho$  = overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde  $\omega$ :  $(F(X > \omega))$ .

Omgekeerd kan ook voor een gegeven overschrijdingsfrequentie de bijbehorende waarde van de variabele worden bepaald door inversie van vgl. (7.1):

$$x = \sigma \left\{ \left( \frac{\omega}{\sigma} \right)^\alpha - \ln \left[ \frac{F}{\rho} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}} = \left\{ \omega^\alpha - \sigma^\alpha \ln \left[ \frac{F}{\rho} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}} ; x \geq \omega \quad (7.2)$$

De vier parameters van deze functie ( $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\omega$  en  $\rho$ ) verschillen per variabele (golfhoogte, golfperiode, windsnelheid of waterstand), meetlocatie en windsector. Ze zijn gefit op geselecteerde maxima van stormgebeurtenissen (zie Hoofdstuk 6). De verdeling heet de



*conditionele* Weibull-verdeling omdat hij wordt afgeleid op basis van waarnemingen boven een bepaalde drempelwaarde,  $\omega$ .

### 7.3 Windstatistiek

De windstatistiek die gebruikt is voor de HR2011 voor de Waddenzee en de Westerschelde is identiek aan de windstatistiek voor de HR2006. Voor het bepalen van de HR2011 zijn alleen de locaties Terschelling, Texel en Vlissingen gebruikt, omdat alleen voor de Waddenzee en de Westerschelde nieuwe randvoorwaarden zijn afgeleid.

Deze windstatistiek is in 1983 beschreven met het zogenaamde ‘Rijkoort-Weibull-model’<sup>7</sup> (Rijkoort, 1983), en is gebaseerd op twaalf meetreeksen van potentiële wind van het KNMI van 1962 tot 1976 (waaronder LS Texel en Vlissingen). Op 15 additionele locaties is de statistiek via een ruimtelijke interpolatie bepaald en daarna geverifieerd met metingen (Rijkoort, 1983). In het kader van de HR2006 is uit pragmatische overwegingen – consistentie binnen Hydra-K – de conditionele Weibull-verdeling gefit aan de uitkomsten volgens het Rijkoort-Weibull model. Voor de windsnelheden met overschrijdingsfrequenties in het bereik van  $10^{-3}$  tot  $10^{-4}$  per jaar zijn de onderlinge verschillen tussen de beide verdelingen kleiner dan 0.5% (Den Heijer et al., 2007).

De Weibull parameters voor de omnidirectionele windsnelheid zijn te vinden in Tabel 7.1. Deze statistiek geldt voor de zogenaamde potentiële windsnelheid, dat wil zeggen, de wind op 10 m hoogte, gecorrigeerd voor omgevingsfactoren en met een homogene oppervlakteruwheid.

Tabel 7.1 Weibull parameters voor de windstatistiek (afkomstig van de Hydra-K database)

	vormparameter $\alpha$	schaalparameter $\sigma$	drempelwaarde $\omega$	overschrijdings frequentie $\rho$
Terschelling	2.09	11.31	23	0.47
Texel	2.16	12.10	24	0.45
Vlissingen	1.74	7.8230	20	0.424

### 7.4 Waterstandstatistiek

#### 7.4.1 Inleiding

De statistiek van de waterstanden wordt op twee manieren gebruikt. Ten eerste wordt deze statistiek gebruikt voor de afleiding van de toets- en rekenpeilen, dat wil zeggen de maatgevende waterstanden die de harde keringen respectievelijk de duinen moeten kunnen weerstaan. Het afleiden van de toets- en rekenpeilen is beschreven in Paragraaf 7.4.2.

Daarnaast maakt Hydra-K gebruik van richtingsafhankelijke marginale waterstandstatistiek voor het bepalen van de golfrandvoorwaarden voor de harde keringen. Paragraaf 7.4.3 gaat in op de waterstandstatistiek voor het afleiden van de maatgevende golven.

<sup>7</sup> De Rijkoort-Weibull-verdeling is iets anders dan de conditionele Weibull-verdeling.

## 7.4.2 Toets- en rekenpeilen

De HR bestaan onder andere uit maatgevende waterstanden, de zogenaamde toets- en rekenpeilen. Daarnaast kennen we basispeilen en ontwerppeilen. Ter verduidelijking volgt een lijst met definities voor diverse peilen, overgenomen uit Dillingh en Rego (2010). Alle peilen zijn gedefinieerd voor een bepaald jaar.

**Basispeil (jaartal):** Extreem hoge waterstand in het getijdegebied met een overschrijdingsfrequentie van 1/10,000 per jaar, afgeleid voor het genoemde jaartal.

**Ontwerppeil (jaartal):** Extreem hoge waterstand in het getijdegebied met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de voor het betreffende dijkvak gestelde wettelijke norm, afgeleid voor het genoemde jaartal. Het ontwerppeil vormt het uitgangspunt voor de verbetering van een primaire waterkering aan het begin van de planperiode.

**Toetspeil (jaartal):** De waterstand behorend bij de normfrequentie van de betreffende waterkering, die bij de toetsing wordt gebruikt, afgeleid voor het genoemde jaartal. In het getijdegebied is het toetspeil gelijk aan het ontwerppeil na correctie voor de stijging van het gemiddelde hoogwater tot het einde van de betreffende toetsperiode.

**Rekenpeil (jaartal):** De rekenwaarde voor de waterstand bij het toetsen van duinen, die wordt gevonden door bij het toetspeil twee-derde van de decimeringshoogte op te tellen, afgeleid voor het genoemde jaartal.

**Decimeringshoogte:** Het absolute verschil in hoogte tussen het toetspeil en een waterstand met een overschrijdingsfrequentie, die 10 keer zo klein is als die van het toetspeil.

Begin negentiger jaren van de vorige eeuw zijn de basispeilen opnieuw vastgesteld, nadat de Deltacommissie dat voor het eerst had gedaan in het "Rapport Deltacommissie" van 1960. Het hernieuwde onderzoek kan worden onderverdeeld in vier hoofdonderdelen:

- 1 het statistische onderzoek,
- 2 het fysische onderzoek,
- 3 het vaststellen van de basispeilen voor de hoofdstations,
- 4 de ruimtelijke verdeling van de basispeilen langs de kust en de overschrijdingslijnen voor de peilmeetstations.

De officieel vastgestelde basispeilen hebben betrekking op de toestand van 1985. De hoofdonderdelen zijn gerapporteerd in respectievelijk Dillingh et al. (1993), Philippart et al., (1993), Van Urk (1993), Philippart et al. (1995). Het statistische onderzoek was volledig gebaseerd op de extreme waarden theorie. Het fysische onderzoek had tot doel de samenhang tussen naburige stations in rekening te brengen. Op basis van het statistische en fysische onderzoek werden de basispeilen voor de hoofdstations, waarvan ook lange meetreeksen beschikbaar waren, bepaald. Tenslotte werden hieruit basispeilen en overschrijdingslijnen vastgesteld voor alle peilmeetstations door interpolatie en werden ontwerppeilen afgeleid voor alle waterkeringvakken.

Men zou ervoor kunnen kiezen elke zes jaar opnieuw basispeilen en overschrijdingslijnen af te leiden op grond van telkens verlengde datasets van waarnemingen, gecorrigeerd voor veranderingen in de hoogwaterstanden door zeespiegelstijging en getijverandering, conform het basispeilenonderzoek 1985. Een dergelijk onderzoek is echter omvangrijk en alleen zinvol wanneer de datasets aanzienlijk langer zijn dan bij het genoemde basispeilenonderzoek, de statistische kennis aanmerkelijk is toegenomen, of de kennis van het fysische proces (meteorologie en waterbeweging) sterk is verbeterd. Bovendien is het ongewenst uit oogpunt van continuïteit dat de hoogwaterstanden behorende bij de geldende norm voor een bepaalde dijkkring elke vijf jaar omhoog of omlaag bijgesteld moeten worden, afhankelijk van de uitkomst van de nieuwe statistische analyse. Om die reden is er tot nu toe (1996, 2001 en 2006) voor gekozen om de toetspeilen, waarop de bestaande waterkeringen getoetst worden, te baseren op de ontwerppeilen van 1985. Daarmee zijn de toetspeilen niets anders dan de op de stijging van het gemiddelde hoogwater geactualiseerde ontwerppeilen van 1985. Roscoe (2009a) heeft aangetoond dat het verlengen van de tijdreeksen geen significant effect hebben op de basispeilen ten opzichte van de reeksen tot 1985. Het advies luidt om de basispeilen van 1985 als uitgangspunt te nemen voor de huidige toetsronde.

De toetspeilen moeten dan nog wel geactualiseerd worden voor de stijging van het gemiddelde hoogwater ten opzichte van de ontwerppeilen van 1985. Als richtjaar voor de HR2011 is daarbij gekozen voor de peildatum van 2017. Naast toetspeilen dienen ook rekenpeilen te worden bepaald voor het toetsen van duinvakken. Het berekenen van de toets- en rekenpeilen voor de HR2011 is uitgebreid beschreven in Dillingh en Rego (2010). De onderstaande werkwijze is gevolgd:

- Uitgangspunt zijn de niet afgeronde ontwerppeilen 1985. Deze zijn beschikbaar voor alle locaties langs de Nederlandse Kust.
- Bij deze ontwerppeilen wordt de niet afgeronde lokale stijging van het gemiddelde hoogwater over de periode 1985-2017 opgeteld. De toename bestaat uit een autonome hoogwaterstijging, NAP correctie en een eventuele stijging ten gevolge van menselijk ingrijpen, de zogenaamde antropogene effecten. Dit leidt tot de toetspeilen (2017).
- Voor de duinen wordt hierbij 2/3 van de onafgeronde decimeringshoogte opgeteld. Hiertoe zijn de onafgeronde decimeringshoogtes bepaald, uitgaande van de GPD methode op 31 peilmeetstations. Dit resulteert in de rekenpeilen (2017).
- Vanwege het uitgangspunt dat de nieuwe toets- en rekenpeilen niet lager mogen zijn dan de oude is een "bijzondere opslag" geïntroduceerd, die zorgt dat de op 10 cm afgeronde waarden tenminste op de waarden uit de HR2006 uitkomen.

De stijging van het gemiddelde hoogwater vergt nadere uitleg. Voor 23 meetlocaties (zie Paragraaf 6.2.1) zijn trends bepaald op data van de jaargemiddelde hoogwaterstanden t/m 2008. De meetreeksen beginnen veelal in de tweede helft van de 19e eeuw, maar dat verschilt per station. De meeste trends zijn bepaald met een zogenaamde Whittaker smoother ('gladstrijker') of Penalized Sum of Squares-methode (PSS). Er zijn vijf uitzonderingen (Cadzand, Harlingen, Hoek van Holland, Nieuwe Statenzijl, Petten Zuid) die gebruik maken van lineaire regressie. De PSS methode bleek robuuster en geschikter dan de Singuliere Spectrum Analyse (SSA) die is toegepast voor de HR2006.

De waarde van de autonome hoogwaterstijging voor 2017 wordt geschat door aan te nemen dat de gemiddelde stijging tussen 1985 en 2008 zich voortzet tot 2017. De toeslag voor hoogwaterstijging wordt per station bepaald door het verschil tussen de berekende trendwaarden voor 2017 en 1985. Voor de daadwerkelijk toe te passen toeslagen worden de

geschatte toeslagen per peilmeetstation uitgezet langs de kustlijn of as van een estuarium. Daarbij wordt een aantal takken onderscheiden overeenkomstig de HR2006. Destijds is een regressielijn toegepast om de toeslag voor iedere locatie langs de kust te kunnen bepalen. Nu is een gemiddelde toeslag per deelgebied gekozen op basis van de geschatte toeslagen per peilstation. De berekende toeslagen voor de autonome hoogwaterstijging langs de Noordzeekust en het Waddengebied bedragen 8 cm, en voor de Eems-Dollard 7 cm. In de Westerschelde is de toeslag 8 cm, maar ten oosten van Hansweert loopt hij lineair op tot 14 cm bij Bath.

Er wordt ook rekening gehouden met het effect van antropogene ingrepen die na 1985 hebben plaatsgevonden en nog niet zijn verwerkt of die nog uitgevoerd kunnen worden voor het einde van de toetsperiode 2011-2017. Het effect van de verruiming van de Westerschelde en de aanleg van de tweede Maasvlakte wordt verwaarloosbaar geacht. Het effect van de aanleg van het Emssperrwerk in 2002 – een stormvloedkering in de Eems in Duitsland - op het toetspeil in de Eems-Dollard kan echter niet verwaarloosd worden. Het effect is berekend op een graduele verhoging van het toetspeil van 0 cm voor de Eemsmonding tot 26 cm bij Nieuwe Statenzijl.

Naast een toeslag voor de stijging van het gemiddelde hoogwater vanaf 1985 is ook rekening gehouden met de gewijzigde NAP-hoogten volgens de NAP-publicatie in 2005 ([www.rdnap.nl](http://www.rdnap.nl)). Strikt genomen heeft een aanpassing van het referentievlak NAP geen invloed op de veiligheid, omdat de toets- en rekenpeilen en de hoogten van de waterkering er in gelijke mate door worden beïnvloed. Echter bij het berekenen van de toeslagen voor de stijging van het gemiddelde hoogwater over de periode 1985-2017 moet wel degelijk rekening worden gehouden met de wijziging van het NAP in 2005. Na het bijtellen van de berekende werkelijke verhoging bij het ontwerppeil van 1985 dient deze gesommeerde waarde weer gecorrigeerd te worden naar het NAP van na 2005. Hierdoor zou een verlaging van de peilen kunnen optreden. Om verwarring te voorkomen en met het oog op toekomstige zeespiegelstijging, is hier toch vanaf gezien en is er door de bijzondere opslag voor gezorgd dat de peilen getalsmatig niet omlaag gaan.

Voor de Oosterschelde zijn geen nieuwe toetspeilen afgeleid omdat deze bepaald worden door de sluitstrategie van de stormvloedkering in de Oosterschelde.

#### 7.4.3 Waterstandstatistiek voor Hydra-K en voor de duinen op de Waddeneilanden

De waterstandstatistiek voor Hydra-K en voor de duinen op de Waddeneilanden wordt vanuit praktisch oogpunt beschreven met een conditionele Weibull verdeling, zie Paragraaf 7.1. Ten behoeve van de consistentie is de windrichtings-afhankelijke statistiek vereffend, zodat na omrekening naar omnidirectionele statistiek de basispeilen zelf en de bijbehorende GPD-verdelingen over een groot bereik nauwkeurig worden gereproduceerd. De windrichtingsafhankelijke statistiek is dus mede gebaseerd op de omni-directionele statistiek.

De windrichtingsafhankelijkheid van de waterstandstatistiek voor het jaar 1985 is afgeleid uit meetreeksen van 16 jaar (1981 t/m 1996). Evenals de toetspeilen worden deze statistieken daarna steeds bijgewerkt op basis van de stijging van het gemiddelde hoogwater. Hier volgt een korte beschrijving van de drie stappen waarmee de windrichtingsafhankelijke waterstandstatistiek voor de twaalf meetlocaties (zie Paragraaf 6.2.2) destijds is afgeleid door Roskam et al. (2000), en de vierde stap hoe de statistiek vervolgens is bijgewerkt (door Dillingh en Rego (2010)).

- 1 De statistiek van de waterstand is in eerste instantie per windrichtingssector van  $30^\circ$  (die telkens  $10^\circ$  is doorgeschoven), afzonderlijk afgeleid met een conditionele Weibull verdeling. Voor de "landwind"-sector werd in verband met relatief weinig data uit deze sectoren, één sector toegepast van  $10^\circ$  tot  $220^\circ$ . De drempel en overschrijdingsfrequentie zijn gekozen op basis van visuele beoordeling. Het aantal geselecteerde maxima varieert per locatie tussen de 161 en 212. De vormparameter  $\alpha$  is op basis van een gevoeligheidsanalyse vastgesteld op 1,35 voor stations ten noorden van IJmuiden, en op 1,0 voor IJmuiden en zuidelijker. Alleen de schaalparameter  $\sigma$  is daarna gefit.
- 2 Vervolgens is per locatie een lopend gemiddelde (filter) over de windrichtingen toegepast. Daarmee zijn niet-significante verschillen tussen de richtingen weggewerkt, die veroorzaakt worden door toevalligheden.
- 3 Tenslotte is de windrichtingsafhankelijke statistiek voor niet-overlappende sectoren afgestemd op de omnidirectionele statistiek en, daarmee samenhangend, de basispeilen.
- 4 In Roskam et al. (2000) is de omnidirectionele statistiek van de hoogwaterstanden voor de toestand 1985 afgeleid. Door de stijging van de jaargemiddelde hoogwaterstanden horen bij de toestand van 2017 bij een bepaalde overschrijdingsfrequentie iets hogere waterstanden. De overschrijdingslijnen verschuiven als het ware naar hogere waterstanden. Die verschuiving is berekend als het verschil tussen het onafgeronde toetspeil voor 2017 en het onafgeronde ontwerppeil voor 1985. De drempelwaarde  $w$  is verhoogd met dit verschil, en de schaalparameter  $\sigma$  is enigszins aangepast op basis van een nieuwe fit aan de GPD. De vormparameters  $\alpha$  en de overschrijdingsfrequentie  $p$  van de drempelwaarde zijn ongewijzigd. In Dillingh en Rego (2010) is dit voor dertien stations gedaan, zie Tabel 7.2. Voor vijf (Huibergat, Den Helder, Harlingen, Lauwersoog, IJmuiden) van de dertien stations bleek de aldus afgeleide windrichtingsafhankelijke waterstandstatistiek identiek te zijn aan de waterstandstatistiek die voor HR2006 beschikbaar was. Voor Delfzijl, Den Oever, Hoek van Holland, Oosterschelde, Terschelling, Vlissingen, Texel Noordzee en Hansweert werden andere waarden gevonden. Dat is op het eerste gezicht wellicht verrassend, omdat de gemiddelde hoogwaterstanden overall een positieve trend laten zien. De (kleine) verschillen tussen HR2006 en HR2011 vallen echter weg door verschillende wijzen van het berekenen van de toeslagen voor de stijging van het gemiddelde hoogwater en door in rekening brengen van de gevolgen van de NAP-publicatie van 2005. Aangezien voor de Hollandse Kust en de Oosterschelde geen nieuwe HR zijn afgeleid, zijn de vernieuwde waterstandsstatistieken van Hoek van Holland en Oosterschelde niet in de Hydra-K versie opgenomen, waarmee de nieuwe HR zijn bepaald. Voor locaties Den Oever, Terschelling en Vlissingen zijn zowel de nieuwe als de oorspronkelijke waterstandsstatistieken opgenomen in Hydra-K. Dit omdat deze locaties voor meerdere regio's gebruikt worden. Zo wordt bijvoorbeeld de vernieuwde statistiek van Vlissingen wel voor de Westerschelde gebruikt, terwijl voor de Oosterschelde de oorspronkelijke waterstandsstatistiek wordt toegepast.

Tabel 7.2 Omni-directionele Weibull parameters voor de waterstand (bron: Hydra-K 3.6.3 m.u.v. Texel Noordzee)

	vorm parameter $\alpha$	schaal-parameter $\sigma$	drempelwaarde $\omega$	overschrijdings frequentie $\rho$	gelijk aan statistiek voor HR2006 (=Hydra-K 3.5.1)
Den Helder	1.60	0.9012	1.61	3.254	ja
Huibertgat	1.27	0.5357	1.87	5.781	ja
Delfzijl	1.91	1.692	2.40	4.660	nee
Terschelling	2.32	1.5015	1.90	3.320	ja t.b.v. Kust
Terschelling_A	2.32	1.4907	1.86	3.320	nee t.b.v. Wad
Lauwersoog	1.83	1.2515	2.12	6.139	ja
Harlingen	2.17	1.5718	2.09	5.715	ja
Den Oever	1.87	1.3046	1.88	3.638	ja t.b.v. Kust
Den Oever_A	1.87	1.2994	1.85	3.638	nee t.b.v. Wad
IJmuiden Bui.H.	0.63	0.0357	1.86	5.341	ja
Hoek van Holl.	0.57	0.0158	1.95	7.237	ja
OS11	0.98	0.2279	2.25	7.136	ja
Vlissingen	1.04	0.2796	2.97	3.907	ja t.b.v. O'schelde
Vlissingen_A	1.04	0.2795	2.95	3.907	nee t.b.v. W'schelde
Hansweert	0.87	0.1558	3.37	3.845	nee
Texel Noordzee t.b.v. HR duinen	1.68	0.917	1.61	3.706	n.v.t.

## 7.5 Golfstatistiek

### 7.5.1 Inleiding

De golfstatistiek is geactualiseerd ten opzichte van de HR2006 (zie Roscoe, 2009b). Het type verdelingsfunctie – conditionele Weibull – is niet gewijzigd, maar de meetreeksen zijn met zes jaar verlengd en beslaan nu de periode 1979-2008. Met het matlabprogramma Golfstat (Weerts en Diermanse, 2004b) zijn nieuwe Weibull parameters afgeleid.

Er zijn negen golfmeetlocaties op de Noordzee met lange meetreeksen waarvoor de statistiek is bepaald. De statistieken van vijf daarvan, te weten Schiermonnikoog Noord, Eierlandse Gat, Scheur West, IJmuiden munitiestort en Europlatform worden gebruikt bij het afleiden van de HR. De andere vier stations hebben wel een rol gespeeld bij het zo goed mogelijk schatten van de parameters van de verdelingen middels een RFA (regional frequency analysis). Alleen de statistieken van de drie eerstgenoemde locaties worden gebruikt voor de Waddenzee en de Westerschelde.

Voor de golven is zowel windrichtingsafhankelijke als omnidirectionele statistiek opgesteld. De beschouwde golfparameters zijn golfhoogte  $H_{m0}$ , gemiddelde periode  $T_{m-1,0}$  en piekperiode  $T_p$ . Golfhoogte en golfperiode  $T_{m-1,0}$  zijn bepaald op het frequentiebereik 0.03 Hz - 0.50 Hz.

Voor de Westerschelde en de Waddenzee wordt de golfstatistiek binnen Hydra-K alleen gebruikt voor het afleiden van de offshore golfrandvoorwaarden van de SWAN berekeningen (zie Hoofdstuk 8).

### 7.5.2 Omni-directionele golfstatistiek

In Caires (2007) is onderzoek gedaan naar het toepassen van de Generalized Pareto distribution (GPD) en in Roscoe (2009b) zijn GPD en CWD verdelingen gebruikt om de nieuwe golfstatistiek af te leiden. Er is uiteindelijk gekozen voor de conditionele Weibull verdeling (zoals aanbevolen in Roscoe, 2009b). In paragraaf 6.5 is beschreven hoe de maxima geselecteerd zijn. Voor het afleiden van de statistiek worden vervolgens per meetlocatie en per golfparameter de volgende stappen doorlopen:

- 1 Bepaal de drempelwaarde, ofwel de waarde waarboven de stormmaxima meegenomen worden in de fit.
- 2 Bepaal de parameters  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\omega$  en  $\rho$  van de conditionele Weibull verdeling die het best de overschrijdingsfrequenties van de geselecteerde maxima weergeven, op basis van maximum likelihood methode.
- 3 Pas MRFA (modified regional frequency analysis) toe op de vormparameter  $\alpha$  en bepaal daarmee de nieuwe vormparameter. Het idee achter RFA is dat als de tijdseries relatief kort zijn en daardoor de extrapolatie minder zeker, de tijdseries van verschillende locaties binnen een homogeen gebied gecombineerd kunnen worden. Dit vergroot de hoeveelheid data in de fitprocedure en zorgt daarmee dat eventuele uitschieters minder gewicht krijgen. Aangezien het gebied van de beschouwde golflocaties niet homogeen is, wordt de *modified* RFA toegepast, die rekening houdt met fysische verschillen. Overigens wordt de MRFA toegepast op alle golfparameters ( $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{m-1,0}$  en ook  $T_{m02}$ ) en alle locaties samen. De MRFA is beschreven in Den Heijer et al. (2005) en is ook gebruikt voor de HR2006, zie ook Den Heijer et al. (2007) en Weerts en Diermanse (2004b).
- 4 Herzien de overige Weibull parameters nu de vormparameter  $\alpha$  is aangepast. Het aantal stormmaxima is vastgelegd op 200. Daarmee is ook de frequentie  $\omega$  vastgelegd, en wordt alleen de schaalparameter  $\sigma$  gefit.
- 5 Bereken aan de hand van de conditionele Weibull verdeling met de gevonden parameters de extreme golfparameters bij de gewenste herhalingstijd.

De methode is in detail beschreven in Roscoe (2009b). De resultaten voor extreme golven met herhalingstijd van 10.000 jaar zijn weergegeven in onderstaande tabellen. Het verlengen van de tijdreeksen tot en met 2008 leidt tot hogere extreme golfhoogtes bij de noordelijke locaties SON (+0.73 m), K13 en YM6 en lagere waarden voor de zuidelijke stations (de maximale verlaging is 0.41 m, bij Europlatform). Ook voor de golfperiode  $T_{m-1,0}$  leidt verlenging tot verhoging in het noorden (1.0 s bij SON) en verlaging in het zuiden (-0.1 s bij SWB). De piekperiode  $T_p$  neemt vrijwel overal aanzienlijk toe (tot maximaal 1.75 s bij SON), uitgezonderd SCW (-0.15 s). De hogere waarden voor de geëxtrapoleerde extreme golven in het noorden zijn het gevolg van enkele zware stormen die daar in de periode 2003-2008 zijn opgetreden.

Tabel 7.3 Extreme diep water golven met een herhalingsstijd van 10.000 jaar, gebaseerd op meetreeksen 1979-2002 (gebruikt voor HR2006) en op meetreeksen 1979-2008 (gebruikt voor Waddenzee en Westerschelde t.b.v. HR2011); overgenomen uit Roscoe (2009b).

	1979-2002			1979-2008			verschil		
	$H_{m0}$ [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_p$ [s]	$H_{m0}$ [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_p$ [s]	$\Delta H_{m0}$ [m]	$\Delta T_{m-1,0}$ [s]	$\Delta T_p$ [s]
SON	10.98	16.38	19.88	11.71	17.36	21.63	<b>0.73</b>	<b>0.98</b>	<b>1.75</b>
ELD	11.06	14.47	17.02	11.05	15.05	18.57	-0.01	<b>0.58</b>	<b>1.55</b>
K13	10.52	14.62	16.86	10.67	15.31	18.30	<b>0.15</b>	<b>0.69</b>	<b>1.44</b>
YM6	9.32	13.96	16.15	9.34	14.53	17.39	<b>0.02</b>	<b>0.57</b>	<b>1.24</b>
MPN	7.95	12.73	15.31	7.81	12.91	15.96	-0.14	<b>0.18</b>	<b>0.65</b>
EUR	8.18	11.30	12.74	7.77	11.30	13.14	-0.41	0.00	<b>0.40</b>
LEG	8.07	11.16	12.91	7.72	11.18	13.39	-0.35	<b>0.02</b>	<b>0.48</b>
SWB	7.06	10.82	12.37	6.77	10.72	12.56	-0.29	-0.10	<b>0.19</b>
SCW	5.70	10.59	12.35	5.46	10.50	12.20	-0.24	-0.09	-0.15

### 7.5.3 Windrichtingsafhankelijke golfstatistiek

De golfstatistiek per richtingssector wordt alleen gebruikt voor de Hollandse Kust, omdat daar de offshore spectrale golfperiode als stochast wordt gebruikt. Voor de HR2011 zijn voor de Hollandse Kust geen nieuwe HR berekend. Eigenlijk kunnen we daarom volstaan met een verwijzing naar Den Heijer et al. (2007), maar voor de volledigheid beschrijven we hier hoe de golfstatistiek per richtingssector wordt bepaald. Omdat op slechts zes van de negen meetstations de golfrichting wordt gemeten, wordt niet de golfrichting maar de windrichting gebruikt voor de sectorindeling. Ook voor de richtingsafhankelijke statistiek wordt gebruik gemaakt van de conditionele Weibull verdeling (vergelijking (7.1)). De meetreeksen zijn t.o.v. de HR2006 verlengd en beslaan de periode 1979-2008. Verder is de methode identiek aan de methode die gebruikt is voor de HR2006 met als enige verschil dat de  $T_{m02}$  niet is gebruikt in de MRFA.

