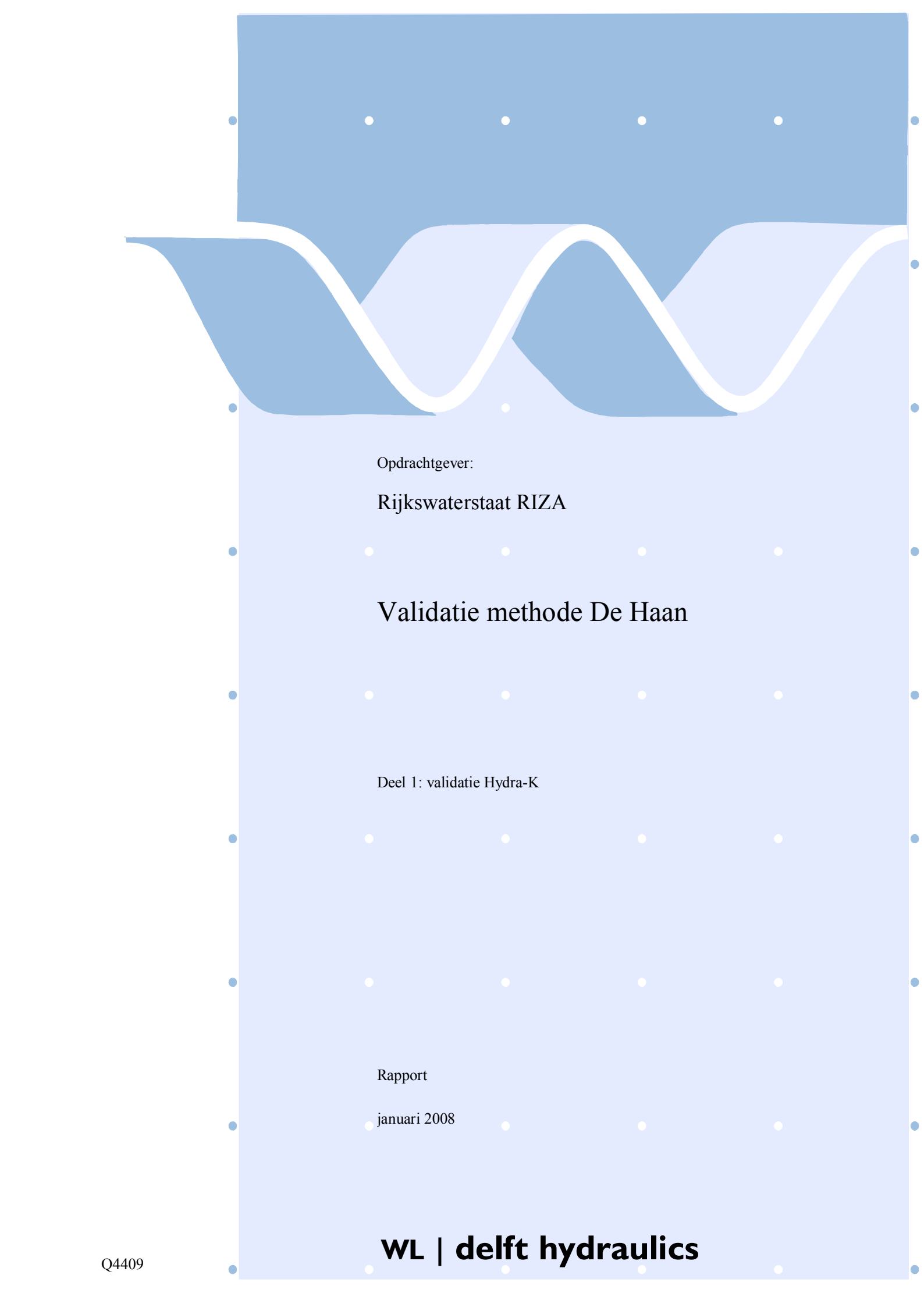




Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Validatie methode De Haan

Deel 1: validatie Hydra-K

Rapport

januari 2008

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

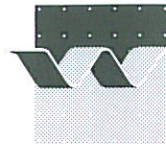
Validatie methode De Haan

Deel 1: validatie Hydra-K

Saskia van Vuren

Rapport

januari 2008



Opdrachtgever:	Rijkswaterstaat RIZA					
Titel:	Validatie methode De Haan					
Samenvatting:						
Met het probabilistisch rekenmodel, Hydra-K, worden de Hydraulische Randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de zoute waterkeringen langs de Hollandse Kust en in de Westerschelde en Oosterschelde vastgesteld. Het rekenmodel bestaat uit een probabilistische deelmodel voor de hydraulische belasting en een deterministisch sterktemodel. De probabilistische rekenmethode waarop Hydra-K gebaseerd is, staat bekend als de methode "De Haan". De belangrijkste doelstelling van het project is het verschaffen van inzicht in de prestaties van de methode "De Haan" in Hydra-K op het gebied van het berekenen van lokale golfparameters, golfoploop en belastingen van steenbekledingen. Op basis van de uitkomsten wil RIKZ meer draagvlak krijgen voor de methode. Daarnaast wil RIKZ graag aanbevelingen krijgen om eventuele zwakkere onderdelen (indien aanwezig) in de methode te verbeteren. De resultaten van het project zijn beschreven in drie deelrapporten waarvan voorliggend rapport het eerste deel is. In dit rapport wordt de prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van golfparameters en golfoploop onderzocht. Daarnaast is een haalbaarheidstudie uitgevoerd waar de haalbaarheid van de toepassing van methode "Vrijling" als alternatief voor methode "De Haan" wordt verkend.						