Per locatie en per golfparameter zijn de volgende stappen doorlopen:

- 1 Selectie van maxima boven een drempelwaarde per windrichting. De eisen voor de stormselectie zijn identiek aan die voor de omni-directionele selectie. Het enige verschil is dat er bij de richtingsafhankelijke selectie geen filtering wordt toegepast (zie Paragraaf 6.5).
- 2 Per windrichtingssector is een conditionele Weibull verdeling afgeleid, gebruik makend van de omni-directionele vormparameter  $\alpha$  die is bepaald na toepassing van de MRFA (zie Paragraaf 7.5.2). Dit betekent dat alleen de schaalparameter  $\sigma$  onafhankelijk per station is gefit.
- 3 De herhalingsstijden en de kwantielen (waarden bij bepaalde kansen van voorkomen) van elke sector zijn gecorrigeerd opdat het geheel in overeenstemming is met de omnidirectionele statistiek. Vervolgens wordt opnieuw voor elke sector de Weibull-verdeling afgeleid zodat deze de gecorrigeerde kwantielen oplevert.



- 4 De invloed van de verlengde tijdreeksen op de extreme golfparameters met kansen van 1/10.000 per jaar, verschilt per richting. Voor sommige richtingssectoren nemen de extreme waarden toe, in andere af. Over het algemeen komen de veranderingen in de omni-directionele analyse aardig overeen met de veranderingen in de sectoren met de grootste golven. De trend is dat voor de noordelijke stations de extreme waarden toenemen met de verlengde tijdseries, vanwege een aantal zware stormen dat daar in de periode 2003-2008 is opgetreden.



## 8 Berekening van waterstand en golven op kustlocaties

### 8.1 Inleiding

Voor het bepalen van de HR zijn de condities nabij de kering van belang. Voor harde keringen dienen de HR nabij de teen van de dijk gegeven te worden, voor duinen op een representatieve locatie nabij de kust maar buiten het afslagprofiel.

De golfcondities nabij de kust zijn afhankelijk van de offshore golfcondities, de waterstand en de wind. De offshore golfcondities worden gekoppeld aan de wind. Daarna zorgt een SWAN model voor de vertaling van wind en waterstand naar golven nabij de kust. Dit wordt beschreven in Paragraaf 8.3.

Ook voor de waterstanden moet een vertaling gemaakt worden van de meetlocaties naar de gehele kust. Dit wordt beschreven in Paragraaf 8.2. De overige paragrafen hebben alle betrekking op de vertaling van de golven naar de kust.

### 8.2 Berekening van waterstanden op kustlocaties

De waterstand op een willekeurige plaats langs de kust is uiteraard niet geheel gelijk aan die in een van de waterstandsmeeetstations. Daarom wordt voor een gegeven herhalingstijd een interpolatie uitgevoerd tussen de waterstanden in nabijgelegen meetstations. De diverse regio's (Westerschelde, Oosterschelde, Zeeuwse en Hollandse kust, Waddenzee) zijn onderverdeeld in deelgebieden. Binnen één deelgebied wordt de waterstand berekend op basis van dezelfde drie meetstations ("steunpunten").

De keuze van de drie steunpunten wordt mede bepaald door de wens om het verloop van de basispeilen zo goed mogelijk te reproduceren. In een aantal gevallen is daarbij gebruik gemaakt van zogenaamde virtuele stations. Een overzicht van de steunpunten in de Waddenzee en Westerschelde is gegeven in Tabel 8.1.

Tabel 8.1 Steunpunten voor transformatie offshore waterstand (gebaseerd op: Nicolai, 2010)

	steunpunten voor transformatie offshore waterstand		
Waddenzee	Den Helder	Den Oever Buiten	Terschelling West
	Den Helder	virtueel Den Helder.0	virtueel Den Helder.270
	Harlingen	Den Oever Buiten	Terschelling West
	Harlingen	Lauwersoog	Terschelling West
	Huibertgat	Lauwersoog	Terschelling West
	Lauwersoog	Delfzijl	Huibertgat
Westerschelde	Vlissingen	Hansweert	virtueel Vlissingen.300

De interpolatie van de waterstand wordt binnen Hydra-K uitgevoerd en bestaat uit drie stappen (zie ook van Marle et al., 2007):

1. Bepalen van de waterstand in de drie steunpunten;

Voor een gegeven overschrijdingsfrequentie wordt de waterstand op de steunpunten bepaald uit hun marginale verdelingsfuncties.

- 2 Interpolatie tussen de steunpunten;  
Tussen de waterstanden in de drie steunpunten wordt een lineaire driehoeksinterpolatie toegepast om de waterstand aan de teen van de dijk te berekenen. In HKV (2010b) is beschreven welke steunpunten voor welke locaties worden gebruikt.
- 3 Correctie voor verschillen met het toetspeil.  
Als de bovenstaande berekening wordt uitgevoerd voor de normfrequentie op de betreffende locatie, dan hoort de berekende waterstand in theorie gelijk te zijn aan het toetspeil. In de praktijk kunnen echter kleine verschillen ontstaan omdat het toetspeil niet op een lineaire interpolatie maar op een fysisch gebaseerde interpolatie is gestoeld. Daarom wordt in de rekenprocedure een correctie toegepast opdat de waterstand bij de normfrequentie gelijk is aan het toetspeil.

### 8.3 Methode voor de berekening golven op kustlocaties

De vertaling van wind en waterstand naar golven bij de teen van de dijk vindt plaats op basis van een SWAN-model voor golfgroei en propagatie. Om rekentijd te besparen wordt daarbij gebruik gemaakt van een database met vooraf uitgevoerde modelberekeningen voor verschillende combinaties van wind en waterstand. Bij de probabilistische berekening wordt deze database gebruikt als een transformatiematrix voor waterstand en wind naar golfcondities nabij de kust. Voor de harde keringen is de kustlocatie van te voren gedefinieerd. Voor de duinen is die locatie niet op voorhand te geven. Daarom worden de golfparameters op raaien loodrecht op de kust berekend uit ruimtelijke velden van de relevante golfparameters en wordt later pas gekeken welke uitvoerlocatie op de raai het meest geschikt is. Voor de leesbaarheid gaan we uit van de uitvoerlocaties van de harde keringen.

Voor HR2011 zijn alleen voor de Waddenzee en de Westerschelde nieuwe golfbrandvoorwaarden bepaald. Deze paragraaf richt zich dan ook alleen op die gebieden. Voor de vertaling naar ondiep water golven in de overige gebieden wordt verwezen naar Den Heijer et al. (2007). De voor de Waddenzee en Westerschelde gevolgde methode is anders dan de voor de HR2006 gebruikte methode omdat nu ook rekening gehouden wordt met stroming en het verloop van een storm in de tijd.

De transformatiematrix is eigenlijk een discrete overdrachtsfunctie die voor elke uitvoerlocatie langs de kering de lokale golfparameters geeft als functie van de windsnelheid, windrichting en waterstand. De golfperiode wordt voor de Waddenzee en de Westerschelde als volledig afhankelijke variabele van de wind beschouwd, in tegenstelling tot de Hollandse Kust. De waarden in de transformatiematrix zijn berekend met 1800 SWAN simulaties per gebied (Waddenzee en Westerschelde). De SWAN simulaties worden nader beschreven in Paragraaf 8.4.

Voor gesloten of half-open bassins als de Waddenzee en de Westerschelde speelt het verloop in de tijd van de windsnelheid en windrichting een grote rol. Diverse opties zijn onderzocht om deze dynamiek in het HR instrumentarium te verdisconteren (zie Beckers et al., 2009). Omdat aanpassingen binnen Hydra-K, in de vorm van extra stochasten, niet haalbaar worden geacht binnen het tijdsbestek van het project WTI-2011, is ervoor gekozen

de dynamica geheel in de transformatiematrix te verdisconteren. Dit vergt een aanpassing aan de wijze waarop de invoer van Hydra-K wordt bepaald, maar niet aan Hydra-K zelf.

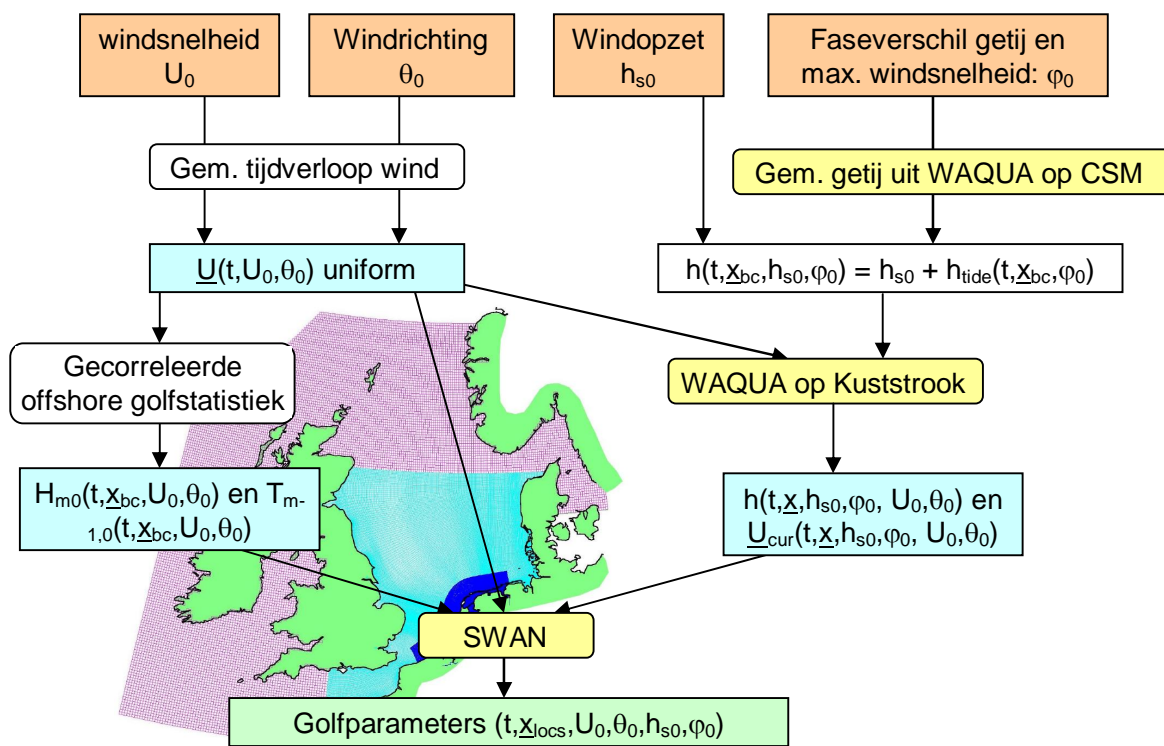
Daarnaast is o.a. in Groeneweg et al. (2008) aangetoond dat stromingen een groot effect hebben op de golfcondities nabij de waterkeringen. Omdat stroming zowel door wind als getij wordt bepaald is de waterstand opgesplitst in getij en windopzet.

In de probabilistische aanpak zijn variaties rondom de basiswaarden voor wind en waterstand aangebracht door een schematisch tijdverloop van de windsnelheid en windrichting te beschouwen, gecombineerd met drie verschillende fases van het (gemiddeld) astronomisch getij. Toepassing van WAQUA en SWAN levert dan de waterstand en golfcondities op nearshore locaties bij diverse combinaties van wind en waterstand. Idealiter zouden alleen die combinaties moeten worden gekozen die tot een maximale belasting leiden. Dit zou voor ieder faalmechanisme tot een andere 'vertaalmatrix' leiden. Dit is praktisch niet haalbaar en daarom is gekozen voor een vertaalmatrix op basis van een aantal tijdstippen rond de piek van de storm (het moment van hoogste windsnelheid). Deze kunnen gezien worden als realisaties van wind, waterstand en golven tijdens een karakteristieke stormgebeurtenis, waarbij bedacht moet worden dat verschillende fases in de storm en in het getij kunnen leiden tot eenzelfde waterstand en golfconditie. De resultaten worden geïnterpoleerd naar de oorspronkelijke basiswaarden van wind en waterstand. Deze aanpak zorgt ervoor dat er geen aanpassingen aan Hydra-K noodzakelijk zijn. Voor details over de interpolatieprocedure wordt verwezen naar Nicolai et al. (2011).

De transformatiematrix wordt samengesteld uit resultaten van WAQUA en SWAN berekeningen voor diverse combinaties van windsnelheid, windrichting, windopzet en faseverschil tussen maximale windsnelheid en getij. De volgende stappen worden gevolgd:

- 1 Bepaal een gemiddeld tijdsverloop van windsnelheid en windrichting (zie Lopez de la Cruz, 2010), aangevuld met de transformatie van potentiële wind naar open-water wind (zie Par. 8.4.4.1).
- 2 Bepaal voor alle combinaties van de stochastwaarden voor windsnelheid en windrichting een windveld ter grootte van het SWAN model (zie Par. 8.4.4.1).
- 3 Bepaal het astronomisch getij op de rand van het Kuststrook rooster op basis van WAQUA berekeningen op het CSM en ZUNO rooster (zie Par. 8.4.4.2).
- 4 Bepaal het waterstand- en stromingsveld voor iedere combinatie van (uniforme) windopzet, verschil in fase tussen getij en maximale windsnelheid en de in stap 2 geconstrueerde windvelden aan de hand van een WAQUA berekening op het Kuststrookmodel (zie Par. 8.4.4.2).
- 5 Bepaal de offshore golftrandvoorwaarden voor SWAN berekeningen op basis van met wind gecorreleerde golfcondities op offshore meetlocaties (zie Par. 8.4.3).
- 6 Voer een stationaire SWAN berekening uit voor elke in stap 4 genoemde combinatie met het daarbij horende waterstand- en stromingsveld en de offshore golftrandvoorwaarden uit stap 5. De SWAN berekeningen worden uitgevoerd op vijf tijdstippen rond de piek van de storm (-2, -1, 0, 1 en 2 uur ten opzichte van het moment van de hoogste windsnelheid), zie Par 8.4.6 en 8.4.7.
- 7 Interpoleer per oeverlocatie de SWAN resultaten naar oorspronkelijke basiswaarden van windsnelheid, windrichting, waterstand.

De stappen 1-6 zijn schematisch weergegeven in Figuur 8.1.



Figuur 8.1 Schematische weergave van bepaling transformatiematrix ( $U_{10}$ : windsnelheid,  $\theta_w$ : windrichting,  $h_{s0}$ : offshore windopzet,  $\varphi_0$ : faseverschil tussen getij en moment van maximale windsnelheid,  $h$  waterstand,  $U_{cur}$ : stroomsnelheid,  $U$ : windsnelheid,  $H_{m0}$ : significante golfhoogte,  $T_{m-1,0}$ : spectrale golfperiode,  $x_{bc}$ : locaties op rand van Kuststrookmodel of Waddenmodel)

Het resultaat van deze zeven stappen is per oeverlocatie ( $x_{locs}$ ) een verzameling golfparameters als functie van de lokale (op het beschouwde tijdstip) waterstand, potentiële windsnelheid en windrichting.

De simulaties worden gekarakteriseerd door alle combinaties van de waarden uit Tabel 8.2. Een groter aantal waarden leidt in principe tot een hogere nauwkeurigheid. Het aantal waarden kan echter niet willekeurig groot worden genomen, omdat daarmee het aantal berekeningen en dus de totale rekestijd erg groot wordt. De resolutie van de tabelwaarden is dus een compromis tussen vereiste nauwkeurigheid en mogelijke doorlooptijd. In Gautier en Groeneweg (2009) is gebleken dat met de genoemde labelwaarden het gewenste bereik van de Hydra-K matrix wordt afgedekt en dat voldoende combinaties van wind en waterstand worden verkregen.

Tabel 8.2 Labelwaarden voor variabelen windsnelheid, windrichting, windopzet en het faseverschil tussen getij en windopzet, waarvoor voor elke combinatie SWAN berekeningen worden uitgevoerd op de Waddenzee en Westerschelde.

Potentiële wind snelheid tijdens stormpiek [m/s]	Wind- richting [°N]	Windopzet [m + NAP]	Faseverschil tussen getij en max. windsnelheid [uur]	Tijdstip t.o.v. piek van de storm [uren]
20	0	0	0	-2
25	90	2	4	-1
30	180	4	8	0
35	210			1
40	240			2
	270			
	300			
	330			

De piekwindsnelheden betreffen de potentiële windsnelheden op de piek van de storm (T=0 uur ofwel T03). In Lopez de la Cruz (2010) is een gemiddeld stormverloop afgeleid. Het stormverloop wordt ook gekenmerkt door een draaiing van de wind in de tijd. Deze draaiing is mede afhankelijk van de hoofdwindrichting. Omdat het niet op elke locatie op hetzelfde moment hoogwater is, worden drie faseverschillen tussen piekwindsnelheid en hoogwater op een referentielocatie beschouwd.

De waterstandsvelden – en ook de stromingsvelden – die in SWAN worden opgelegd zijn het resultaat van WAQUA Kuststrook-fijn berekeningen, zie Rego (2010). In die berekeningen is naast een representatief getij ook een uniforme stormopzet S op de rand van het model opgelegd. Deze opzet bedraagt 0, 2 of 4 m + NAP. In die WAQUA berekeningen zijn dezelfde tijdsafhankelijke windvelden toegepast als in de SWAN berekeningen.

De resultaten van alle SWAN berekeningen zijn grondig gecontroleerd en vervolgens geïnterpoleerd naar een regulier rooster van de stochasten windsnelheid, windrichting en waterstand. De controle en interpolatie en daaropvolgende hercontrole heeft ertoe geleid dat voor de Waddenzee 38 van de 1395 oorspronkelijke uitvoerlocaties als niet betrouwbaar zijn beoordeeld en voor de Westerschelde 1 van de 757 uitvoerlocaties. Met uitzondering van deze locaties zijn de resultaten op alle andere uitvoerlocaties opgenomen in de database KustDB2011. De KustDB2011 is niet direct gekoppeld aan Hydra-K, maar wordt gebruikt voor het aanmaken van Hydra-K databases. Nadere details over de interpolatie en de controle zijn te vinden in Nicolai et al. (2011).

## 8.4 SWAN simulaties

### 8.4.1 Inleiding

Deze sectie richt zich alleen op de Westerschelde en de Waddenzee omdat dit de gebieden zijn waarvoor nieuwe SWAN simulaties zijn uitgevoerd voor de HR2011. Voor de overige gebieden wordt verwezen naar Den Heijer et al. (2007).

## 8.4.2 Het SWAN golfmodel en de instellingen

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) is een numeriek golfmodel, ontwikkeld door de TU Delft, zie bijvoorbeeld Booij et al. (1999), de gebruikershandleiding (SWAN user manual, 2010) en de website (<http://www.swan.tudelft.nl/>). Voor de HR2006 is SWAN reeds ingezet voor de Hollandse Kust. Het model wordt wereldwijd gebruikt en is algemeen geaccepteerd als state-of-the-art golfmodel.

De berekeningen voor de Westerschelde en het Waddengebied zijn in stationaire modus uitgevoerd op kromlijnjige roosters. De fysische en numerieke instellingen van het SWAN modelinstrumentarium zijn geleverd door Gautier en Groeneweg (2009), gebaseerd op een uitgebreide calibratie en validatie met de focus op de Waddenzee door Gautier (2010) en een aanvullende verificatie voor de Westerschelde (Witteveen en Bos, 2010; Van der Westhuysen en Elias, 2010).

De volgende processen zijn in de SWAN berekeningen meegenomen:

- Golfgroei door wind
- Breking ten gevolge van een te grote golfsteilheid (whitecapping)
- Breking ten gevolge van een beperkte diepte
- Dissipatie bij een negatieve stroomsnelheidsgradient in de golfrichting
- Bodemwrijving
- Triad golfinteracties
- Quadruplet golfinteracties

Processen die niet meegenomen zijn in de SWAN berekeningen zijn:

- Diffractie
- Reflectie
- Golfopzet in de brekerzone

Bovendien zijn er geen obstakels (bv. golfbreker, havendam) toegepast in de SWAN berekeningen.

De fysische instellingen in de SWAN invoerbestanden zijn zowel voor de Waddenzee als voor de Westerschelde, als volgt:

```
GEN3 WESTH
WCAP WESTH cds2=5.0e-05 br=0.00175 p0=4.0 powst=0.0 powk=0.0 &
      nldisp=0.0 cds3=0.8 powfsh=1.0
QUAD iquad=2 lambda=0.25 Cn14=3.0e+07
LIMITER ursell=10.0 qb=1.0
FRIC JONSWAP cfjon=0.0380000
BREA WESTH alpha=0.96 pown=2.5 bref=-1.39630 shfac=500.0
TRIAD trfac=0.1 cutfr=2.5
```

De oplossing in SWAN wordt iteratief bepaald. De berekening stopt wanneer aan een convergentie criterium is voldaan dat is gebaseerd op de relatieve fouten in significante golfhoogte  $H_{m0}$  en spectrale golfperiode  $T_{m01}$  en de kromming (als functie van iteratieniveau) van  $H_{m0}$ . Maximaal worden voor de Waddenzee berekeningen 80 iteraties uitgevoerd. In de SWAN invoerbestanden ziet dit er als volgt uit:



```
NUM STOPC dabs=0.00 drel=0.01 curvat=0.001 npnts=99. STAT      &
mxitst=80 alfa=0.001
```

Voor de Westerschelde is er voor gekozen iedere berekening 80 iteraties uit te laten voeren. In bovenstaande invoerregel vergt dat de aanpassing: npnts=101.

Elke simulatie wordt uitgevoerd met een ruimtelijk uniforme windsnelheid en windrichting.

De waterstand en stroming zijn niet-uniform. Deze komen uit de eerder beschreven WAQUA berekeningen met het Kuststrookfijn model (Rego, 2010).

Naast een ruimtelijke discretisatie wordt in SWAN ook het spectrum gediscretiseerd, zowel in de richtings- als frequentieruimte. De richtingsruimte is verdeeld in 36 sectoren van elk 10°. Het frequentiedomein loopt van 0,015 Hz tot 1 Hz, en is in 45 bins verdeeld.

De productieberekeningen zijn uitgevoerd met een zogenaamde WTI versie van SWAN (versie 40.72ABCDE).

#### 8.4.3 Offshore golfrandvoorwaarden

Op de randen van het SWAN model worden golfrandvoorwaarden in de vorm van zogenaamde 1.5D-spectra (energiedichtheid, gemiddelde golfrichting en richtingsverspreiding als functie van frequentie) toegepast. Deze spectra moeten passen bij de opgelegde windsnelheid en -richting. Met het onderdeel “diepwaterrandvoorwaarden” binnen Hydra-K zijn de offshore significante golfhoogte  $H_{m0}$ , spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  en de piekperiode  $T_p$  berekend met de grootste kans van optreden, gegeven de windrichting en -snelheid, zie Stijnen en Kallen (2010). Dit is gedaan voor de locaties Eierland (ELD), IJmuiden munitiestort (YM6), Europlatform (EUR), Schiermonnikoog (SON) en Scheur West (SCW). De offshore golven voor de locatie Eierland zijn tweemaal bepaald, een keer voor het noordelijk deel van de kust, en een keer voor de westelijke Wadden, gebaseerd op verschillende sets metingen, zie Tabel 6.2.

Het blijkt niet verstandig om deze offshore golfrandvoorwaarden direct op de rand van het SWAN model toe te passen. De afstand van de meetlocaties waar de statistiek op gebaseerd is tot de modelrand is groot en de waterdiepte kan sterk verschillen. Bijvoorbeeld als gevolg van windgroei over het resterende deel kunnen de golven op de modelrand anders zijn dan op de meetlocaties.

Om bovenstaand probleem te voorkomen zijn voor alle combinaties van windsnelheid en -richting door middel van SWAN-berekeningen op het grootschalige ZUNO-rooster van de zuidelijke Noordzee, de golfrandvoorwaarden bepaald ter plaatse van de lokale SWAN-roosters voor respectievelijk de Westerschelde en de Waddenzee. Echter, de resultaten van die berekeningen op het ZUNO-rooster zullen ter plaatse van de meetlocaties niet identiek zijn aan de tot doel gestelde diepwater golfrandvoorwaarden die door Stijnen en Kallen (2010) zijn bepaald. Voor het verschil tussen de SWAN resultaten op het ZUNO-rooster en de doelwaarden wordt gecorrigeerd in de randvoorwaarden die gebruikt zijn voor de SWAN berekeningen voor de Westerschelde respectievelijk de Waddenzee. Samengevat zijn de volgende vier stappen doorlopen voor elke combinatie van windrichting, windsnelheid en waterstandsopzet (in dit geval voor de Waddenzee):

- 1 Met een SWAN-berekening op het ZUNO-rooster worden de 1.5D-spectra ter plaatse van SON, ELD en de modelrand van het Waddenrooster bepaald.
- 2 De verhouding wordt berekend tussen enerzijds de tot doel gestelde en anderzijds de door SWAN berekende golfparameters  $H_{m0}$  and  $T_{m-1,0}$  ter plaatse van SON en ELD.
- 3 De door SWAN berekende energiespectra ter plaatse van de modelrand van het Waddenrooster worden gecorrigeerd op basis van stap 2. Qua richting worden de spectra niet aangepast.
- 4 De gecorrigeerde 1.5D-spectra worden toegepast op randen van het Waddenrooster.

De correctiefactoren worden bepaald door de golfhoogte  $H_{m0}$  en de periode  $T_{m-1,0}$  ter plaatse van de meetlocaties, berekend met het SWAN-ZUNO model te vergelijken met de tot doel gestelde waarden (aangegeven met superscript “\*”) die volgen uit de statistische analyse:

$$H_{m0}^* = \gamma \cdot H_{m0} \quad \& \quad T_{m-1,0}^* = \delta \cdot T_{m-1,0} \quad (8.1)$$

De relatie tussen gemeten en berekende golfhoogte en periode kan vertaald worden naar twee factoren  $\alpha$  and  $\beta$ , die de correctie op het energie-frequentie spectrum  $E(f)$  weergeven:

$$E^*(f) = \alpha E(\beta f) \quad (8.2)$$

met

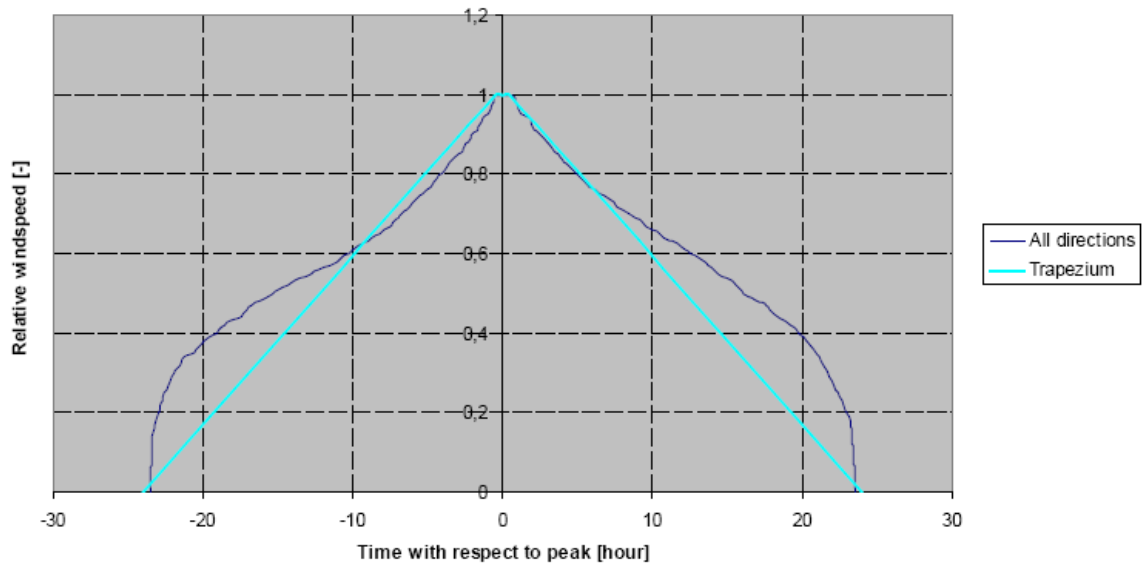
$$\beta = \delta \quad \& \quad \alpha = \delta \cdot \gamma^2 \quad (8.3)$$

De gecorrigeerde 1D-spectra die als randvoorwaarden worden gebruikt zijn eigenlijk 1.5D-spectra en bevatten de golfenergie en hoofdrichting per frequentie. De diepwaterranden van het SWAN model van Waddenzee en Westerschelde worden in segmenten verdeeld en er worden verschillende spectra opgelegd, waartussen SWAN ruimtelijk interpoleert.

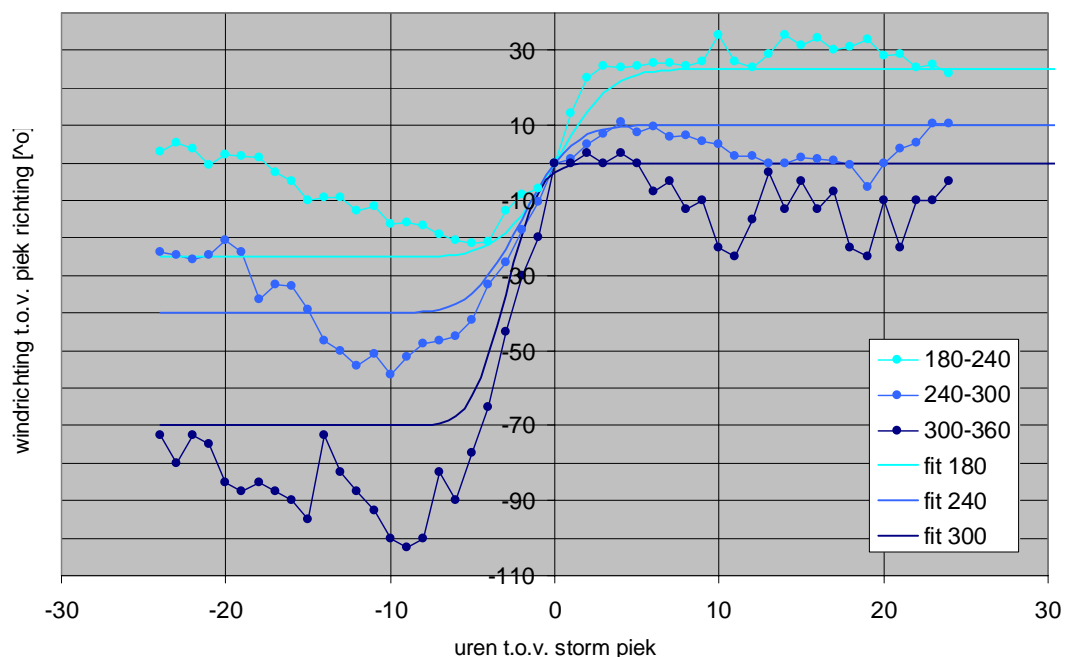
#### 8.4.4 Wind, stroming, waterstand

##### 8.4.4.1 Wind

In de SWAN berekeningen wordt een uniform windveld opgelegd, zoals geadviseerd door De Waal (2009). De windsnelheid en -richting variëren echter in de tijd. Er is een standaard tijdverloop van windsnelheid en -richting bepaald, op basis van gemeten stormen bij Den Helder (station 235: De Kooy) in de periode 1972 – 2005 (Lopez de la Cruz et al., 2010). Daarvoor zijn stormen geselecteerd met een maximum windsnelheid boven de 20 m/s voor de westelijke sector en 15 m/s voor de oostelijke sector. Het verloop van de windsnelheid is bepaald door deze eerst te normaliseren ten opzichte van de maximumwaarde. Een trapeziumvorm met een piekduur van 1 uur beschrijft vervolgens het gemiddelde verloop van de relatieve windsnelheid in de tijd, zie Figuur 8.2. Zo bedraagt de windsnelheid op  $T=-2$  en  $T=+2$  uur 93,6% van de windsnelheid op  $T=0$  uur, en de windsnelheid op  $T=-1$  en  $T=+1$  uur ongeveer 97,9% van de windsnelheid op  $T=0$  uur. Om het verloop van de windrichtingen in de tijd te schematiseren is de gemiddelde verandering van de windrichting ten opzichte van de richting tijdens de piek van de storm bepaald. Daarbij is de westelijke richtingssector in drie gelijke delen verdeeld. Aan dit gemiddelde verloop is een error-functie gefit, zie Figuur 8.3. Aangezien voor oostelijke stormen geen typische richtingsverandering gevonden kon worden, wordt de windrichting voor oostelijke wind constant verondersteld.



Figuur 8.2 Gemiddeld en geschematiseerd tijdsverloop van de windsnelheid (bron: Beckers et al. 2009)



Figuur 8.3 Gemiddeld en geschematiseerd tijdsverloop van de windrichting

Het geschematiseerde tijdsverloop van windrichting en windsnelheid is zowel bij de WAQUA berekeningen (zie Paragraaf 8.4.4.2) toegepast als bij de stationaire SWAN simulaties.

In Tabel 8.3 is voor verschillende momenten ten opzichte van de piek van de storm (T03) en voor verschillende waarden van de potentiële windsnelheid  $U_{pot}$  de open water windsnelheid gegeven. Datzelfde is gedaan voor de hoofdwindrichting D. Deze waarden zijn vervolgens gebruikt in de stationaire SWAN berekeningen op elk moment T01-T05. De omrekening van

potentiële wind naar open water wind is op dezelfde manier gedaan als in Caires et al. (2010) met een Charnock constante van 0.032. De potentiële windsnelheden zijn kleiner dan de open water windsnelheden.

Tabel 8.3 In de productieberekening toegepaste windsnelheid en –richting als functie van de potentiële windsnelheid, hoofdwindrichting en moment ten opzichte van de piek van de storm (bron: Klein en Kroon, 2011b).

Upot [m/s]	Open water windsnelheid, toegepast in SWAN [m/s]					D [°N]	Windrichting toegepast in SWAN [°N]				
	T01	T02	T03	T04	T05		T01	T02	T03	T04	T05
20	19.96	20.87	21.32	20.87	19.96	90	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
25	24.58	25.71	26.26	25.71	24.58	180	166.2	172.6	180.0	187.4	193.8
30	29.10	30.44	31.09	30.44	29.10	210	196.2	202.6	210.0	217.4	223.8
35	33.52	35.06	35.81	35.06	33.52	240	225.0	233.0	239.8	244.6	247.5
40	37.82	39.56	40.41	39.56	37.82	270	255.0	263.0	269.8	274.6	277.5
						300	280.9	292.1	297.6	299.5	299.9
						330	310.9	322.1	327.6	329.5	329.9
						360	340.9	352.1	357.6	359.5	359.9

#### 8.4.4.2 Stroming en waterstand

Het SWAN model maakt gebruik van stromings- en waterstandsvelden die berekend zijn door het WAQUA-Kuststrook-Fijn model voor 360 stormscenarios (Rego, 2010). Dit model wordt aangedreven door randvoorwaarden in de vorm van getij en opzet van ZUNO en DCMS, en een ruimtelijk uniforme wind. De uitvoer bestaat uit waterstands- en stromingsvelden.

De 8 piek windrichtingen, 5 piek (potentiële) windsnelheden (vertaald naar open water wind), 3 faseverschuivingen (ten opzichte van storm piek) en, 3 offshore opzetten zoals genoemd in Tabel 8.2 zijn beschouwd. Dit leidt tot 360 runs.

De aangepaste bodemschematisatie heet versie V61-04. Getijcondities voor de drie verschillende opzetten (0m, 2m and 4m) zijn gedraaid voor 15 januari tot 25 januari 2009, waarna door middel van een herstart de storm toegevoegd wordt. Het getij is dan halverwege dood- en springtij. De storm runs beslaan 56 uur (2 x 23.5 + 1 + 8) elk, en eindigen 27 januari 2009, 08:30.

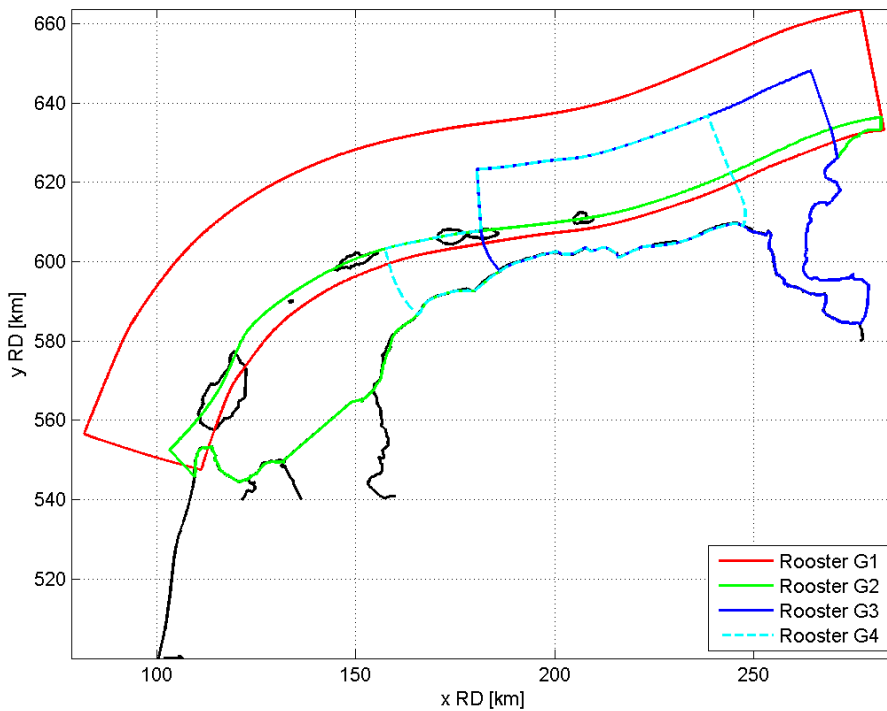
De waterstands- en stromingsvelden, afkomstig van de bovengenoemde WAQUA berekeningen, zijn naar de SWAN roosters geïnterpoleerd. Dit is zorgvuldig gebeurd, o.a. om te voorkomen dat droge roostercellen die in WAQUA als waterstand het bodemniveau krijgen, de interpolatie verstoren (zie Kroon en Klein, 2011a, 2011b). Daarom zijn alleen de WAQUA cellen gebruikt met stroomsnelheden groter dan 0.05 m/s (0.01 m/s bij de Westerschelde), want die staan zeker niet droog. De gefilterde WAQUA waterstands- en snelheidsvelden bevatten veel 'Not-a-Numbers' (NaN). Deze NaN-waarden in de WAQUA velden zijn vervolgens verwijderd door middel van een iteratieve procedure waarin NaN-waarden worden vervangen door de gemiddelde waterstand of snelheid van de aangrenzende natte roostercellen mits er minimaal twee natte aangrenzende cellen beschikbaar zijn. Het resultaat van deze iteratieve procedure zijn WAQUA velden zonder NaN-waarden. Ook na interpolatie naar de SWAN roosters komen NaN-waarden voor, doordat het WAQUA rooster niet overal de SWAN roosters overdekt. De NaN-waarden in de SWAN velden zijn met dezelfde iteratieve middelingsmethode als hierboven beschreven verwijderd.

In en nabij de Westerschelde zijn drie gebieden waar de waterstanden zijn aangepast in verband met kunstmatig hoge waterstanden, te weten de haven van Zeebrugge, het Land van Saeftinghe en de platen in het oostelijk deel van de Westerschelde. Voor details wordt verwezen naar Klein en Kroon (2011a). De geïnterpoleerde stroom- en waterstandsvelden zijn visueel gecontroleerd, met name langs oevers en kust van Waddeneilanden, waar een onjuiste interpolatie te grote snelheidsgradiënten langs de oever zou kunnen veroorzaken. Dit zou onevenredig lage golfhoogten tot gevolg kunnen hebben.

#### 8.4.5 SWAN berekeningen Waddenzee

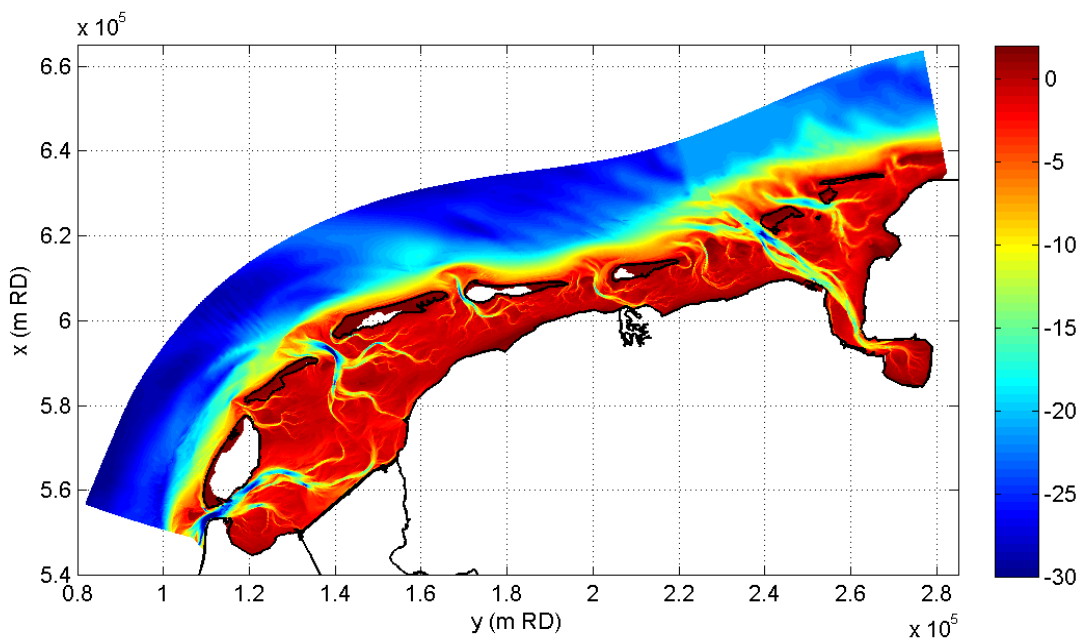
##### 8.4.5.1 Rekenroosters en bodemligging

De SWAN berekeningen voor de Waddenzee zijn uitgevoerd door Klein en Kroon (2011b). Voor de SWAN berekeningen op de Waddenzee zijn vier kromlijnige roosters gedefinieerd, zie Figuur 8.4. Het eerste rooster, G1, ligt buiten de Waddenzee en is gebruikt om randvoorwaarden te genereren voor de overige drie roosters. Het tweede rooster, G2, bedekt de gehele Waddenzee. De opsplitsing in G1 en G2 is noodzakelijk vanuit het oogpunt van beperkte rekencapaciteit. Roosters G1 en G2, en de bijbehorende bodems (zie Figuur 8.5 voor de samengestelde bodemgeometrie) zijn aangemaakt door Groeneweg en Van Os (2009). Het rooster G3 bedekt alleen de oostelijke helft van de Waddenzee. Dit rooster, geconstrueerd door Svašek Hydraulics/HKV<sub>LIJN IN WATER</sub>, is opgezet om berekeningen in de oostelijke Waddenzee uit te voeren waarin refractielimitering is toegepast, zodat de indringing van langere golven goed wordt gemodelleerd. Daar waar G2 en G3 overlappen is de bodemligging op beide roosters identiek. De bodem in het gedeelte van G3 dat overlapt met G1 is verkregen door middel van lineaire interpolatie van G1 naar G3. Het rooster G4 is opgezet vanwege een onjuistheid in het SWAN model waardoor de opgelegde golfrandvoorwaarden op een deel van het G2 rooster niet het modelgebied inkwamen. De berekeningen op G4 zijn bedoeld als een gedeeltelijke vervanging van de berekeningen op G2 en daarom is er op G4 geen refractielimitering toegepast.



Figuur 8.4 Overzicht van het rekenrooster gebruikt voor de SWAN productieberekeningen voor de Waddenzee (bron: Klein en Kroon, 2011b).

De bodemschematisatie is gebaseerd op de meest recente gegevens: vaklodingen uit de jaren 2003-2008. Hiaten zijn opgevuld met SBW-projectmetingen. Voor enkele gebieden waar gegevens ontbraken is ook gebruik gemaakt van o.a. het actuele hoogtebestand (AHN), zeekaarten, en de bodem van het kuststrookmodel.



Figuur 8.5 Bodemligging van het Waddenzee model.

#### 8.4.5.2 *Uitvoer voor de Waddenzee*

Het SWAN invoerbestand 'HRbasis.pnt' bevat 1395 basisuitvoerlocaties voor de SWAN berekeningen. De basis van dit puntenbestand is de set uitvoerlocaties uit de zogenaamde Rand2001 database. Deze punten zijn aan de hand van een aantal criteria beoordeeld en waar nodig aangepast:

- 100 m uit de kruin van de dijk
- Minimaal 2 actieve roostercellen tussen de dijk en de uitvoerlocatie
- Onderlinge afstand niet groter dan 250 m

In de nabijheid van constructies als havens, havendammen, kribben, aanlegsteigers e.d. zijn er twee mogelijkheden:

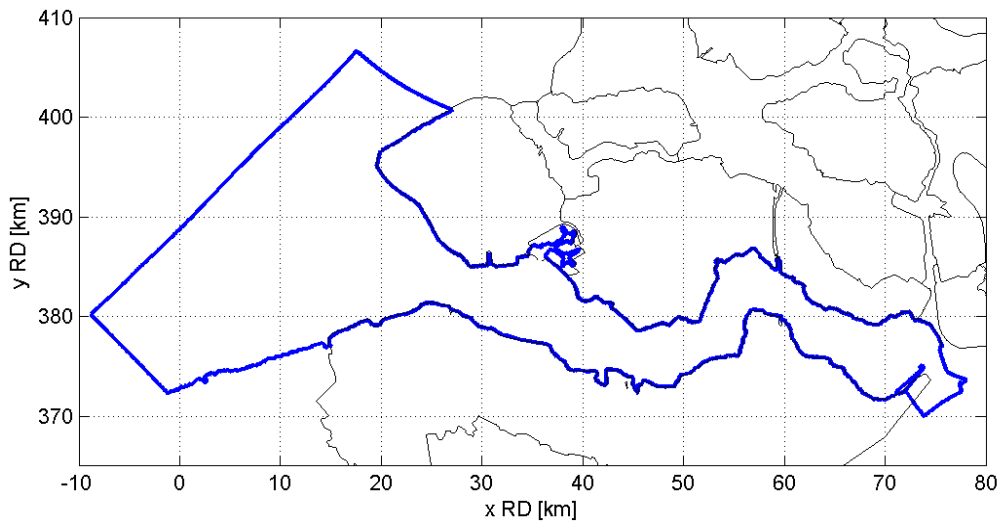
- 1 De constructie is niet in de SWAN bodem opgenomen  
De uitvoerlocaties volgen de keringen op een kustdwarse afstand van 100 m. Wel zijn extra uitvoerpunten (opgenomen in het puntenbestand HRextra.pnt) om de constructie heen gelegd. Voorbeelden van constructies die wel bestaan maar niet in de bodem zijn opgenomen zijn het sluiscomplex bij Den Oever en de aanlegsteiger van de veerboot van Holwerd naar Ameland.
- 2 De constructie is wel in de SWAN bodem opgenomen  
De haven van Harlingen is bijvoorbeeld opgenomen in de bodem. Het havengebied is voor een groot gedeelte uitgesloten van de SWAN berekeningen omdat de bodem daar 'Exceptional Values' heeft. Het heeft hier geen zin uitvoerlocaties op 100 m afstand uit de dijk te leggen omdat daar toch geen uitvoer wordt gegenereerd. Ter hoogte van de haven zijn de uitvoerlocaties daarom om de haven heen gelegd. Er zijn geen punten opgenomen in de set HRextra. Andere locaties waar dit principe is toegepast zijn de Eemshaven en Delfzijl.

Naast diverse voorgedefinieerde uitvoerlocaties waar golfparameters en spectra uitgevoerd worden, is ook een aantal golfparameters uitgevoerd op elke cel van het volledige rekenrooster, de zogenaamde 2D-map-bestanden. Hiermee heeft men op elke willekeurige plaats binnen het rekenrooster de berekende golfparameters tot zijn beschikking. Deze bestanden zijn gebruikt bij de keuze van de uitvoerpunten voor duinen die niet op voorhand bekend waren.

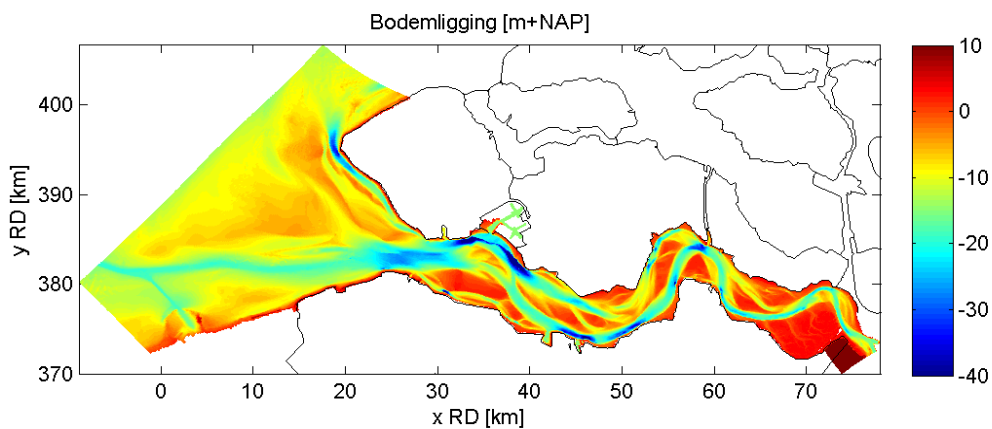
#### 8.4.6 SWAN berekeningen Westerschelde

##### 8.4.6.1 *Rekenroosters en bodemligging*

De berekeningen voor de Westerschelde zijn uitgevoerd door Klein en Kroon (2011a). Voor de SWAN berekeningen op de Westerschelde is één kromlijng rekenrooster gebruikt, zie Figuur 8.6. Dit rooster en de bijbehorende bodem zijn gemaakt door Witteveen+Bos (2010) en Groeneweg (2010). De bodemschematisatie is gebaseerd op metingen van 2007 en 2008, zie Figuur 8.7. De bodem nabij Borssele is enigszins aangepast, aangezien oorspronkelijk de aanlegsteiger daar ten onrechte als bodem was geschematiseerd.



Figuur 8.6 Overzicht van het rekenrooster gebruikt voor de SWAN productieberekeningen voor de Westerschelde (bron: Klein en Kroon (2011a)).



Figuur 8.7 Bodemligging van het Westerschelde model.

## 8.4.6.2 Uitvoer voor de Westerschelde

Het puntenbestand HRbasis.pnt bevat 757 uitvoerlocaties langs de keringen in de Westerschelde. De basis van dit puntenbestand is de set uitvoerlocaties toegepast in de bepaling van de HR2006. Deze punten zijn aan de hand van dezelfde criteria als voor de punten in de Waddenzee (zie Par. 8.4.6.2) beoordeeld en waar nodig aangepast.

Ter hoogte van constructies als havens, havendammen, kribben, aanlegsteigers e.d. zijn er twee mogelijkheden:

- 1 De constructie is niet in de SWAN bodem opgenomen.  
Een dergelijke situatie doet zich, in tegenstelling tot de Waddenzee, in de Westerschelde niet voor. Wel is er vóór de ingang van een aantal havens een aantal



extra punten gedefinieerd terwijl de basisset de kering rond het havenbassin volgt. Een voorbeeld hiervan is de Braakmanhaven in Terneuzen.

- 2 De constructie is wel in de SWAN bodem opgenomen.  
De jachthaven van Breskens is (deels) opgenomen in de bodem. Daarom zijn hier de basisuitvoerpunten vóór de haven gelegd en is het criterium van 100 m afstand uit de dijk losgelaten. Er worden geen punten opgenomen in de set HRextra.pnt.

Naast extra punten voor haveningangen, zijn er voor de zekerheid extra punten langs hoge gebieden als het Land van Saefthinghe gedefinieerd. Dit is gedaan omdat in die gebieden zowel de basispunten als de backup punten (op 50 m afstand van de basisset) veelal droog vallen.



## 9 HR2011 voor dijken en vergelijking met HR2006

### 9.1 Inleiding

Dit hoofdstuk presenteert voor de Waddenzee en de Westerschelde figuren met de HR2011 (zowel golven als waterstanden) en laat bovendien de verschillen zien met HR2006. In de overige zoute wateren zijn de golfrandvoorwaarden voor de harde keringen onveranderd gebleven. Hiervoor verwijzen we naar Den Heijer et al. (2007). De toetspeilen zijn overal wel opnieuw bepaald, maar dit leverde buiten de Waddenzee geen veranderingen op ten opzichte van de toetspeilen van de HR2006.

De probabilistische berekeningen voor de Waddenzee zijn beschreven in Nicolai en Van Haaren (2011) en voor de Westerschelde in Nicolai (2011). In de berekeningen is gebruik gemaakt van een standaardprofiel van de dijk, zie Paragraaf 9.2.1 en 9.3.1. Het gehanteerde kritieke overslagdebiet is 1 l/s/m. In Hydra-K is de optie ingeschakeld die de waterstand in het illustratiepunt gelijk stelt aan het toetspeil (het zogenaamde IP2).

Een uitgebreide vergelijking tussen de golfrandvoorwaarden voor de harde keringen van HR2006 en HR2011 is te vinden in Groeneweg en Gautier (2011) en Groeneweg en Gautier (2012) voor respectievelijk de Westerschelde en de Waddenzee. In die rapporten zijn de termen Hydra 2006 en Hydra 2011 geïntroduceerd teneinde de verschillen tussen HR2006 en de HR2011 te kunnen verklaren. De Hydra verzameling betreft de met Hydra-K verkregen resultaten, voor de harde keringen in de Westerschelde vormde de Hydra2006 verzameling de basis voor HR2006. Indien ze worden vastgesteld zullen de HR2011 waarschijnlijk een deelverzameling zijn van de Hydra 2011 verzameling, voor zowel de Westerschelde als de Waddenzee. In deze studie maken we dus gebruik van de volgende drie sets:

HR 2006:      Hydraulische randvoorwaarden uit Randvoorwaardenboek (2006)  
 Hydra 2011:    Rekenresultaten verkregen met Hydra-K versie 3.6.3 voor Waddenzee en 3.6.28<sup>b</sup> voor Westerschelde en onderliggende SWAN database (KustDB2011) met nieuwe golfcondities. Deze vormen de basis voor de HR2011.  
 Hydra 2006:    Rekenresultaten voor de Westerschelde verkregen met Hydra-K versie 3.6.0 en onderliggende SWAN database (KustDB2006). Deze vormen de basis voor HR2006 in de Westerschelde.

### 9.2 Waddenzee

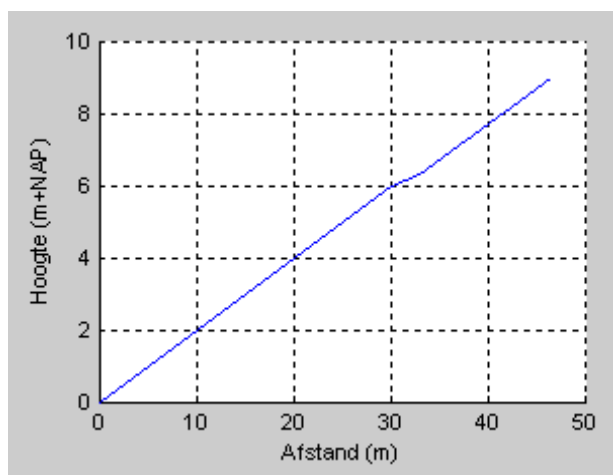
#### 9.2.1 Profielendatabase

De profielendatabase voor de Waddenzee bevat de terugkeertijden, toetspeilen en dwarsprofielen ter plaatse van 1395 uitvoerlocaties. De overschrijdingsfrequentie (de reciproque van de terugkeertijd) is overeenkomstig de wet voor alle uitvoerlocaties gelijk aan

8. *Het enige verschil tussen de genoemde Hydra-K versies is dat versie 3.6.3 ook over SWAN databases voor de Waddenzee beschikt.*

de normoverschrijdingsfrequentie van de achterliggende dijkkring of verbindende kering. Voor dijkringen 1 t/m 4 is deze 1/2000 per jaar, voor dijkringen 5, 6 en 12 is deze 1/4000 per jaar en voor dijkkring 13 en de Afsluitdijk is deze 1/10000 per jaar.

Voor de berekening van de HR2011 zijn alle locaties aan hetzelfde standaard dijkprofiel – nr. 3 – gekoppeld (zie Figuur 9.1). De teen van dit dwarsprofiel ligt op 0 m+NAP. Er ligt een berm op 6 m+NAP. Onder en boven de berm is de helling gelijk aan 1:5. De berm heeft helling 1:10. De kruinhoogte is 9 m+NAP. De ruwheid van de profielsegmenten is 1. Een waarde van 1 duidt op een lage ruwheid (zoals gras of zandasfalt). Deze ruwheidswaarde wordt gebruikt voor berekeningen met het faalmechanisme golfoverslag. Het standaardprofiel is samengesteld en toegepast in (Nicolai en Duits, 2009). Merk op dat voor de HR berekening (golfoverslag) alleen de helling, de bovengenoemde ruwheidswaarde en de ligging van de berm van belang zijn en *niet* de kruinhoogte en het type bekleding. De bekleding speelt alleen een rol bij berekeningen voor het faalmechanisme “Stabiliteit bekledingen”.

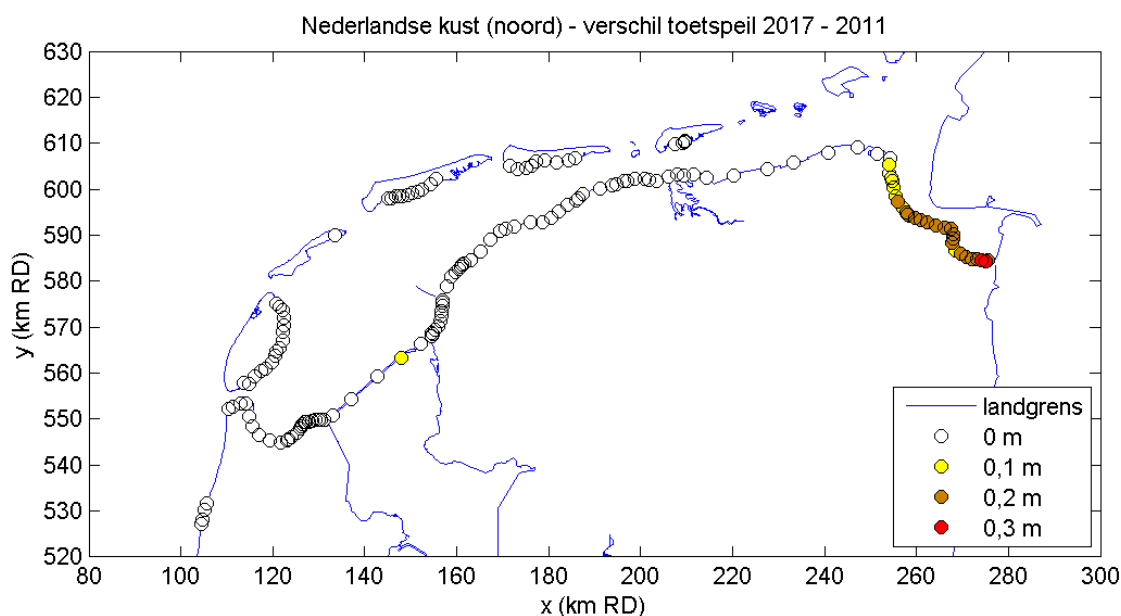


Figuur 9.1 Standaardprofiel 3 voor alle Waddenzeelocaties.

Het dijkprofiel en de ruwheid kunnen een (meestal klein) effect hebben op de HR. Daarom wordt aanbevolen dat beheerders een realistischer dijkprofiel invoeren en daarmee opnieuw HR afleiden voor gebruik in de toetsing. De HR2011 dienen daarbij als referentie.

### 9.2.2 Toetspeilen

De toetspeilen 2017 op de Waddenzee variëren van 4.20 m + NAP in het westen tot 7.00 m + NAP in de Eems-Dollard nabij de grens met Duitsland. In de Eems-Dollard zijn de toetspeilen tot 30 cm hoger dan die uit de HR2006, zie Figuur 9.2. Dit komt vooral door het in rekening brengen van de effecten van het Emssperrwerk. Op de Afsluitdijk is een locatie waarvan het toetspeil van de HR2011 iets hoger is dan het vorige toetspeil (HR2006). Het verschil is slechts 5 cm, maar door afronding op decimeters komt dit uit op 0.1 m. In het overige deel van de Waddenzee zijn de verschillen nihil. Dat wordt grotendeels veroorzaakt door de afronding op decimeters.



Figuur 9.2 Verschil in toetspeil: 2017 – 2011 (bron: Groeneweg en Gautier (2011b))

In Figuur 9.4 zijn de toetspeilen weergegeven, zowel de nieuwe getallen voor HR2011 als de oude HR2006-waarden. De locatienummering is te vinden in de overzichtsfiguur (Figuur 9.3).

### 9.2.3 Golfrandvoorwaarden

Voor de dijken langs de Waddenzee zijn op probabilistische wijze golfrandvoorwaarden bepaald. Bij de Afsluitdijk zijn de golfhoogtes het hoogst, 3.45 m. De bijbehorende golfperiode  $T_{m-1,0}$  is daar 6.6. s. De langste golfperiodes treden op in de buurt van Eemshaven en zijn ongeveer 7 s, zie ook Figuur 9.5.a en b.

Figuur 9.5 toont de golfhoogtes en golfperiodes van HR2006 en Hydra 2011, en Figuur 9.6 en 9.7 de verschillen. De golfrandvoorwaarden die in 2006 zijn opgeleverd - HR2006 - zijn deels een kopie van HR2001 en HR1996 en zijn gebaseerd op een inventarisatie van in het verleden gehanteerde ontwerpwaarden. De waarden van  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$  zijn voor respectievelijk 137 en 135 van de 151 dijkvakken niet gegeven. In het Randvoorwaardenboek (2006, par. 2.6.1) wordt een mogelijkheid geboden om ontbrekende periodematen in de Waddenzee aan te vullen. Het rekenvoorschrift gaat uit van een vaste waarde voor de golfsteilheid van 0.05. De periodematen kunnen dan op basis van de waarden van de significante golfhoogte worden berekend:

$$T_p = \sqrt{\frac{2\pi H_{m0}}{0.05g}} \quad \text{en} \quad T_{m-1,0} = \frac{T_p}{1.1} \quad (9.1)$$

Voor het grootste deel van de Waddenkust is de significante golfhoogte in de Hydra2011 set enkele decimeters lager dan de HR2006 golfhoogte. Uitzondering hierop vormen de Afsluitdijk (+ 1 m) en het traject tot circa 20 km ten oosten van de Afsluitdijk. Ook in de Eems-Dollard zijn de nieuwe significante golfhoogtes fors hoger. Op de eilanden is over het algemeen de golfhoogte van Hydra 2011 lager dan die van de HR2006.

De verschillen in spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  zijn klein ten westen van Holwerd (dat ligt ten zuiden van Ameland). In de meer open delen ten oosten van Holwerd zijn de periodes van Hydra 2011 vaak zo'n 1 tot 2 s hoger. Alleen in de meer beschutte delen bij Lauwersoog en voor de oostelijk georiënteerde dijkvakken in de Eems-Dollard is het verschil minder dan 1 s.

Ook de piekperiode (niet in de Figuren) neemt op de meeste locaties toe. In de westelijke Waddenzee bedraagt de toename grofweg 1 s, in de oostelijke Waddenzee en in de Dollard oplopend tot 3 s, met uitzondering van de oostelijk georiënteerde dijkvakken. Op Texel zijn de nieuwe spectrale en piekperiode grofweg 0 - 0.5 s lager, op de andere eilanden over het algemeen iets hoger, variërend van 0 tot 1 s. Langs de Afsluitdijk zijn de nieuwe waarden voor de beide periodematen significant lager, 1 - 1.5 s voor  $T_{m-1,0}$  en 0.5 - 1 s voor de piekperiode<sup>9</sup>.

De gemiddelde verschillen tussen de Hydra2011 en HR2006 zijn weergegeven in Tabel 9.1. De genoemde verschillen zijn een rekenkundig gemiddelde over het betreffende segment en geven een indicatie van de verschillen tussen de HR2011 en HR2006. De verschillen zijn direct het gevolg van het feit dat eerder ontwerpwaarden zijn overgenomen en nu een geheel nieuwe HR-bepaling met modellen heeft plaatsgevonden.

Tabel 9.1 Globale verschillen tussen HR2011 en HR2006. Zie Figuur 9.3 voor de kilometrering.

Segment	Ligging	$\Delta H_{m0}$ [m]	$\Delta T_{m-1,0}$ [s]	$\Delta T_p$ [s]
1	Km 0 – 32	-0.5	-0.2	+0.5
2	Afsluitdijk	+0.4	-1.2	-0.6
3	Km 60 – 100	+0.2	+0.2	+1.2
4	Km 100 -125	-0.6	-0.1	+0.5
5	Km 125 – 135	-0.4	+1.5	+1.0
6	Km 135 – 150	+0.2	+0.3	+0.7
7	Km 150 – 185	-0.5	+1.9	+2.6
8	Km 192 – 203	-0.4	+0.6	+0.1
9	Km 203 - 234	+0.7	+0.8	+1.4
10	Texel	+0,3	-0,2	+0,1
11	Vlieland	+0,3	-0,2	+0,1
12	Terschelling	0	+0,3	0
13	Ameland	-0,3	0	+0,7
14	Schiermonnikoog	-0,2	+0,8	+1,8

## 9.3 Westerschelde

### 9.3.1 Profielen database

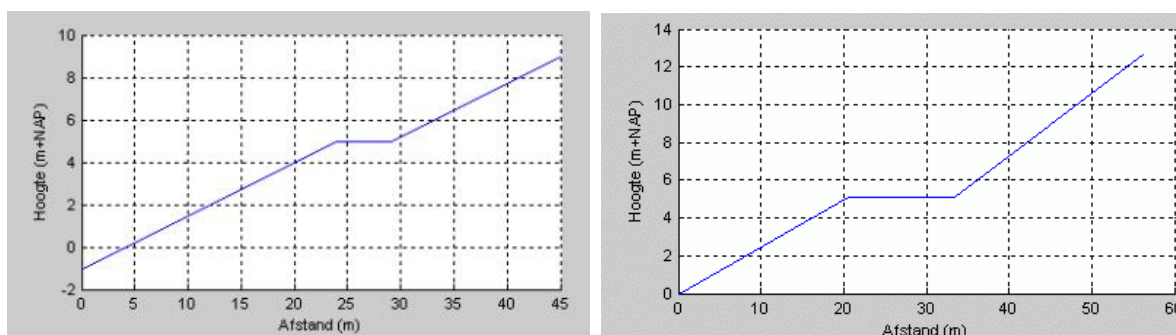
De profielendatabase voor de Westerschelde bevat de terugkeertijden, toetspeilen en dwarsprofielen ter plaatse van 757 uitvoerlocaties. De terugkeertijden voor de Westerschelde zijn overeenkomstig de wet voor alle locaties gelijk aan 4000 jaar.

De locaties 66 t/m 658 zijn gekoppeld aan standaardprofiel 2 (zie Figuur 9.8 hieronder). Dit zijn de locaties ten oosten van Breskens op de zuidoever en ten oosten van Vlissingen op de noordoever, zie Figuur 9.9. De teen van dit dwarsprofiel ligt op  $-1$  m+NAP. Er ligt een berm

9. Na verlaging van de overschrijdingsfrequentie van 1/1430 jaar in 2001 naar 1/10000 jaar in 2006 zijn door Groeneweg (2004) nieuwe HR voor de Afsluitdijk afgeleid, welke flink groter zijn dan de nieuwe waarden.

op 5 m+NAP. De helling onder en boven de berm is 1 op 4. De kruinhoogte is 9 m+NAP. De dijk is bekleed met steen. Dit profiel is ook gebruikt in de voor de HR2006 gebruikte versie van Hydra-K.

De locaties 1 t/m 65 – gelegen op de zuidoever ten westen van Breskens – en 659 t/m 757 – gelegen op de noordoever ten westen van Vlissingen – zijn gekoppeld aan standaardprofiel 1 (zie Figuur 9.8). De teen van dit dwarsprofiel ligt op 0 m+ NAP. De berm ligt op 5.13 m+NAP. Onder de berm is de helling 1 op 4, boven de berm is deze 1 op 3. De kruinhoogte is 12.75 m+NAP. De dijk is bekleed met steenbekleding boven de berm en met asfalt op en onder de berm. Dit profiel is ook gebruikt in de voor de HR2006 gebruikte versie van Hydra-K.



Figuur 9.3 Standaardprofielen in de Westerschelde. Links standaardprofiel 2, rechts standaardprofiel 1 (bron: Nicolai, 2011)

Voor de toetsing wordt aanbevolen dat beheerders een realistischer dijkprofiel invoeren en daarmee opnieuw HR afleiden. De HR2011 dienen daarbij als referentie.

### 9.3.2 Toets- en rekenpeilen

De toetspeilen 2017 op de Westerschelde variëren van 4.90 m + NAP bij Westkapelle in het westen tot 6.70 m + NAP bij de Hertogin Hedwige polder in het oosten van de Westerschelde. De toetspeilen in de Westerschelde zijn ongewijzigd ten opzichte van de HR2006. Eventuele kleine verschillen verdwijnen in de afronding op een veelvoud van 10 cm. De toetspeilen zijn weergegeven in Figuur 9.10.

### 9.3.3 Golfbrandvoorwaarden

Voor de dijken langs de Westerschelde zijn golfbrandvoorwaarden bepaald, gebaseerd op recente SWAN berekeningen. De hoogste golfhoogtes treden op nabij Westkapelle, en bedragen 4.2 m. De bijbehorende periode  $T_{m-1,0}$  is daar ruim 9 s. In het oosten van de Westerschelde zijn de golfhoogtes en periodes ongeveer de helft lager. Dijkvakken die op het oosten zijn gericht zoals nabij km 54 en km 100, hebben nog iets lagere waarden, zie ook Figuur 9.11.a en b.

Figuur 9.11 toont de golfhoogtes en golfperiodes van Hydra 2006 en Hydra 2011, en Figuur 9.12 en 9.13 de verschillen tussen Hydra 2011 en HR2006. De verschilanalyse tussen Hydra 2006 en 2011 is niet punt voor punt uitgevoerd maar op een globaal niveau, omdat de uitvoerlocaties in 2011 niet gelijk zijn aan die van 2006. De belangrijkste conclusies die getrokken kunnen worden zijn:

- In de monding zijn de golfhoogtes van Hydra 2011 ongeveer 1 m hoger dan die van 2006. Ten oosten van Vlissingen liggen de verschillen grofweg tussen -0.25 m en +0.25 m. In het mondingsgebied hangen de verschillen vaak samen met het feit dat de Hydra 2011 uitvoerlocaties verder van de kering en daardoor op dieper water liggen. Hierdoor zijn lokaal de golfhoogtes uit Hydra 2011 hoger. Ook in overige delen van de Westerschelde liggen de locaties van 2011 vaak verder van de kering. Hierdoor zijn ze minder beschermt of liggen iets dieper, wat vaak leidt tot iets hogere golven.
- Helemaal in het oosten, bij het Verdrongen Land van Saeftinghe zijn de golfhoogtes van Hydra 2011 ongeveer 0.5 m lager dan in 2006. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van de Leidingendijk op ongeveer 200 m van de oever. Deze dijk was afwezig in de schematisatie die is gebruikt voor Hydra 2006.
- De verschillen in golfperiodes vertonen uitschieters van 2 tot 3 s rondom Zoutelande (harde kering in een duinengebied). De Hydra 2011 golfperiodes op oostelijk gerichte locaties langs de Baarlandpolder en Heerjanszpolder (segment 5) en in het Verdrongen Land van Saeftinghe zijn 1 tot 2 s lager dan de Hydra 2006 golfperiodes. In het eerste geval wordt dit veroorzaakt door lagere windsnelheden, in het tweede geval door de Leidingendijk. In de andere segmenten zijn de Hydra 2011 golfperiodes of gelijk aan de Hydra 2006 golfperiode of iets lager, typisch tot 0.5 s. De verlaging wordt geweten aan het verdisconteren van stroming in de Hydra 2011 resultaten, waardoor voor locaties waar golven zich in de stromingsrichting voortplanten de golfleeftijd toeneemt.
- Met uitzondering van afgeschermd locaties (havens en op het oosten gelegen segment 5) zijn de verschillen in golfrichting klein. De golven draaien door bodemrefractie bij naar de kust, dus naar de dijknormaal toe. In gebieden waar stroming een rol speelt draaien de golven in de stromingsrichting, dus typisch van de dijknormaal af. Omdat in Hydra 2006 het effect van stroming niet is verdisconteerd ontstaan in gebieden waar stroming een rol speelt verschillen van 5 tot 15 graden.

De verschillen tussen de Hydra 2011 en Hydra 2006 resultaten zijn samengevat in Tabel 9.1. Per segment wordt aangegeven in hoeverre de golfparameters bepaald met Hydra 2011 hoger (+) of lager (-) zijn dan die van 2006 en welke oorzaken aan de verschillen ten grondslag liggen.

Tabel 9.2 Globale verschillen Hydra 2011 – Hydra 2006 per segment en oorzaken verschillen voor de Westerschelde. De segmentnummering loopt van noordwest met de klok mee naar zuidwest. Segmenten 1 t/m 8 liggen op de noordoever, de overige op de zuidoever.

Segment	$H_{m0}$ [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	golf- richting [°N]	Oorzaken verschillen
1	-0.5	-0.5	0	Uitvoerlocaties dicht bij kering
2	+1	0	0	Uitvoerlocaties verder van kering
3	+0.25	0	0	Bodemverlaging
4	+0.1	0	+5	
5	+0.25	-2	variabel	Lagere windsnelheden
6	+0.3	0	+10	Aangepaste brekerformulering in SWAN
7	-0.1	-0.5	+5	Hogere bodemligging; stroming
8	+0.25	0	+5	Aangepaste brekerformulering in SWAN
9	-0.5	-2	variabel	Aanwezigheid Leidingendijk in Hydra 2011
10	-0.1	-1	-15	Lagere windsnelheden



11	+0.1	0	0	
12	0	0	0	
13	0	-0.5	-10	Stroming
14	+0.1	-0.5	-15	Uitvoerlocaties verder van kering; stroming
15	+0.5	0	-20	Uitvoerlocaties verder van kering
16	+1	+0.5	0	Uitvoerlocaties verder van kering; hogere windsnelheid



## 10 HR2011 voor duinen en vergelijking met HR2006

Alleen voor de Waddeneilanden zijn nieuwe randvoorwaarden voor toetsing van de duinen bepaald ten behoeve van de HR2011. De golfrandvoorwaarden en ook de rekenpeilen voor de overige duingebieden zijn gelijk gebleven aan de HR2006. Dit hoofdstuk gaat in op de resulterende HR2011 voor de duinen op de Waddeneilanden en de vergelijking met HR2006.

De rekenpeilen 2017 voor het Waddengebied variëren tussen 4.40 m en 4.50 m +NAP. Voor alle raaien geldt dat de rekenpeilen gelijk zijn gebleven of met 1 dm zijn toegenomen in vergelijking met de HR2006. De toename is het gevolg van effecten van zeespiegelstijging, in combinatie met afronding op hele decimeters. Voor een aantal gebieden was de decimeringshoogte in HR2006 te laag, waardoor de nieuwe rekenpeilen daar hoger uitvallen. Vooral aan de Noordzeezijde van de Waddeneilanden is dat het geval.

De golfrandvoorwaarden zijn echter significant anders, als gevolg van het feit dat de randvoorwaarden dichterbij de kust worden opgelegd dan in de rekenregel van het VTV2006. In Figuur 10.1 zijn de oude en nieuwe waarden voor de golfhoogte  $H_{m0}$  gegeven. Voor de raaien aan de Noordzeezijde van de Waddeneilanden zijn de golfhoogtes tussen de 5 en 7 m. Bij de koppen van de eilanden zijn de golfhoogtes lager, doorgaans tussen de 3 en 5 m, maar soms ook slechts 1 m. De keuze voor het gebruik van golfcondities op de locaties dichterbij de kust heeft tot gevolg dat de golfhoogtes in kustlangse richting een grotere fluctuatie vertonen in vergelijking met de golfhoogtes die voor de HR2006 zijn afgeleid (zie Diermanse, 2012).

De spectrale periodemaat  $T_{m-1,0}$  varieert van minimaal 10.8 s bij de koppen tot maximaal 13 s aan de Noordzeezijde van de Waddeneilanden (zie Figuur 10.2). De waarde 10.8 s is de opgelegde ondergrens (zie ook Paragraaf 5.4.5).

Aangezien de golfrandvoorwaarden voor de HR2011 op een andere locatie zijn gegeven dan die voor de HR2006, zegt een directe vergelijking van de golfparameters niet veel over de veiligheid van de duinen. Daarom zijn in een eerste kwalitatieve analyse met een standaard duinprofiel ook de bijbehorende afslaglengtes bepaald, zie Figuur 10.3. Op basis van deze eerste schatting resulteert de nieuw voorgestelde rekenregel in een reductie van afslaglengtes in vergelijking met de vigerende rekenregel van het VTV2006. Rond de koppen van de Waddeneilanden is de reductie relatief groot, de indicatieve afslaglengtes verschillen in de orde van 50 m. Voor raaien aan de Noordzeezijde van de Waddeneilanden blijven de verschillen in de indicatieve afslaglengtes beperkt tot ongeveer 10 – 20 m.

De nieuwe methode, waarbij golfrandvoorwaarden dichterbij de kust opgelegd worden, heeft dus vooral een groot effect bij de koppen van de Waddeneilanden. In de methode van het VTV2006 worden de relatief hoge golven op de NAP-20 m contourlijn opgelegd. Deze hoge golven kunnen in werkelijkheid echter niet de eilandkoppen bereiken, omdat deze afgeschermd worden door zandbanken en ondiepe voorlanden. Het opleggen van de golfrandvoorwaarden van het VTV2006 leidt dus tot een overschatting van de golfbelasting bij de eilandkoppen, waardoor de duintoets op die locaties een sterk "conservatief" karakter had. Deze observatie is de voornaamste reden geweest om in het kader van WTI2011 de golfrandvoorwaarden dichterbij de kust af te leiden.

Het wordt aangeraden om in de toetsing de spectrale periodemaat  $T_{m-1,0}$  toe te passen (Diermanse, 2012). Enerzijds kan het gebruik van  $T_p$  leiden tot onderschatting vanwege de te hanteren bovengrens van 18 s, anderzijds kan het gebruik van de  $T_p$  leiden tot een overschatting van de mate van duinafslag vanwege te hoge waarden van  $T_p$  bij het afleiden van golfrandvoorwaarden voor de SWAN berekeningen die ten grondslag liggen aan de golfdatabase (zie ook Paragraaf 8.4.3).

## 11 Conclusies

Voor de periodieke toetsing van de primaire waterkeringen zijn de maatgevende hydraulische belastingen – ook wel Hydraulische Randvoorwaarden (HR) genoemd – bepaald. De formele vaststelling van de afgeleide concept HR door de minister van Infrastructuur en Milieu heeft (nog) niet plaatsgevonden. Inmiddels is duidelijk geworden dat er geen vierde toetsronde komt en is het nog maar zeer de vraag of de concept HR in de toekomst überhaupt voor toetsing gebruikt gaan worden. In dit rapport verwijzen we naar de concept randvoorwaarden voor waterstanden en golfcondities als HR2011.

Voor de HR2011 zijn alleen voor de Waddenzee en de Westerschelde nieuwe golfrandvoorwaarden bepaald. In de overige gebieden zijn de waarden van HR2006 overgenomen. Overigens zijn de toetspeilen wel voor de hele kust opnieuw berekend.

De nieuwe golfrandvoorwaarden voor de Westerschelde betreffen alleen harde keringen (dijken). In de Waddenzee gaat het zowel om harde keringen als om zachte keringen (duinen).

De belangrijkste verschillen (en één overeenkomst) tussen de aanpak van de HR2006 en de HR2011 zijn:

- 1 De HR2006 voor het Waddengebied zijn grotendeels gebaseerd op een inventarisatie van in het verleden gehanteerde ontwerpwaarden. Voor de HR2011 is voor de Waddenzee – in lijn met de overige gebieden – nu ook een probabilistische methode gebruikt om nieuwe golfrandvoorwaarden af te leiden, zowel voor de duinen als voor de dijken.
- 2 Voor de HR2011 voor duinen is het duinafslagmodel D++ gebruikt, waarbij de golven niet op de 20 m dieptelijn worden beschouwd zoals bij de HR2006, maar op een representatieve locatie dicht bij de kering.
- 3 De transformatiematrix die zowel voor de harde als de zachte keringen de vertaling geeft van wind en waterstand naar golven bij de kust, is nu op een meer geavanceerde manier bepaald dan voor de HR2006. In beide gevallen bestaat de transformatiematrix uit resultaten van een groot aantal SWAN-berekeningen. Echter, voor de SWAN berekeningen voor de HR2011 is nu voor het eerst rekening gehouden met stroming, verloop van de windsnelheid en draaiing van de wind tijdens een storm.
- 4 De maatgevende waterstanden zijn opnieuw bepaald, op basis van verlengde meetreeksen. Voor grote delen van de kust verschillen de toets- en rekenpeilen voor de HR2011 niet of slechts in geringe mate van die uit de HR2006. Grootste uitzondering is de Eems-Dollard, waar de toetspeilen nu 30 cm hoger zijn, als gevolg van het in rekening brengen van de effecten van het Emssperrwerk. De waterstandstatistiek binnen Hydra-K is voor vijf (Huibertgat, Den Helder, Harlingen, Lauwersoog, IJmuiden) van de twaalf stations identiek aan de waterstandstatistiek die voor HR2006 beschikbaar was.
- 5 De diepwatgolfstatistiek die voor de HR2011 is gebruikt is gebaseerd op 6 jaar langere meetreeksen dan de statistiek voor de HR2006.

- 6 De windstatistiek die voor de HR2011 is gebruikt is identiek aan de statistiek die gebruikt is voor de HR2006.
- 7 Voor Waddenzee, Westerschelde en Hollandse Kust is de zogenaamde Q-variant in Hydra-K geïmplementeerd. Hiermee wordt voor diverse typen dijkbekleding de golfbelasting bepaald voor een gegeven op voorhand vastgestelde waterstand. In de Hydra-K versie voor HR2006 werden belastingfuncties uit het VTV2006 gehanteerd. Dit leidde dikwijls tot geen of onbetrouwbare resultaten als gevolg van irreguliere faalgebieden. Met de Q-variant is dat probleem weggenomen.

#### Verschillen tussen HR2006 en HR2011 voor harde keringen in het Waddengebied

Voor het grootste deel van de harde keringen langs de Waddenkust is de significante golfhoogte van de HR2011 enkele decimeters lager dan van de HR2006. Uitzondering hierop vormen de Afsluitdijk (+ 1 m), en het traject tot circa 20 km ten oosten van de Afsluitdijk. Ook in de Eems-Dollard zijn de nieuwe significante golfhoogtes fors hoger. Voor de harde keringen op de eilanden is over het algemeen de golfhoogte van HR2011 lager dan die van de HR2006.

De verschillen in spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  zijn klein ten westen van Holwerd. In oostelijke Waddenzee zijn de periodes van HR2011 zo'n 1 en 2 s hoger. Bij Lauwersoog en voor de oostelijk georiënteerde dijkvakken in de Eems-Dollard is het verschil minder dan 1 s.

#### Verschillen tussen HR2006 en HR2011 voor duinen in het Waddengebied

Aangezien de golfbrandvoorwaarden voor de HR2011 op een andere locatie zijn gegeven dan die voor de HR2006, zegt een directe vergelijking van de golfparameters niet veel over de veiligheid van de duinen. Het is zinniger om afslaglengtes te beschouwen. Op grond van een eerste kwalitatieve analyse blijken de afslaglengtes op basis van de nieuwe methode kleiner dan op basis van het VTV2006. Deze reductie is relatief groot bij de koppen van de Waddeneilanden. Voor raaien aan de Noordzezijde van de Waddeneilanden blijven de verschillen beperkt.

#### Verschillen tussen HR2006 en HR2011 voor harde keringen in de Westerschelde

De verschillen tussen HR2006 en HR2011 voor de harde keringen in de Westerschelde zijn op de meeste locaties beperkt. Onder andere vanwege een andere ligging van de uitvoerlocaties, zijn de golfhoogtes van de HR2011 in de monding ongeveer 1 m hoger dan die van de HR2006. Ten oosten van Vlissingen liggen de verschillen grofweg tussen -0.25 m en +0.25 m. Helemaal in het oosten, bij het Verdrongen Land van Saefthinghe zijn de golfhoogtes van HR2011 ongeveer 0.5 m lager dan in HR2006. Dit wordt veroorzaakt door het verdisconteren van de Leidingendijk in het rooster.

De golfperiodes van HR2011 voor oostelijk gerichte keringen langs de Baarlandpolder en Heerjanspolder en in het Verdrongen Land van Saefthinghe zijn 1 tot 2 s lager dan die van de HR2006. Verder zijn de golfperiodes gelijk, of zijn de golfperiodes van de HR2011 iets kleiner dan die van de HR2006 (typisch tot 0.5 s).

## 12 Overzicht rapportages WTI 2011 – HR Zout

Ten behoeve van de bepaling van de HR in de kustwatersystemen in het project WTI 2011 is een groot aantal rapporten en aanvullende documentatie geproduceerd. De volledige lijst noemen we hier onder, uitgesplitst naar basisrapporten en overige rapporten en memo's en tenslotte een drietal publicaties.

### **Basisrapporten**

#### Statistiek:

Roscoe, K. (2009). Assessment of the still-water-level 1/10,000 years return values used in the current Hydraulic Boundary Conditions. Deltares Report 1200103-041-HYE-0003, November 2009.

Roscoe, K. (2009). Extreme offshore wave statistics in the North Sea. Extension of the measurement time series and comparison of methodologies. Deltares Report 1200103-042-HYE-0002, November 2009.

Dillingh, D. en J.R. Rego (2010). Toets- en rekenpeilen kust en estuaria ten behoeve van HR 2011. Deltares rapport 1202341-002-HYE-0060, november 2010.

#### Probabilistiek:

Beckers, J., C. Gautier and Groeneweg, 2009: Probabilistic Model Wadden Sea – Three alternatives for HBC2011 and test results, Deltares report 1200103-057-HYE-0006, December 2009.

#### Bekledingen:

Smale, A.J. en J. Beckers (2011). Aangepaste Q-variant binnen Hydra-K. Verloop golfcondities, belastingfuncties en externe testronde. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0029, augustus 2011.

#### Productieberekeningen:

Groeneweg, J. en C. Gautier (2011). Verschilanalyse concept HR 2011 en HR 2006 voor de harde keringen in de Westerschelde. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0014, mei 2011.

Groeneweg, J. en C. Gautier (2012). Verschilanalyse concept HR 2011 en HR 2006 voor de harde keringen in de Waddenzee. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0034, februari 2012.

Diermanse, F.L.M. (2012). Hydraulische Randvoorwaarden voor duinen op de Waddeneilanden. Bepalen van toetswaarden voor waterstand, golven en korreldiameters in het kader van WTI2011. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0013, januari 2012.

## Overige rapporten/memo's:

### Statistiek:

Roscoe (2010). Offshore wave statistics: compilation of multivariate files. Deltares memo 1200103-042-HYE-0006, d.d. 5 March 2010.

Geerse, C.P.M. en J.W. Verkaik (2010). Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. HKV Lijn in Water rapport PR1601.10, februari 2010.

Stijnen, J.W. en M.J. Kallen (2010). Diepwaterrandvoorwaarden WTI-2011. HKV Lijn in Water rapport PR1759.10, februari 2010.

Rego, J.R. and D. Dillingh (2010). Ems Sperrwerk surge study. Deltares report 1202341-002-HYE-0034, July 2010.

### Fysica:

Gautier, C. en J. Groeneweg (2010). Aansturingsdocument SWAN voor HR-2011. Rapport Deltares 1200103-021-HYE-0013, Februari 2010.

Groeneweg, J. en J. van Os (2009). Bodem voor productiesommen HR Waddenzee. Deltares memo 1200103-021-HYE-0006, d.d. 26 november 2009.

Groeneweg, J. (2010). Keuze representatieve bodem Westerschelde t.b.v. productieberekeningen HR. Deltares memo 1202341-002-HYE-0027, 9 juni 2010.

Eslami Arab, S. and J. Groeneweg (2009) Method for determining offshore boundary conditions in SWAN computations for HBC calculations. Deltares memo 1200103-021-HYE-0007, d.d. 30 December 2009.

Eslami Arab, S. (2010). Production of wave boundary conditions for SWAN simulations. Deltares memo 1202341-002-HYE-0010, d.d. 23 March 2010.

Gautier, C. (2010). SWAN calibration and validation for HBC2011. Deltares report 1200103-020-HYE-0002, May 2010.

Groeneweg, J. (2010). Analyse verschillen door refractielimitering. Deltares memo 1202341-002-HYE-0032, d.d. 6 oktober 2010.

Witteveen en Bos (2010). Hindcast verification of SWAN in the Western Scheldt.. Witteveen + Bos report DT311-1, March 2010.

Spee, E. en D. Vatvani (2010). Evaluatie van de nieuwe bodem V61-04 voor het Kuststrookmodel. Deltares rapport 1200103-023-HYE-0001, maart 2010.

De Waal, J.P. (2010). WTI 2011 Wind input to be used in HBC production runs. Deltares Report 1200103-02-HYE-0001, February 2010.

Caires, S., J.P. de Waal, J. Groeneweg and K. Roscoe (2010). Positioning of the WTI 20011 wind fields. Comparison between applied wind fields and speeds form alternative approaches. Deltares report 1202120-003-HYE-0004, June 2010.



Probabilistiek:

Lipari, G. and G.Ph. van Vledder (2008) Simulation studies for storm winds, flow fields and wave climate in the Wadden Sea. Alkyon report A2108, November 2008.

Lipari, G. and G.Ph. van Vledder (2009). Viability study of a prototype windstorm for the Wadden Sea surges. Alkyon Report 2239, May 2009.

Beckers, J., C. Gautier en J. Groeneweg (2009). Probabilistic model Wadden Sea: Three alternatives for HBC 2011 and test results. Deltares report 1200103-057-HYE-0008, 30 december 2009.

Lopez de la Cruz, J., A. Tijssen en J. Beckers (2010). The Evolution of Storms on the Wadden Sea. Deltares report 1200264-004-HYE-0012, February 2010.

Swinkels, C. (2010). Effect of storm surge duration on dune erosion. Deltares memo 1202341-002-HYE-0017, d.d. 13 September 2010.

Nicolai, R.P. en M. Duits (2009). Referentieversie Hydraulische Randvoorwaarden in de Waddenzee. HKV Lijn in Water rapport PR1719.10, juli 2009.

Bekledingen:

De Valk, C., B. Kuijper en C.P.M. Geerse (2008). Berekening van illustratiepunten in irreguliere faalgebieden met Hydra-K. Fase 1: ontwerp en testen van een nieuwe methode. BMT Argoss en HKV Lijn in Water rapport A8036, december 2008.

Kuijper, B. en C. de Valk (2009). Testrapport Hydra-K versie 3.5.2. HKV Lijn in Water en BMT Argoss rapport PR1514.20, mei 2009.

Van Haaren, D. en C.P.M. Geerse (2009). Haalbaarheid alternatieve bekledingmodule in Hydra-K. HKV Lijn in Water rapport PR 1799.10, december 2009.

Geerse, C.P.M. en D. van Haaren (2010). Golfcondities bekledingen uit Q variant Hydra-K en WindWater - Vergelijking probabilistische en deterministische aanpak voor de Westerschelde. HKV LIJN IN WATER rapport PR 1911.10, oktober 2010.

Beckers, J. (2010a). Vergelijking ontwerpwaarden bekledingen Westerschelde – Hydra-K (Q-variant). Deltares memo 1202341-002-HYE-0024, d.d. 23 april 2010.

Van Haaren, D. en C.P.M. Geerse (2010). Pilotstudie aangepaste Q-variant in Hydra-K - Vergelijking probabilistische en deterministische aanpak voor de Westerschelde. HKV Lijn in Water rapport PR 1957.10, juli 2010.

Beckers, J. (2010b). Voorstel aanpak bekledingen in HR 2011. Deltares memo 1202341-002-HYE-0049, d.d. 29 september 2010.

Van Haaren (2010). Implementatie aangepaste Q-variant Hydra-K. HKV Lijn in Water rapport PR 2004.10, december 2010.

Nicolai, R.P. en D. van Haaren (2011). Testrapport Hydra-K versie 3.6.4. Bekledingvariant voor WTI-2011. HKV Lijn in Water rapport PR2004.20, december 2011.

## Productieberekeningen:

Rego, J.R. (2010). Hydrodynamic production runs with Kuststrook model: 360 surge scenarios. Deltares memo 1200103-024-HYE-0002, d.d. 26 March 2010.

Klein, M.D. en J. Kroon (2011). Productieberekeningen Westerschelde voor WTI-2011: rapportage Fase 1. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1874.10, februari 2011.

Kroon, J. en M.D. Klein (2011). Productieberekeningen Westerschelde voor WTI-2011: rapportage Fase 2. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1874.10, februari 2011.

Nicolai, R.P., J. Kroon, M.D. Klein, M.J. Kallen en J.W. Verkaik (2011). Productieberekeningen Westerschelde voor WTI-2011: rapportage Fase 3. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1874.10, februari 2011.

Klein, M.D. en J. Kroon (2011). Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 1. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.20, mei 2011.

Kroon, J. en M.D. Klein (2011). Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 2. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.20, mei 2011.

Nicolai, R.P., M.D. Klein, J. Kroon, M.J. Kallen en J.W. Verkaik (2011). Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 3. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.14, augustus 2011.

Nicolai, R.P. (2011). Probabilistische berekeningen Westerschelde voor WTI-2011. HKV Lijn in Water rapport PR1875.10, april 2011.

Nicolai, R.P. en D. van Haaren (2011). Probabilistische berekeningen Waddenzee voor WTI-2011. HKV Lijn in Water rapport PR1873.10, september 2011.

## **Publicaties:**

Rego, J., D. Dillingh, M. Verlaan, R. Plieger and J. Groeneweg (2010). Quantifying the seaward effect of closing a major surge barrier during storms. Publication from 11th International Coastal Symposium, Szczecin, Poland.

Roscoe, K., S. Caires, F. Diermanse, J. Groeneweg (2010). Extreme offshore wave statistics in the North Sea. In proceeding of the FRIAR conference, Milan, Italy.

Groeneweg, J., J. Beckers, C. Gautier: A probabilistic model for the determination of Hydraulic Boundary Conditions in a dynamic coastal system. In Proc. of the Int. Conf. on Coastal Engng (ICCE2010), Shanghai, China.

## 13 Referenties

- 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.
- Baldock, T.E., P. Holmes, S. Bunker and P. Van Weert (1998). Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone, *Coastal Engineering* 34, issues3-4, September 1998, pp 173-196.
- Beckers, J., C. Gautier en J. Groeneweg (2009). Probabilistic model Wadden Sea: Three alternatives for HBC 2011 and test results. Deltares, WTI – HR Zout, project 1200103-057-HYE-0008, 30 december 2009.
- Boers, M. (2011). Technisch Rapport Duinwaterkeringen en Hybride Keringen 2011. Deltares rapport 1202124-002-HYE-0001, dd oktober 2011.
- Booij, N., R. C. Ris, and L. H. Holthuisen (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. of Geophys. Res.* 104 (C4), 7649-7666.
- Caires, S. (2007). Extreme Wave Statistics, Methodology and applications to North sea data. WL | Delft Hydraulics Report H4803.30, February 2007.
- Caires, S. (2009). Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject 'Wind Modelling', Deltares Report 1200264-005, 29 september 2009.
- Caires, S., H. de Waal, J. Groeneweg en K. Roscoe (2010). Positioning of the WTI 2011 wind fields. Comparison between applied wind speeds and speeds from alternative approaches. Deltares, WTI, project 1202120-003-HYE-0004. Juli 2010.
- 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.
- De Haan, L en S.I. Resnick (1977). Limit theory for multivariate sample extremes, *Z.Warscheinlichkeitstheorie verw. Gebiete* 40.
- Den Heijer, F., F.L.M. Diermanse, P.H.A.J.M. van Gelder (2005): Extreme wave statistics using Regional Frequency Analyses., *ISSH - Stochastic Hydraulics* 2005.
- Den Heijer, F., R.J. Vos, F.L.M. Diermanse, J. Groeneweg, R.Tonis (2007). Achtergrondrapport HR2006 voor de Zee en Estuaria, Hydraulische Randvoorwaarden 2006. Rapport RIKZ/2006.029, 30 mei 2007.
- De Valk, C.F. (1996). Estimation of the frequencies of failure of coastal structures from offshore data of environmental loads, WL-rapport H2240.

- De Waal, H (2009). WTI 2011 Wind input to be used in HBC production runs, Deltares report 1200103-027-HYE-0001, December 2009.
- Diermanse, F.L.M. (2012). Hydraulische Randvoorwaarden voor duinen op de Waddeneilanden. Bepalen van toetswaarden voor waterstand, golven en korreldiameters in het kader van WTI2011. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0013, januari 2012.
- Diermanse, F.L.M., D.J. Walstra, B.J.A. Huisman, P. van Geer, A. Smale (2011). Detailtoets voor duinafslag, Afleiden van de rekenregel voor duinen op Waddeneilanden ten behoeve van WTI2011. SBW-Duinen. Deltares rapport 1202124-003-HYE-0001, dd 11 maart 2011.
- Dillingh, D. en J. de Lima Rego (2010). Toets- en Rekenpeilen Kust en Estuaria ten behoeve van de HR2011. WTI-HRzout. Deltares rapport 1202341-002-HYE-0060, dd 9 november 2010.
- Dillingh, D., L. de Haan, R. Helmers, G.P. Kohnen en J. van Malde (1993). De basispeilen langs de Nederlandse kust, Statistisch onderzoek, rapport DGW-93.023. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag, april 1993.
- Eslami Arab, S. en J. Groeneweg (2009). Method for determining offshore boundary conditions in SWAN computations for HBC calculations. Deltares memo 1200103-021-HYE-0012, dd 30 december 2009.
- Gautier, C. (2010). SWAN Calibration and Validation for HBC2011. Deltares rapport 1200103-020-HYE-0002. 27 mei 2010.
- Gautier, C. en J. Groeneweg (2009). Aansturingsdocument SWAN voor HR 2011. Deltares rapport 1200103-021-HYE-0005. 12 december 2009.
- Groeneweg, J. (2004). HR Afsluitdijk. WL | Delft Hydraulics rapport H4456, juni 2004.
- Groeneweg, J. (2010). Aangepaste bodem Westerschelde. Deltares memo 1202341-002-HYE-0014 dd 18 maart 2010.
- Groeneweg, J. en J. van Os (2009). Bodem voor productiesommen HR Waddenzee. Deltares memo 1200103-021-HYE-0006, d.d. 26 november 2009.
- Groeneweg, J. en C. Gautier (2011). Verschilanalyse concept HR 2011 en HR 2006 voor de harde keringen in de Westerschelde. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0014, mei 2011.
- Groeneweg, J. en C. Gautier (2012). Verschilanalyse concept HR 2011 en HR 2006 voor de harde keringen in de Waddenzee. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0034, februari 2012.
- Groeneweg, J., A. J. van der Westhuysen, G. P. van Vledder, S. Jacobse, J. Lansen, and A.R. van Dongeren (2008). Wave modelling in a tidal inlet: Performance of SWAN in the Wadden Sea. Proc. 31th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, 411–423.

- HR2006 (2007). Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Water, Den Haag. September 2007.
- Klein, M.D. en J. Kroon (2011a). Productieberekeningen Westerschelde voor WTI-2011: rapportage Fase 1. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1874.10, februari 2011.
- Klein, M.D. en J. Kroon (2011b). Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 1. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.20, mei 2011.
- KNMI (2005). Vergelijk HYDRA-K versus "windklimaat 1983", KNMI in opdracht van WL| Delft Hydraulics en RIKZ, augustus 2005.
- Kohsiek, L.H.M (1984). De korrelgrootte karakteristiek van de zeereep (stuifdijk) langs de Nederlandse kust, Rijkswaterstaat Nota WKZ-84G.282.
- Kroon, J. en M.D. Klein (2011a). Productieberekeningen Westerschelde voor WTI-2011: rapportage Fase 2. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1874.10, februari 2011.
- Kroon, J. en M.D. Klein (2011b). Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 2. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.20, mei 2011.
- Lopez de la Cruz, J., A. Tijssen en J. Beckers (2010). The evolution of storms on the Wadden Sea.. Deltares report 1200264-004-HYE-0012, dd 12 januari 2010.
- Nicolai, R.P. (2010). Memorandum 67. m.m.v. Abe Hoekstra en Jan Stijnen, HKV LJN IN WATER / Alkyon PR1564.10/A2206 dd 7 december 2010.
- Nicolai, R.P. (2011). Probabilistische berekeningen Westerschelde voor WTI-2011. HKV Lijn in Water rapport PR1875.10, april 2011.
- Nicolai, R.P. en M. Duits (2009). Referentieversie Hydraulische Randvoorwaarden in de Waddenzee. HKV LJN IN WATER rapport PR1719.10. Juli 2009.
- Nicolai, R.P. en D. van Haaren (2011). Probabilistische berekeningen Waddenzee voor WTI-2011. HKV Lijn in Water rapport PR1873.10, september 2011.
- Nicolai, R.P. Mark Klein, Anna Kroon, Maarten-Jan Kallen en Job Verkaik (2011). Productieberekeningen Waddenzee fase 3. HKV LJN IN WATER & Svašek Hydraulics Rapport PR1872.14 dd augustus 2011.
- Philippart, M.E., S.T. Pwa en J.G. de Ronde (1993). De basispeilen langs de Nederlandse kust; fysisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Rapport DGW-93.025
- Philippart, M. E. , D. Dillingh en S.T. Pwa (1995). De basispeilen langs de Nederlandse kust: de ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen. Rapport RIKZ-95.008. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag, mei 1995.

- Rego, J.R. (2010). Hydrodynamic production runs with Kuststrook model: 360 surge scenarios. Deltares memo 1200103-024-HYE-0002, d.d. 26 March 2010.
- Roscoe, K. (2009a). Assessment of the still-water-level 1/10,000 years return values used in the current Hydraulic Boundary Conditions. Deltares report 1200103-041-HYE-0003, dd 18 november 2009.
- Roscoe, K. (2009b). Extreme off-shore wave statistics in the North Sea. Extension of the measurement time series and revision of the methodology. Deltares report 1200103-042, 19 November 2009.
- Roscoe, K. (2010). Offshore wave statistics: compilation of multivariate files. Deltares Memo 1200103-042-HYE-0006 dd 5 maart 2010.
- Roskam, A.P., J.Hoekema en J.J.W. Seijffert (2000). Richtingsafhankelijke extreme warden voor HW-standen, golfhoogte en golfperioden, rapport RIKZ/2000.040, Rijkswatestaat RIKZ, Den Haag, December 2000.
- Rijkoort, P. J. (1983). Wetenschappelijk Rapport 83 – 13. A compound Weibull model for description of surface wind velocity distributions.
- Ruessink, B.G., D.J.R. Walstra and H.N. Southgate (2003). Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches. Coastal Engineering, Volume 48, Issue 3, June 2003, Pages 139-149.
- Smale, A. en J. Beckers (2011). Aangepaste Q-variant binnen Hydra-K, verloop golfcondities, belastingfuncties en externe testronde. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0029, dd 31 augustus 2011.
- Spee, E. en D. Vatvani (2009). Evaluatie van de nieuwe bodem V61-04 voor het Kuststrookmodel. Deltares rapport 1200103-023, December 2009.
- Stijnen, J.W., B.I. Thonus, F.L.M. Diermanse, C.P.M. Geerse en R.P. Nicolai (2011). Hydra-K versie 3.6.3. Functionele documentatie versie WTI-2011. HKV [LIJN IN WATER](#) / Alkyon PR1564, Lelystad, juni 2011.
- Stijnen, J.W. en M.J. Kallen (2010). Diepwaterrandvoorwaarden WTI-2011 (ELD, EUR, YM6, SCW, SON). HKV rapport, PR1759.10 dd februari 2010.
- SWAN team (2008). SWAN User Manual.
- TAW (1984). Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, Technische adviescommissie voor de waterkeringen, mei 1984.
- Van der Klis, H., J. Groeneweg en H.Chbab (2010). Ketenbeschrijvingen HR-2011 t.b.v. ENW-Klankbordgroepvergadering 19 januari 2010. Deltares rapport 1200103-000-ZWS-0015 dd 14 januari 2010.
- Van der Westhuysen, A.J. and E. Elias (2010). Validation of wave-current interaction modeling in the Western Scheldt and the Columbia River Mouth. Deltares report 1202120-004-HYE-0003, June 2010.

- Van Marle, J. (2005). Basis Hydra-K; rapport RIKZ, augustus 2005 (geactualiseerde versie van RIKZ/99.020, J.G.A van Marle)
- Van Marle, J., F.L.M. Diermanse, F. den Heijer, R. Tonis (2007). Basis van de rekenmethode in HYDRA-K, RIKZ/2007.015, dd 27 april 2007.
- Van Urk, A. (1993). De basispeilen langs de Nederlandse kust, Eindverslag, rapport DGW-93.026, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag, april 1993.
- Waterwet (2009) . Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 18 december, 2009.
- Weerts, A.H. en F. Diermanse (2004a). Golfstatistiek op diep water 2002, Fase 2: Samenstellen bestanden simultane waarnemingen, WL| Delft Hydraulics report Q3770, oktober 2004.
- Weerts, A.H. en F.L.M. Diermanse (2004b). Golfstatistiek op relatief diep water 1979-2002. WL | Delft Hydraulics Report Q3770, December 2004.
- Wieringa, J. en P. J. Rijkooft (1983). Windklimaat van Nederland. KNMI
- Witteveen en Bos (2010). Hindcast verification of SWAN in the Western Scheldt. Witteveen + Bos report DT311-1, 24 March 2010.
- WL en TNO (2004). Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 3: Indicateive bepaling van de nauwkeurigheid. WL| Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, februari 2004.





## A Rekenvoorbeeld methode ‘De Haan’

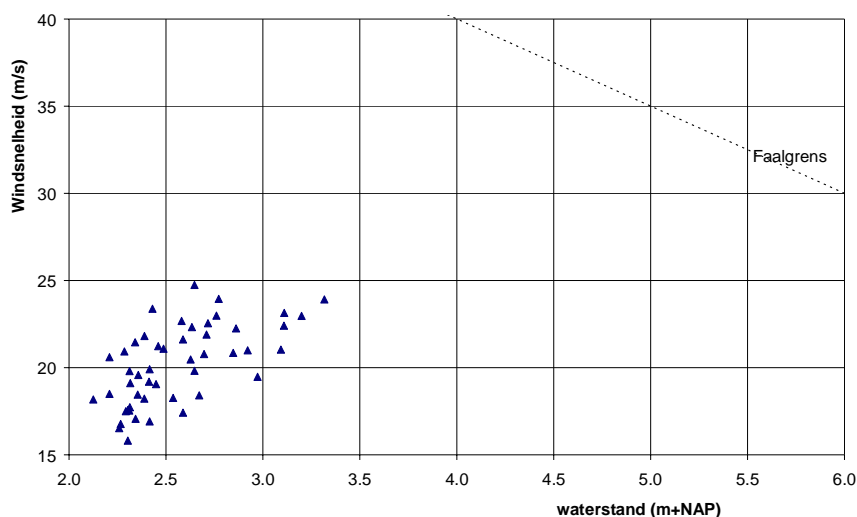
In Hoofdstuk 4 beschrijven we de probabilistische rekenmethode van het programma Hydra-K: de methode “De Haan”. Deze bijlage geeft een getallenvoorbeeld om het principe van deze methode te illustreren. Het is een fictief getallenvoorbeeld, maar met realistische waarden. Deze bijlage is geïnspireerd op een eerder rekenvoorbeeld van dhr. Vrouwenfelder (WL & TNO Bouw, 2004).

Uitgangspunt is een fictieve simultane meetreeks van wind en waterstand (Figuur A.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. Merk op dat dit niet betekent dat dit allemaal jaarmaxima zijn.

In de figuur is ook een (fictieve) faalgrens weergegeven:

$$U + 5H = 60 \quad (\text{A.1})$$

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 A.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 eerst de overschrijdingskans bepaald op basis van de marginale verdeling (zie hoofdstuk 7). In dit voorbeeld is de wind- en waterstand statistiek van locatie Hoek van Holland toegepast. 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.

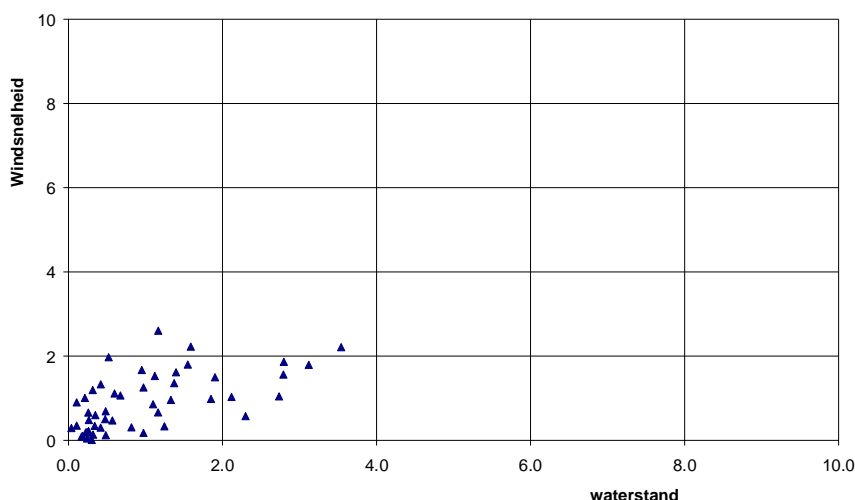
De vertaling naar standaard-exponentieel verdeelde variabelen is vrij eenvoudig. Stel dat we een waterstand beschouwen met een jaarlijkse overschrijdingskans van 1 op 10, ofwel 0.1. Bij de vertaalslag kiest de methode de standaard-exponentieel verdeelde variabele met dezelfde overschrijdingskans. De standaard exponentiële verdelingsfunctie is als volgt:

$$F(x) = 1 - e^{-x} \tag{A.2}$$

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:

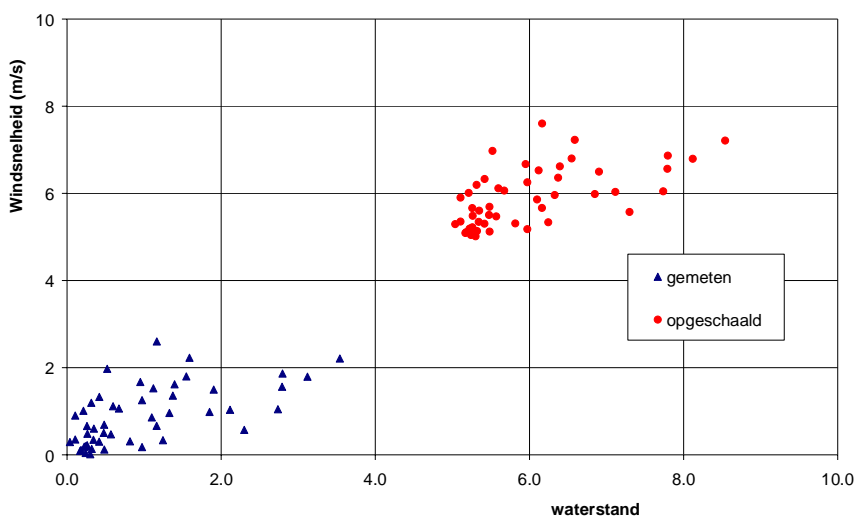
$$0.9 = 1 - e^{-x} \Rightarrow x = -\ln(0.1) \approx 2.3 \tag{A.3}$$

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.



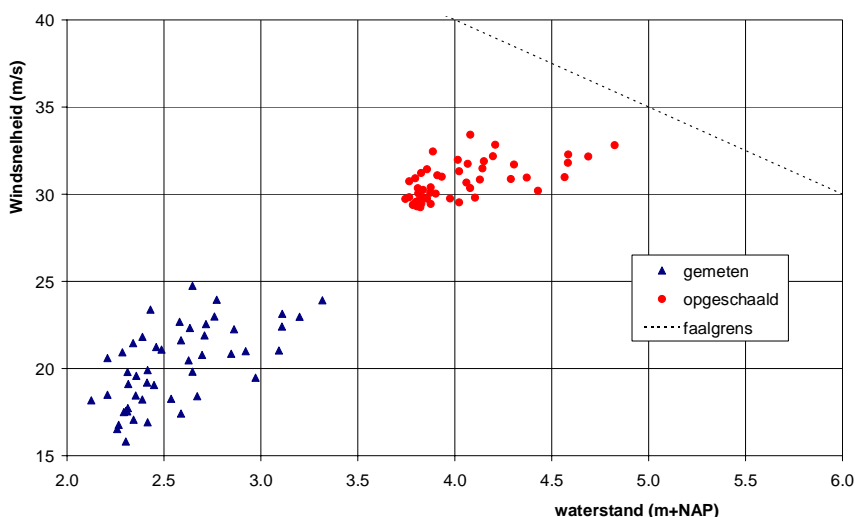
Figuur A.2 Naar de standaard exponentiële ruimte getransformeerde waarnemingen uit Figuur A.1.

Vervolgens worden de waarden in deze zogenaamde “standaard exponentiële ruimte” opgeschaald met een, vooralsnog onbekende, waarde  $\nu$ . Dat betekent dat zowel bij de (standaard exponentiële) windsnelheid als bij de (standaard exponentiële) waterstand een waarde  $\nu$  opgeteld wordt. In de figuur betekent dit dat de puntenwolk onder een hoek van 45 graden wordt getransleerd over een lengte  $\nu$ , waarbij de vorm van de wolk behouden blijft. Figuur A.3 laat het voorbeeld zien van een verschuiving met een  $\nu$ -waarde gelijk aan 5.



Figuur A.3 Opscalen in de standaard exponentiële ruimte.  $\nu = 5$

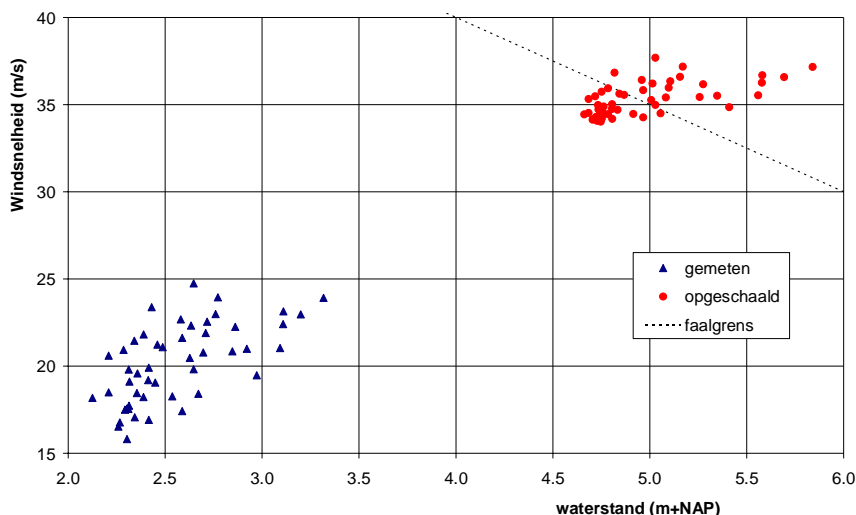
Na opschaling in de standaard exponentiële ruimte worden de opgeschaalde standaard exponentieel verdeelde variabelen weer terug vertaald naar “werkelijke” waarden. Daartoe wordt exact de omgekeerde vertaalslag toegepast als eerder. Met andere woorden: stel dat we een standaardexponentiële waarde beschouwen met een jaarlijkse overschrijdingskans van 1 op 10, ofwel 0.1, dan hoort daarbij een waterstand (of windsnelheid) met dezelfde overschrijdingskans. De overschrijdingskansen van de wind en waterstand worden weer bepaald op basis van de marginale verdelingen uit hoofdstuk 7. Figuur A.4 toont de aldus verkregen verzameling opgeschaalde waarden na vertaling van de standaard exponentiële waarden uit Figuur A.3. Uit Figuur A.4 blijkt dat de oorspronkelijke puntenwolk van waarnemingen (blauwe driehoeken) van vorm veranderd is na opschaling (rode cirkels).



Figuur A.4 Opscalen in de werkelijke ruimte.  $\nu = 5$

Figuur A.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  $\nu$  te

kiezen. Figuur A.5 laat zien dat bij  $\nu$  gelijk aan 8 er wel een aantal (21) punten in het faalgebied terecht komt.



Figuur A.5 Opschalen in de werkelijke ruimte.  $\nu = 8$

Nu kan de faalkans (faalfrequentie) van de kering berekend worden met formule (4.1). In dit rekenvoorbeeld geeft dit als uitkomst

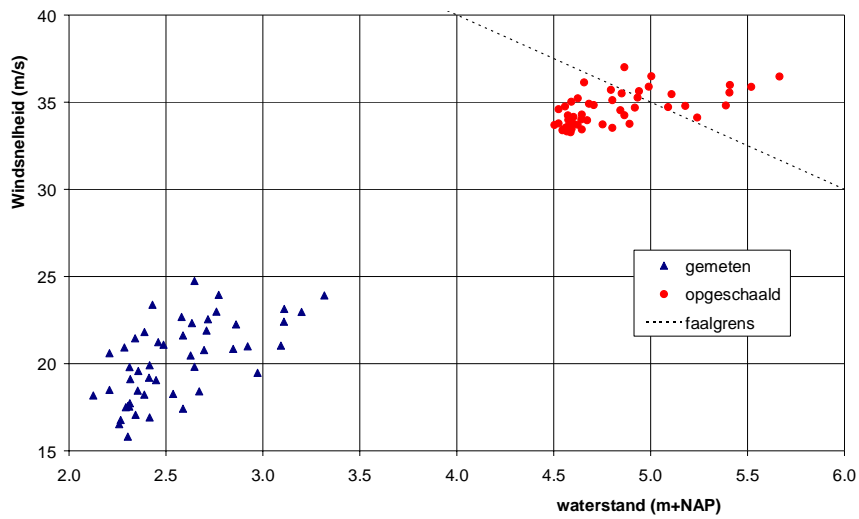
$$\mu = \frac{21}{50} e^{-8} = 1.41 * 10^{-4}$$

ofwel een geschatte herhalingstijd van 7100 jaar.

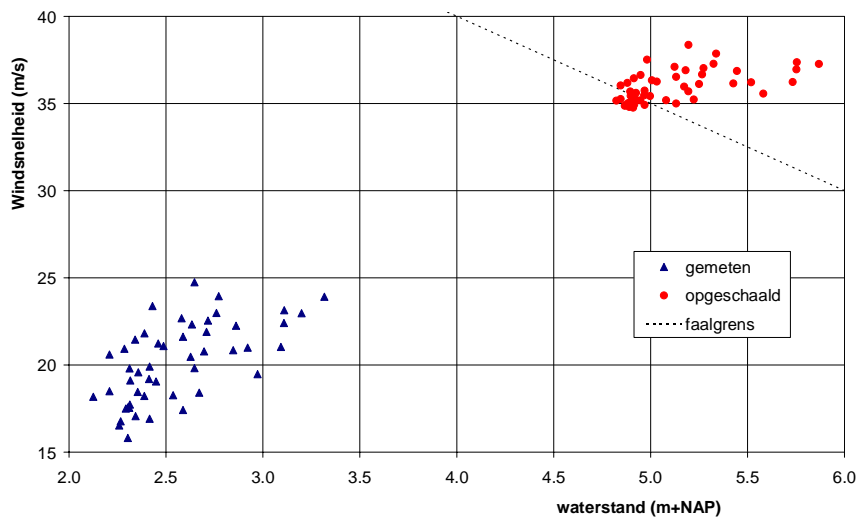
De keuze van  $\nu$  in het bovenstaande verhaal is enigszins willekeurig geweest. Tabel A.1 en Figuren A.6 en A.7 tonen aan dat bij een relatief kleine verandering in de waarde van  $\nu$  de verandering in  $\kappa$  beperkt is en de uitkomst van de geschatte faalfrequentie nauwelijks verandert. Echter, 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  $\nu$  te kiezen waarvoor het aantal waarnemingen in het faalgebied gelijk is aan  $\kappa$ , waarbij  $\kappa$  een getal is dat door de gebruiker ingevoerd wordt. De default waarde is  $\kappa=50$ .

Tabel A.1 Resultaten voor verschillende waarden van  $\nu$

$\nu$	7.5	8	8.5
$\kappa$	13	21	35
$\Delta$	50	50	50
$\mu$	1.44E-04	1.41E-04	1.42E-04
herhalingstijd	6954	7098	7021



Figuur A.6 Opscalen in de werkelijke ruimte.  $v = 7.5$



Figuur A.7 Opscalen in de werkelijke ruimte.  $v = 8.5$



## B Vergelijkingen afslagprofiel volgens afslagmodel D++

Ten opzichte van het duinafslagmodel DUROS+ is voor D++ de functie van het parabolische afslagmodel opnieuw afgeleid op basis van de historische duinafslagexperimenten, zie Diermanse et al. (2011). Waar DUROS+ alleen geschikt is voor invoer in termen van golfhoogten en golfperioden op relatief diep water, kunnen in D++ dezelfde golfparameters op ondiep water worden toegepast. Dit heeft geresulteerd in de volgende vergelijkingen voor het parabolische afslagprofiel tussen de duinvoet P en de voet van het afslagprofiel N. De vergelijking met de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  is toepasbaar voor alle spectrumvormen:

$$\frac{7,6}{H_{m0}} y = 0,6 \left[ \left( \frac{7,6}{H_{m0}} \right)^{1,28} \left( \frac{10,8}{T_{m-1,0}} \right)^{0,45} \left( \frac{w_s}{0,0268} \right)^{0,56} x + 50 \right]^{0,5} - 4,2 \quad (\text{B.1})$$

waarin x en y de horizontale en verticale coördinaat (in m) zijn ten opzichte van het punt waar het stormvloedpeil het eindprofiel raakt (zie Figuur B.1). De vergelijking met de piekperiode  $T_p$  is alleen toepasbaar voor een standaard enkeltoppig golfspectrum:

$$\frac{7,6}{H_{m0}} y = 0,6 \left[ \left( \frac{7,6}{H_{m0}} \right)^{1,28} \left( \frac{12}{T_p} \right)^{0,45} \left( \frac{w_s}{0,0268} \right)^{0,56} x + 50 \right]^{0,5} - 4,2 \quad (\text{B.2})$$

De lengte van het parabolische afslagprofiel wordt beschreven met de volgende vergelijking:

$$x_{\max} = 270 c_f \left( \frac{H_{m0}}{7,6} \right)^{1,28} \left( \frac{0,0268}{w_s} \right)^{0,56} \quad (\text{B.3})$$

In deze vergelijking komt de coëfficiënt  $c_f$  voor, die betrekking heeft op de positie van het randvoorwaardenpunt. Deze coëfficiënt wordt bepaald door de verhouding tussen de golfhoogte  $H_{m0}$ , die als randvoorwaarde wordt opgelegd, en de waterdiepte die ter plaatse van deze golfhoogte aanwezig is:

$$\gamma = \frac{H_{m0}}{d} \quad (\text{B.4})$$

waarbij:

$\gamma$  : verhouding golfhoogte / waterdiepte [-]  
 $d$  : waterdiepte [m]

De coëfficiënt  $c_f$  wordt als volgt berekend:

$$c_f = \Delta \cdot \max \left[ \left( \frac{15}{d} + 0,11 \right); 1 \right] + (1 - \Delta) \quad (\text{B.5a})$$

waarbij  $\Delta$  de coëfficiënt is die het effect van golfbreking in rekening brengt:

$$\begin{aligned} \Delta &= 0 && \text{als } \gamma \leq 0,4 \\ \Delta &= \frac{\gamma - 0,4}{0,06} && \text{als } 0,4 < \gamma \leq 0,46 \\ \Delta &= 1 && \text{als } \gamma > 0,46 \end{aligned} \quad (\text{B.5b})$$

In normale gevallen wordt aanbevolen om een golfrandvoorwaarde te kiezen op een locatie waarvoor geldt dat  $\gamma$  kleiner is dan 0,4. Dit betekent dat er sprake is van zeer weinig breking. In de probabilistische berekeningen komen er echter situaties (trekkingen) voor met hogere waarden voor de  $\gamma$ . Door de beperking die wordt opgelegd door vergelijking (B.5) wordt een realistische uitkomst van de probabilistische berekeningen gewaarborgd. De diepte op de voet van het parabolische afslagprofiel N luidt bij gebruik van de spectrale golfperiode als volgt:

$$y_{\max} = \left\{ 0,6 \left[ 270 c_f \left( \frac{10,8}{T_{m-1,0}} \right)^{0,45} + 50 \right]^{0,5} - 4,2 \right\} \left( \frac{H_{m0}}{7,6} \right) \quad (\text{B.6})$$

Indien gebruik wordt gemaakt van de piekperiode luidt deze vergelijking:

$$y_{\max} = \left\{ 0,6 \left[ 270 c_f \left( \frac{12}{T_p} \right)^{0,45} + 50 \right]^{0,5} - 4,2 \right\} \left( \frac{H_{m0}}{7,6} \right) \quad (\text{B.7})$$

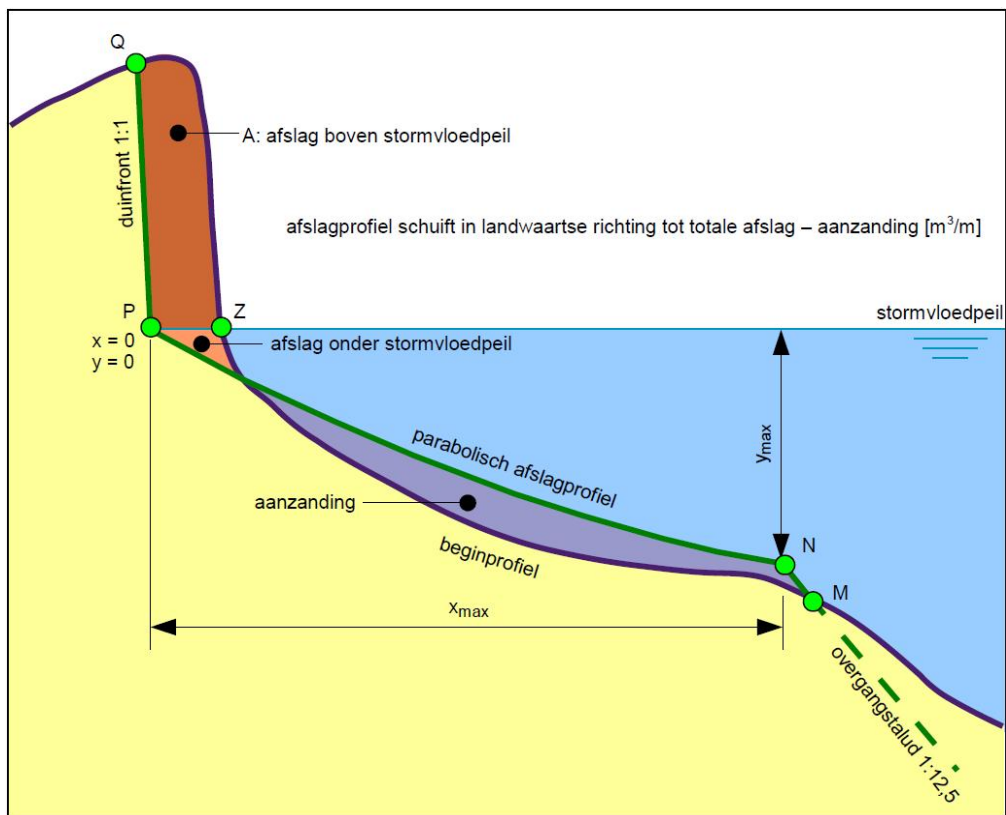
Evenals de detailtoets DUROS+ is de detailtoets D++ geldig voor de spectrale golfperiode  $10,8 \text{ s} \leq T_{m-1,0} \leq 18 \text{ s}$  of piekperiode  $12 \text{ s} \leq T_p \leq 20 \text{ s}$ .

Het morfologische afslagmodel D++ komt het best tot zijn recht indien de golfrandvoorwaarden zo dicht mogelijk bij de duinwaterkering liggen, maar wel zeewaarts van de brandingszone. Als de golfrandvoorwaarden binnen de brandingszone liggen, kan dit tot gevolg hebben dat de hoeveelheid lange golfenergie wordt onderschat. Daarom is het volgende criterium opgesteld voor het punt waar de golfrandvoorwaarden worden opgelegd:

$$\frac{H_{m0}}{d} < 0,29 kd + 0,25 \quad (\text{B.8})$$

waarin  $d$  de waterdiepte in [m] en  $k$  het golfgetal ( $2\pi/L$  met  $L$  de golflengte in [m]).

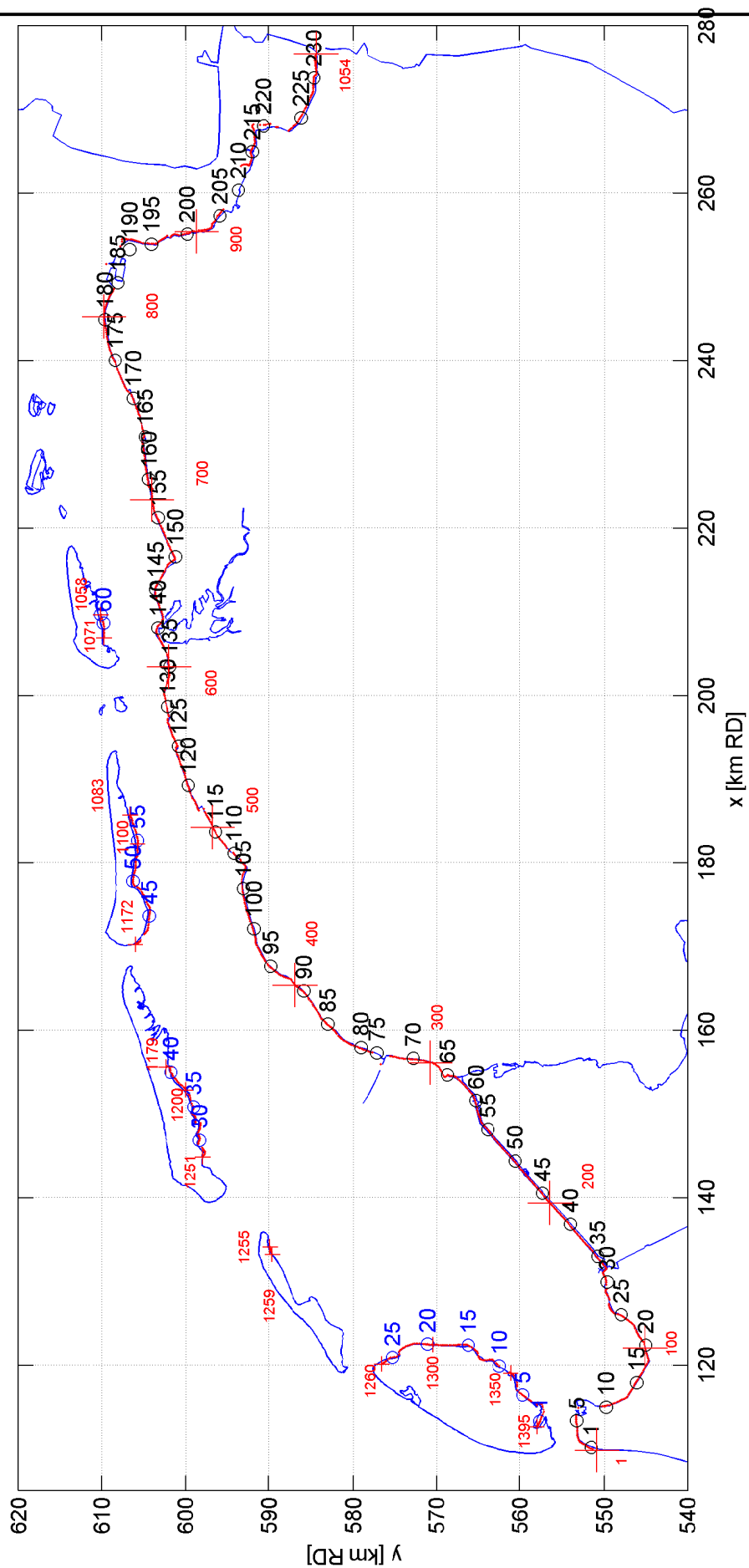




Figuur B.1 Het afslagprofiel na afloop van een storm (bron: Boers, 2011)



## **C Figuren**



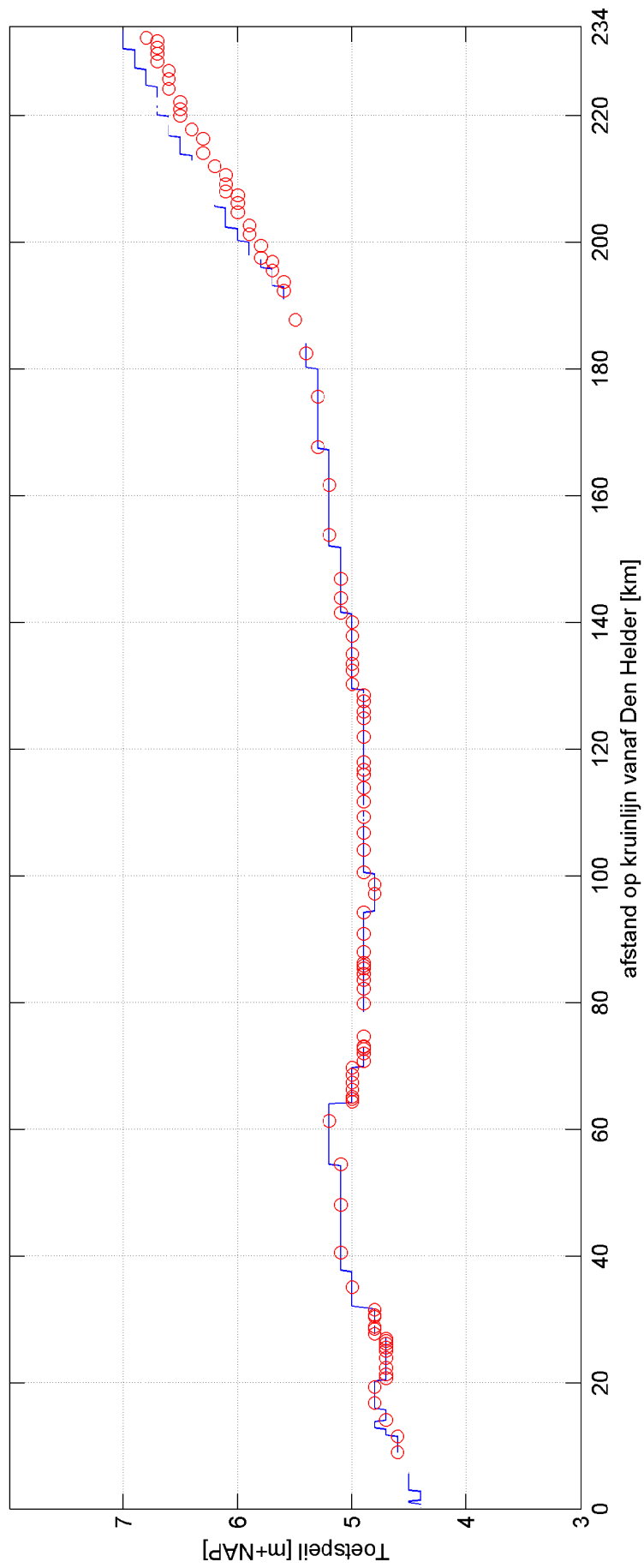
Kilometrering van kruinlijn (o) in de Waddenzee  
 vanaf Den Helder over vaste land (zwart)  
 en vanaf Texel over eilanden (blauw)  
 rood: uitvoerpunten Hydra 2011

Achtergronddocument WTI 2011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.3



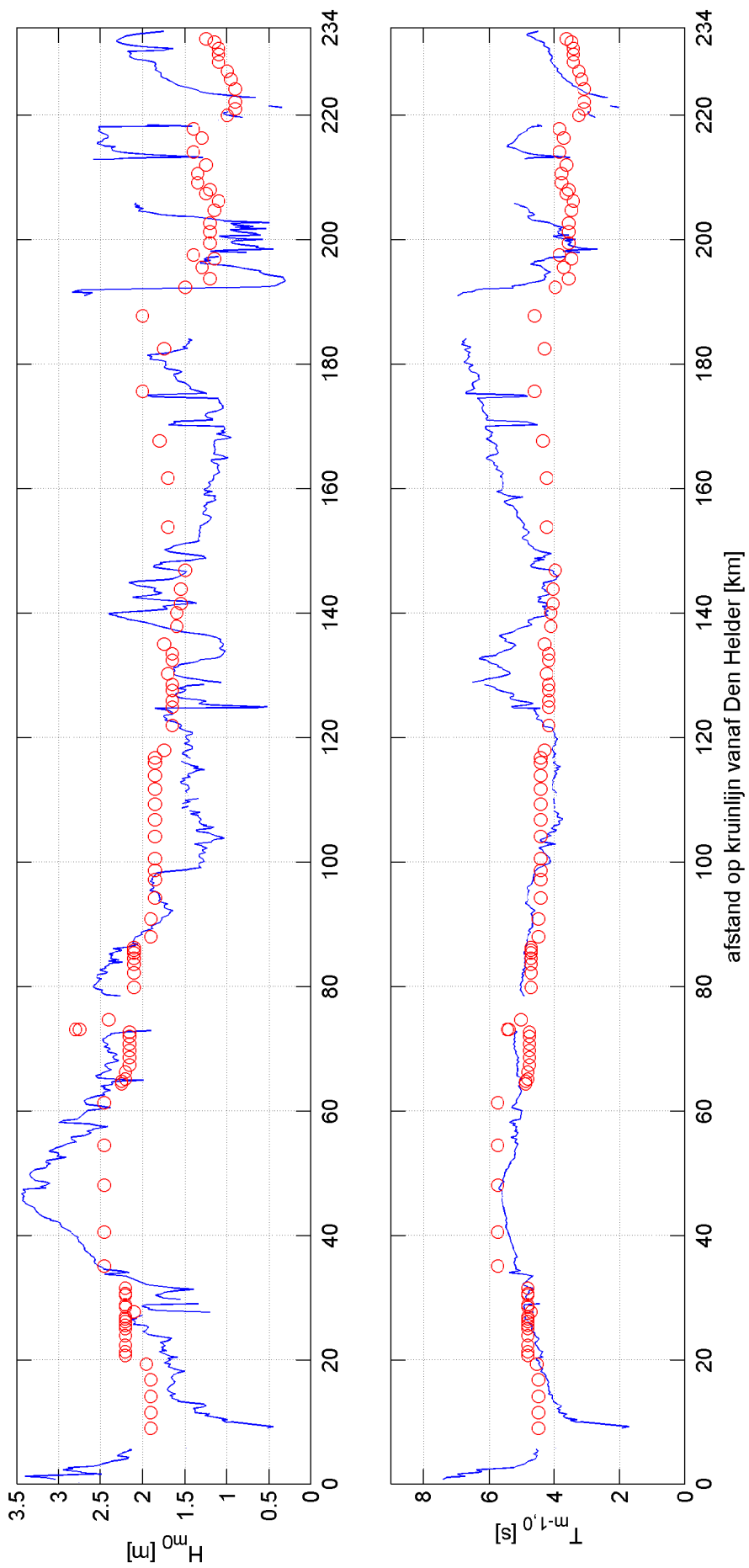
Hydra 2011 (blauw) en HR 2006 (rood)  
op vaste land Waddenzee

Achtergronddocument WTI 2011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.4



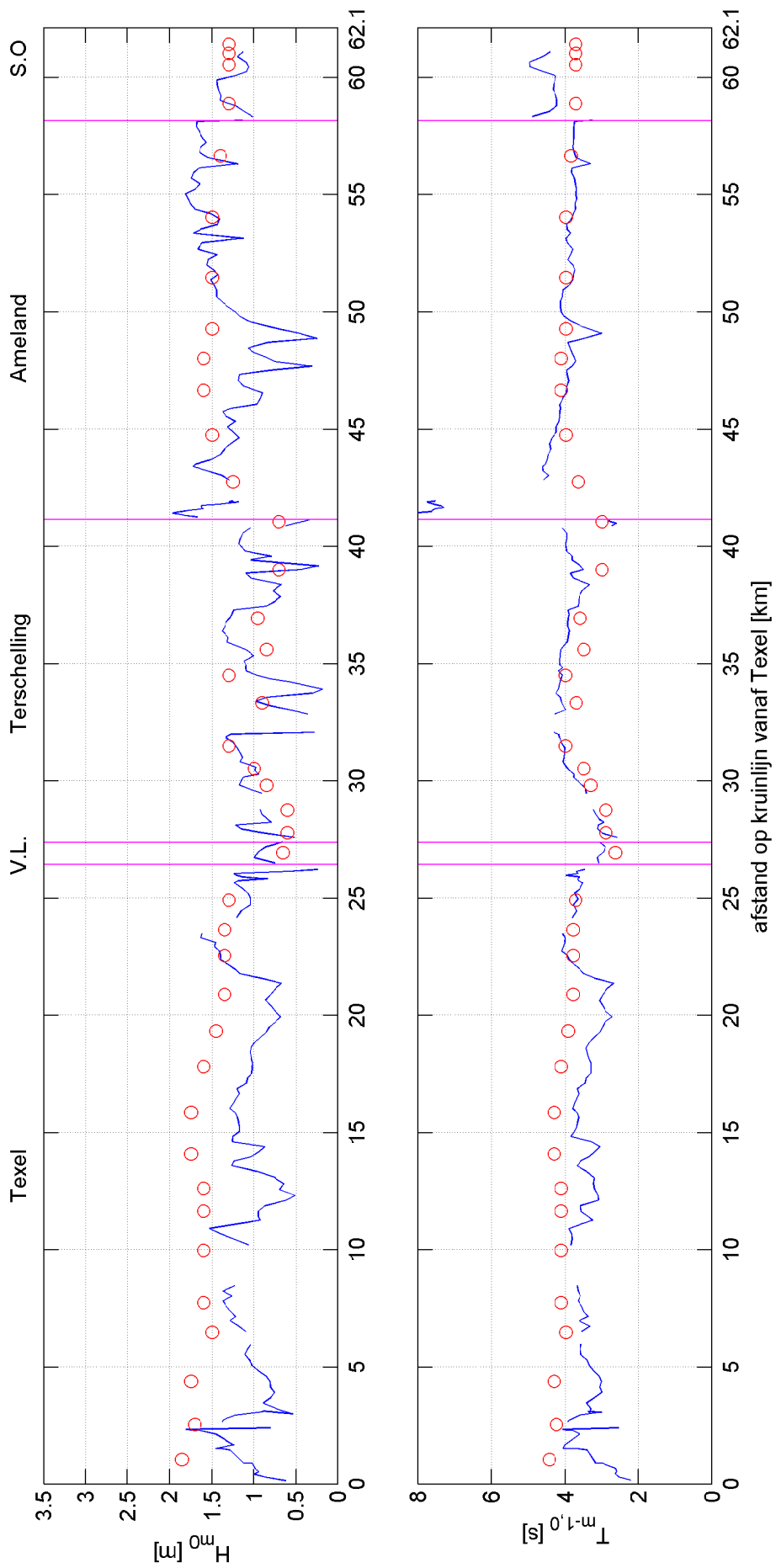
Hydra 2011 (blauw) en HR 2006 (rood)  
op vaste land Waddenzee

Achtergronddocument WTI 2011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.5.a



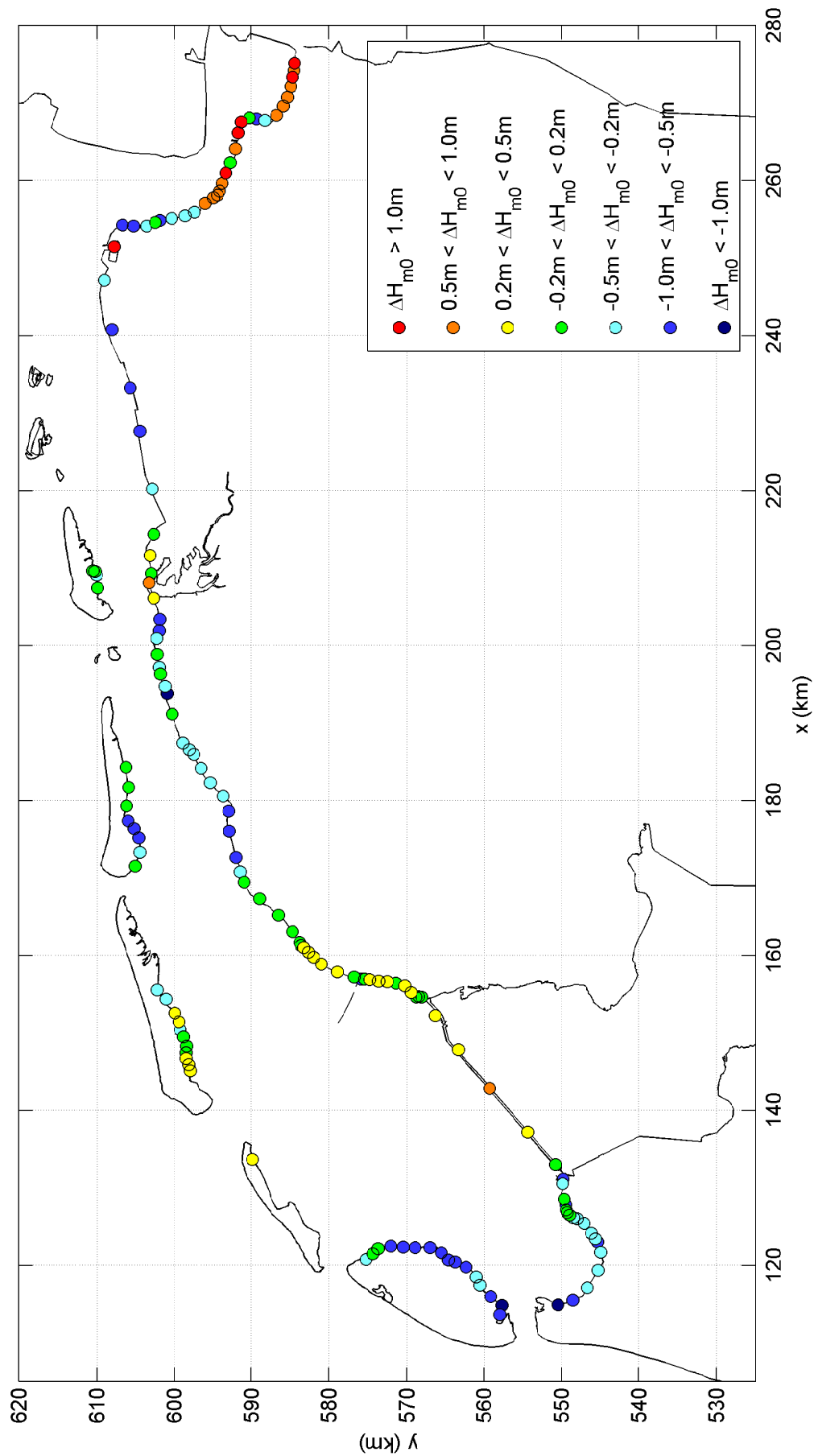
Hydra 2011 (blauw) en HR 2006 (rood)  
op Waddeneilanden

Achtergronddocument WTI 2011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.5.b



Vershil in  $H_{m0}$ : Hydra 2011 - HR 2006

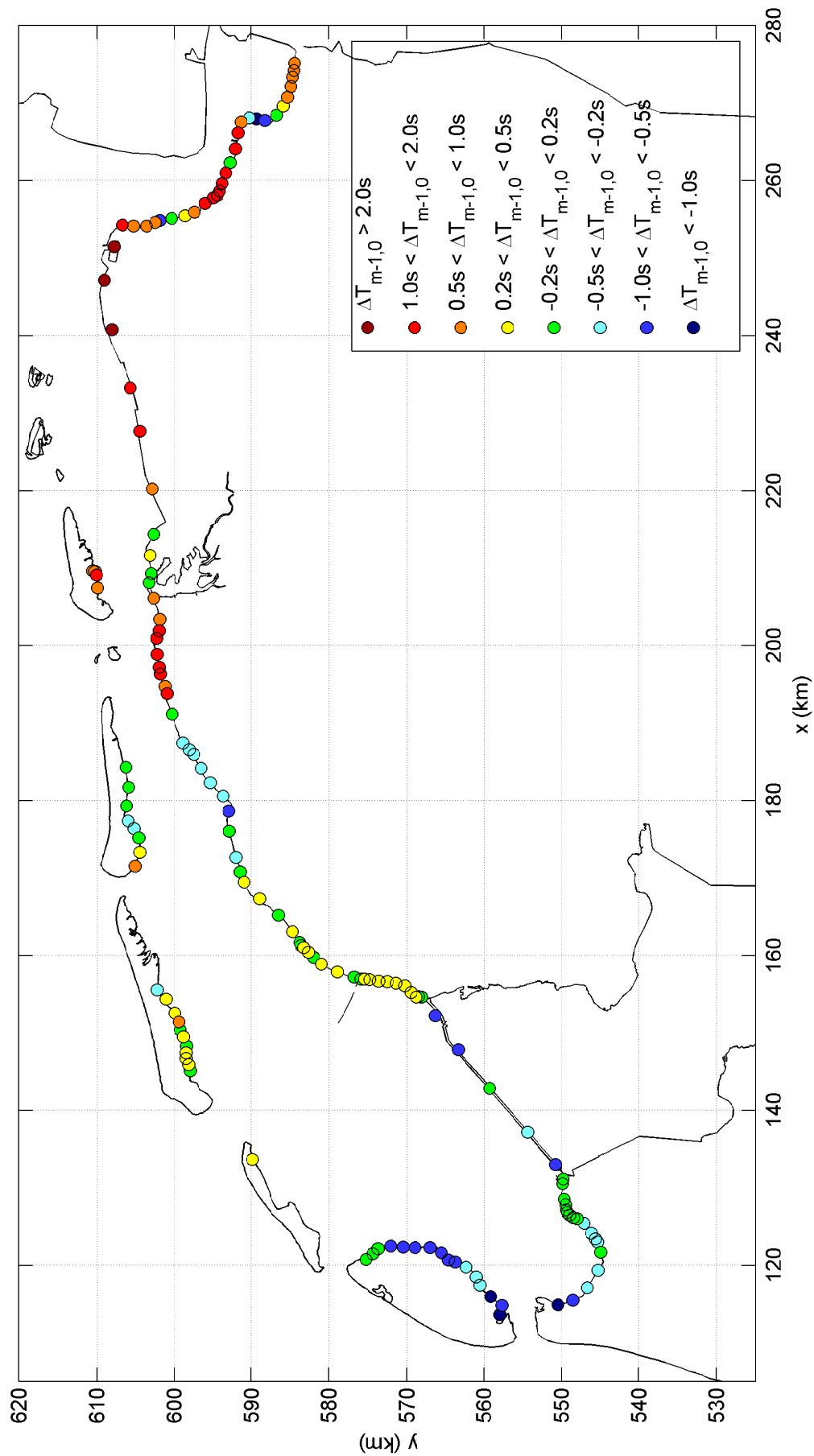
Achtergronddocument WT12011

DELTAES

1204143-002

Fig 9.6





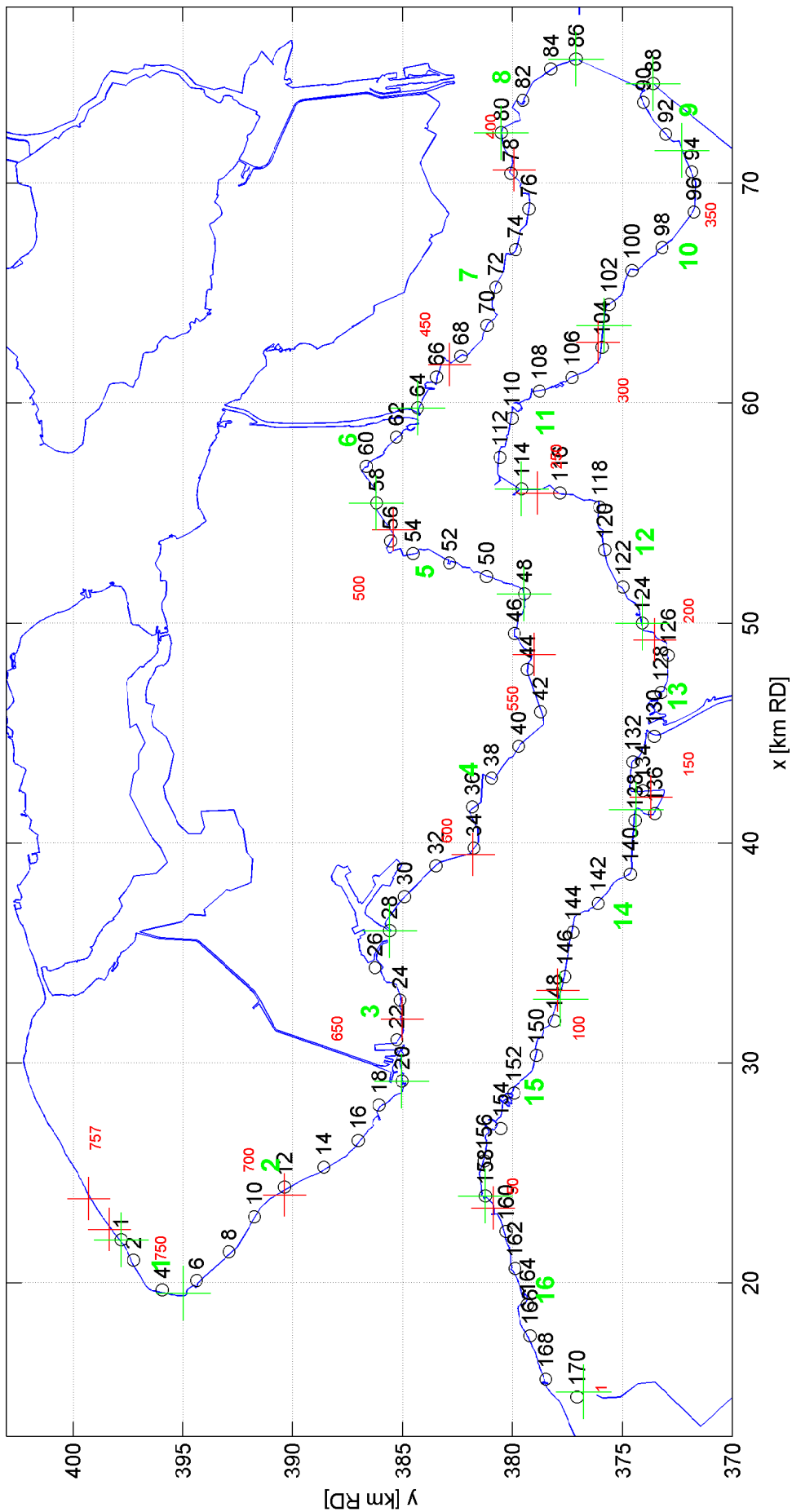
Vershil in  $T_{m-1,0}$ : Hydra 2011 - HR 2006

Achtergronddocument WT12011

**DELTA**RES

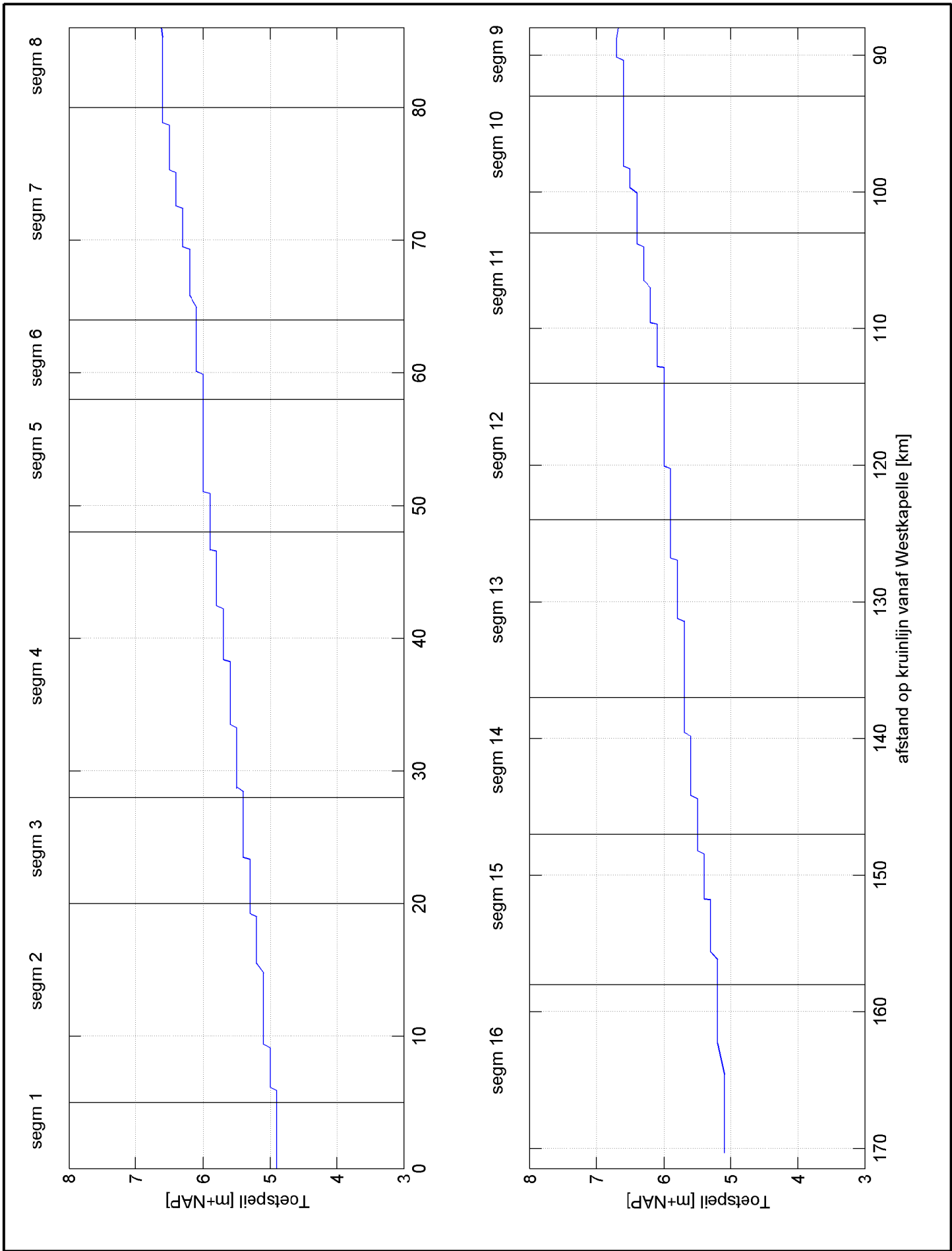
1204143-002

Fig 9.7



Kilometrerung van kruinlijn (o) in de Westerschelde  
 rood: uitvoerpunten Hydra 2011  
 groen: segmentdindeling

Achtergronddocument WTI 2011



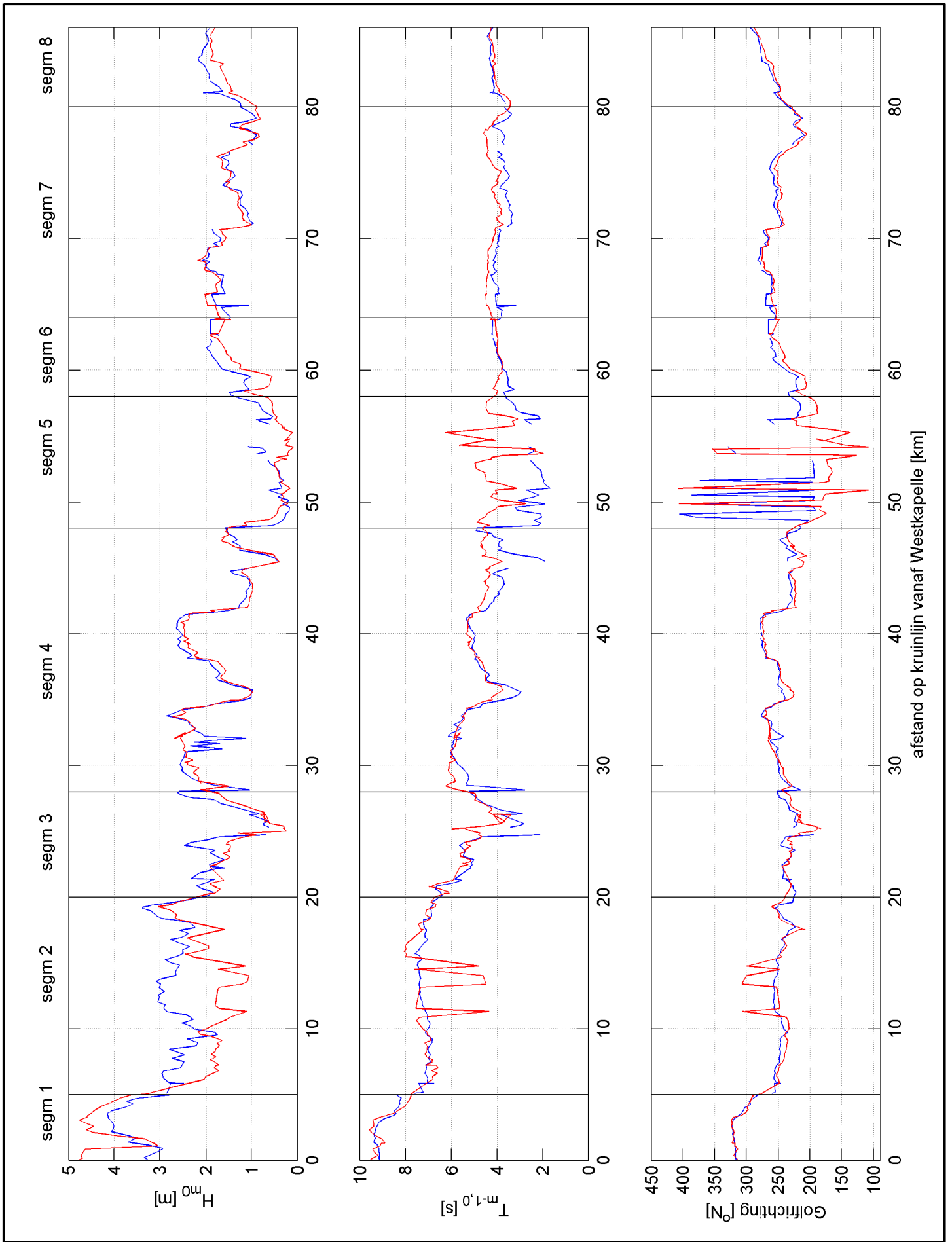
Hydra 2011 (blauw)  
op noord- en zuidoever Westerschelde

Achtergronddocument WTI 2011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.10



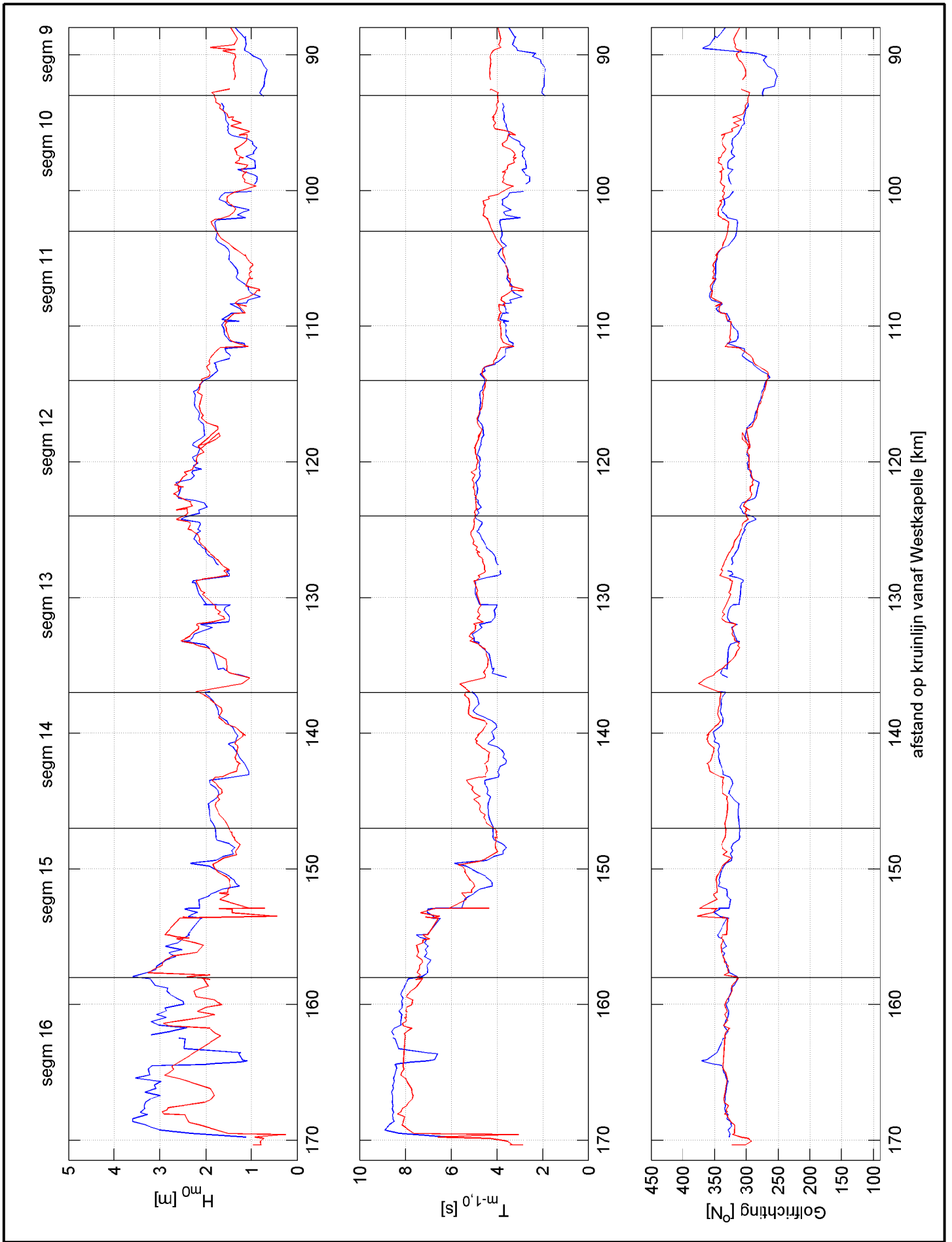
Hydra 2011 (blauw) en Hydra 2006 (rood)  
op noordoever Westerschelde

Achtergronddocument WTI 2011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.11.a



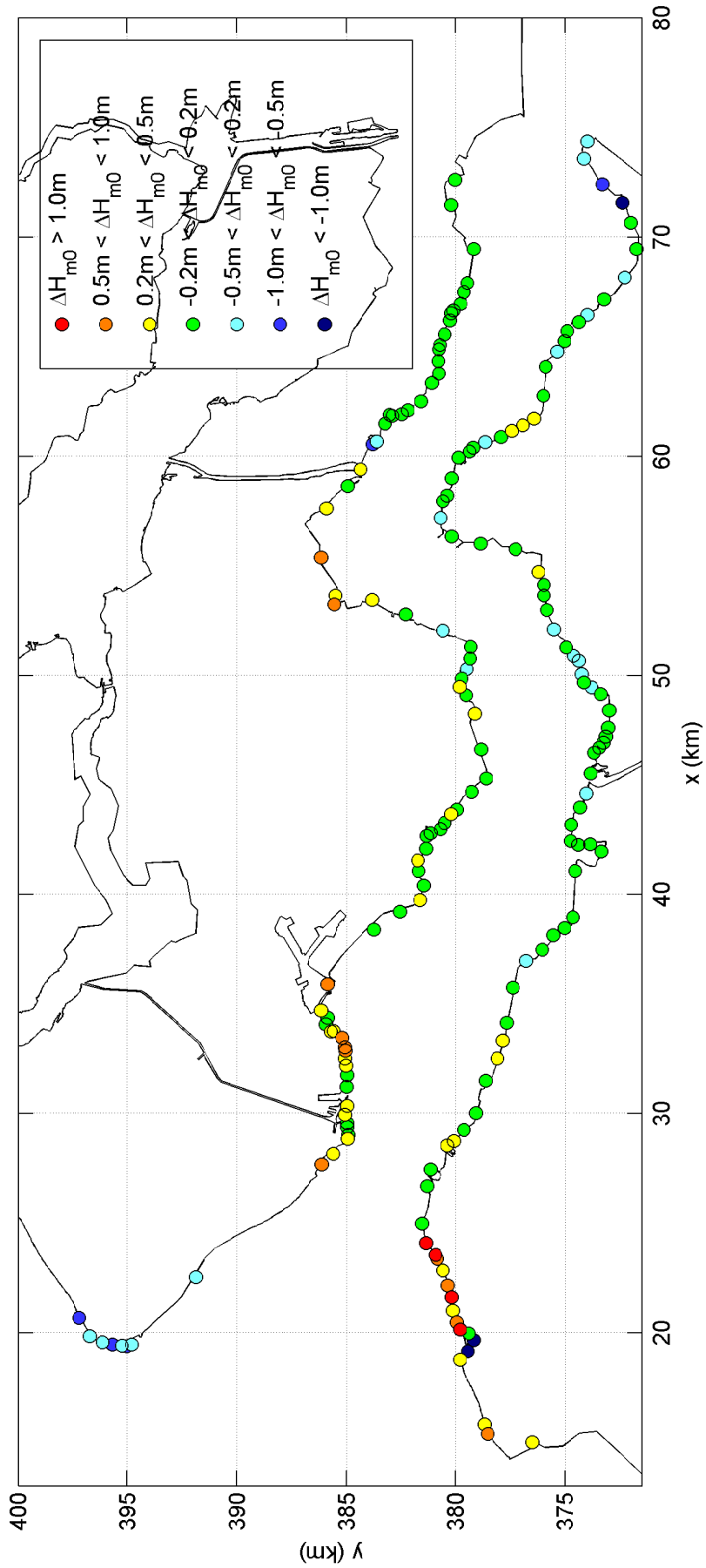
Hydra 2011 (blauw) en Hydra 2006 (rood)  
op zuidoever Westerschelde

Achtergronddocument WTI 2011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.11.b



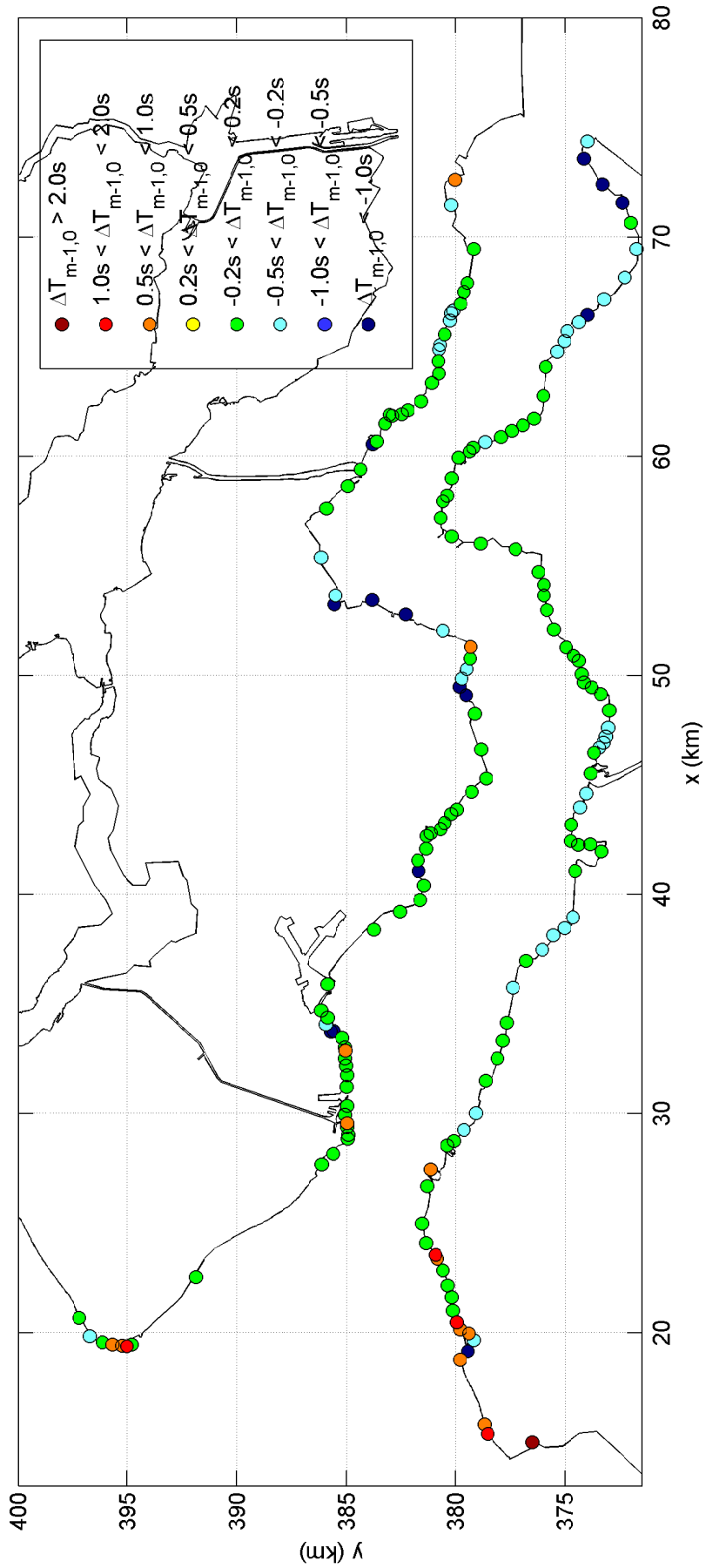
Vershil in  $H_{m0}$  Hydra 2011 - HR 2006

Achtergronddocument WT12011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.12



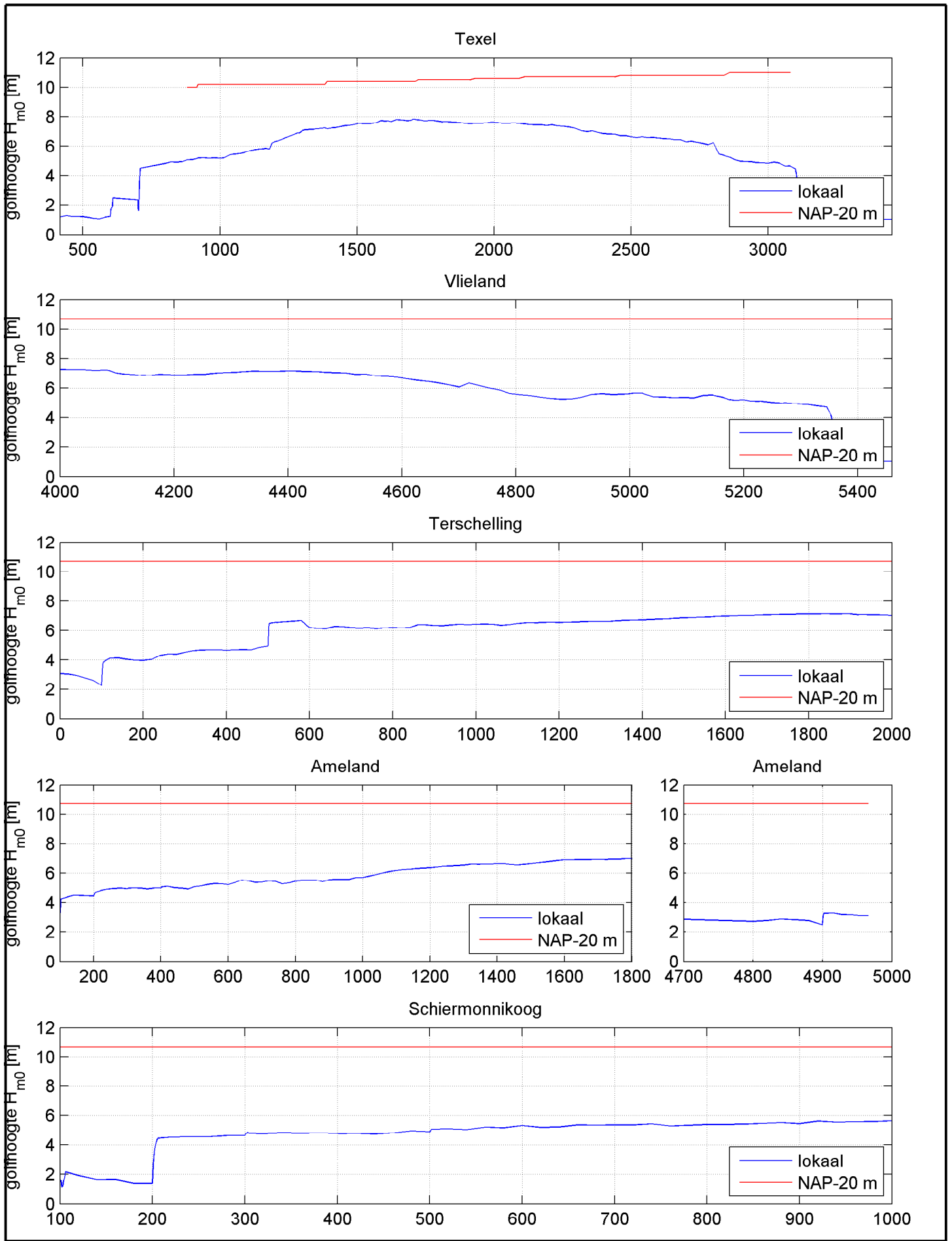
Vershil in  $T_{m-1,0}$  Hydra 2011 - HR 2006

Achtergronddocument WT12011

**DELTA**RES

1204143-002

Fig 9.13



HR2011 (blauw) en HR2006 (rood) voor de duinen op de Waddeneilanden als functie van raainummer (oplopend van west naar oost)

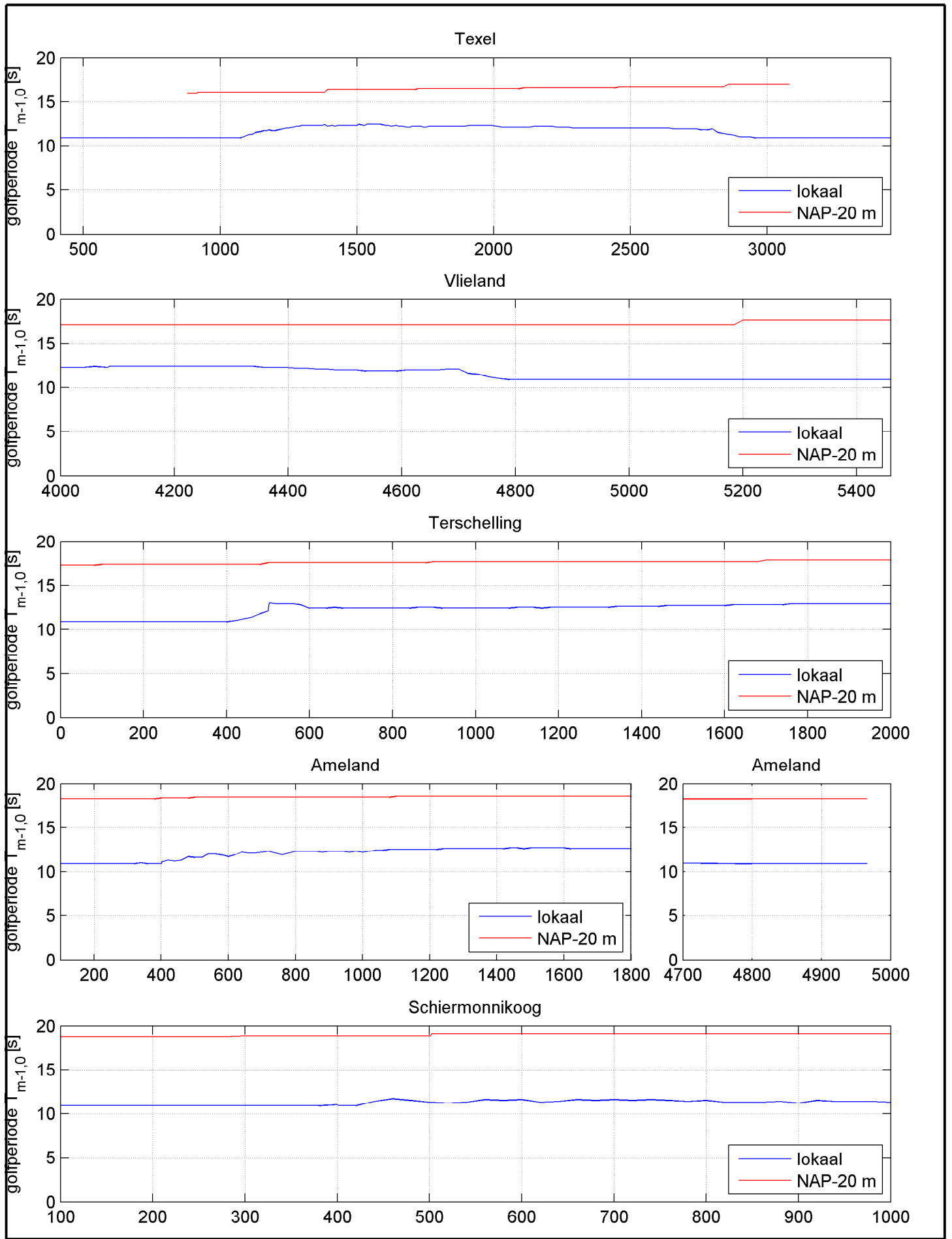
Achtergronddoc WTI

**DELTA**RES

1204143-001

Fig 10.1

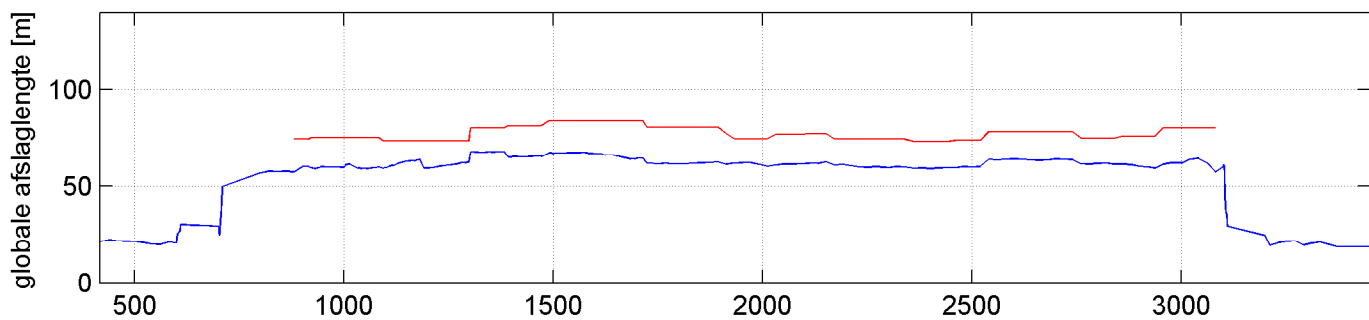




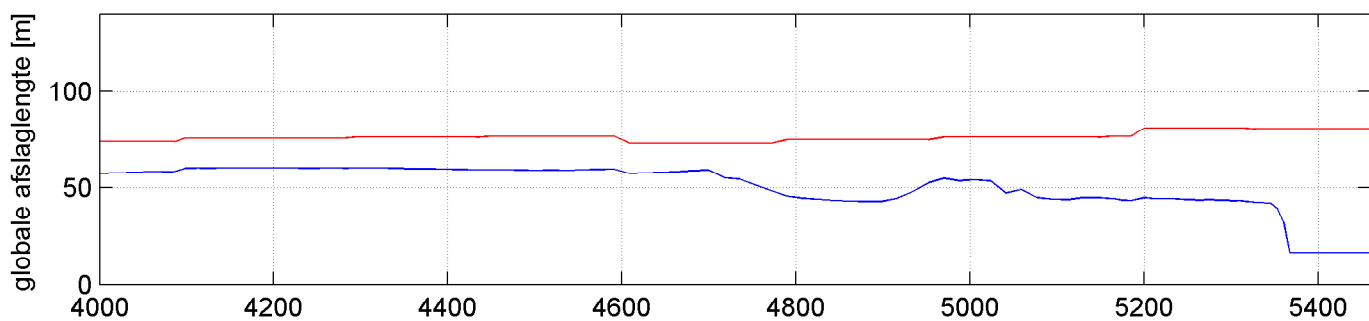
HR2011 (blauw) en HR2006 (rood) voor de duinen op de Waddeneilanden als functie van raainummer (oplopend van west naar oost)

Achtergronddoc WTI

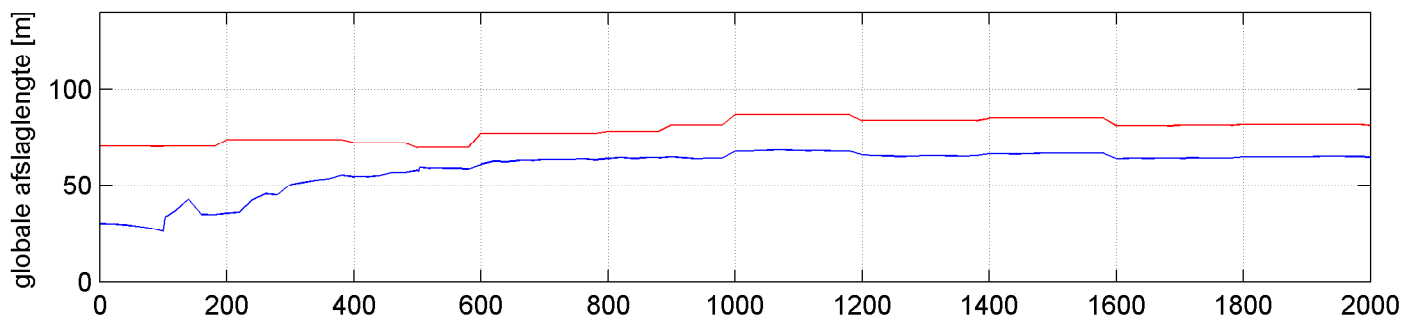
Texel



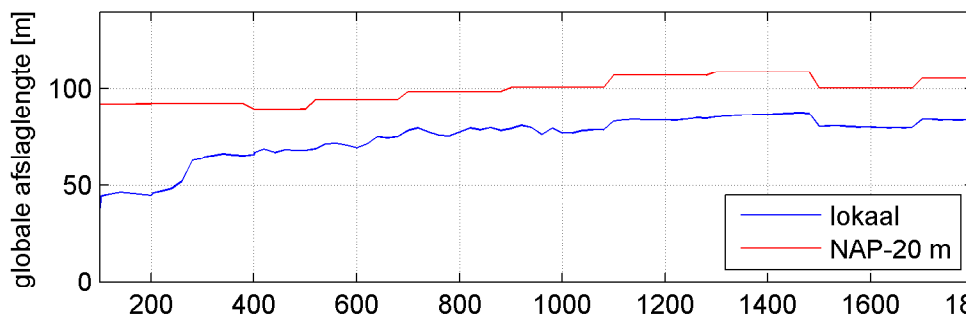
Vlieland



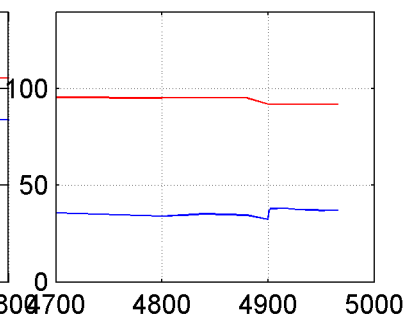
Terschelling



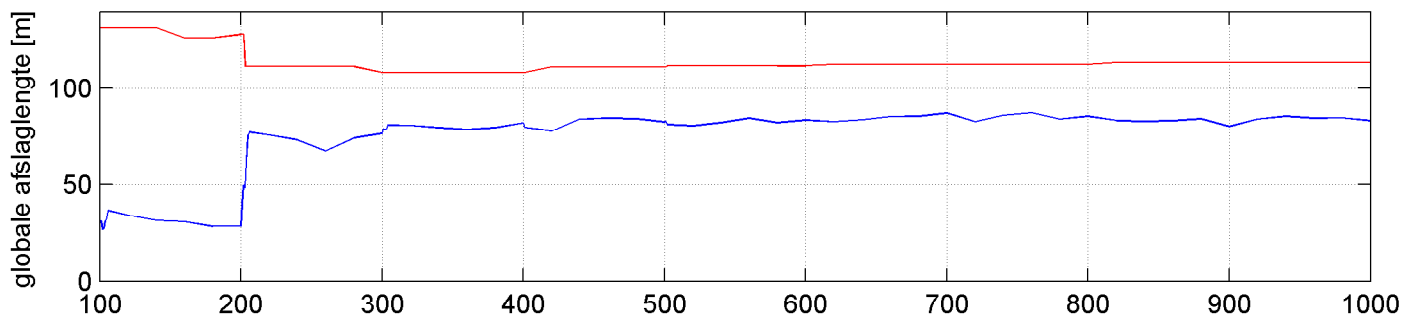
Ameland



Ameland



Schiermonnikoog



HR2011 (blauw) en HR2006 (rood) voor de duinen op de Waddeneilanden met standaard duinprofiel als functie van raainummer (oplopend van west naar oost)

Achtergronddoc WTI

**DELTA**RES

1204143-001

Fig 10.3