Referenties:						
Ver	Auteur	Datum	Opmerk.	Review	Goedkeuring	
1.0	Saskia van Vuren	november 2007		Ferdinand Diermanse	Kees Bons	
2.0	Saskia van Vuren	januari 2008		Ferdinand Diermanse	Kees Bons	
Projectnummer:		Q4409				
Trefwoorden:		probabilistiek, Hydraulische Randvoorwaarden, Hydra-K, methode "De Haan", methode "Vrijling"				
Aantal bladzijden:		95				
Classificatie:		Geen				
Status:		Definitief				

Inhoud

1	Inleiding	1-1
1.1	Kader	1-1
1.2	Dit project.....	1-1
1.3	Dit rapport	1-2
2	Performance Hydra-K voor golfparameters.....	2-1
2.1	Doelstelling en Werkwijze.....	2-1
2.1.1	Overschrijdingskrommen van golfcondities afgeleid met Hydra-K	2-3
2.1.2	Overschrijdingskrommen van golfcondities afgeleid uit metingen	2-10
2.1.3	Vergelijking overschrijdingskrommen van golfcondities afgeleid met Hydra-K en uit metingen	2-17
2.2	Golfparameters meetlocatie Cadzand CAWI & Cadzand CADW	2-20
2.3	Golfparameters meetlocaties Hansweert HAWI & Hansweert HANI	2-26
2.4	Golfparameters meetlocaties Hoofdplaat HFPL & Hoofdplaat HFP1	2-30
2.5	Golfparameters meetlocaties Keeten.....	2-33
2.6	Golfparameters meetlocaties Marollegat.....	2-36
2.7	Golfparameters meetlocaties Oosterschelde	2-39
2.8	Golfparameters meetlocaties Maasmond	2-42
2.9	Golfparameters meetlocaties IJmuiden	2-44
2.10	Samenvatting resultaten	2-47
3	Performance Hydra-K voor golfoploop	3-1
3.1	Inleiding	3-1
3.2	Samenvatting memo RIKZ [2007].....	3-1
3.3	Onzekerheden in het bepalen van de hydraulische belasting.....	3-2
3.3.1	Beschrijving van de modelketen	3-2
3.3.2	Inzichten van experts over onzekerheden	3-4
3.4	Onzekerheden in de mate van golfoploop	3-4
3.4.1	Technisch rapport golfoploop en golfoverslag.....	3-4
3.4.2	Additionele wetenswaardigheden.....	3-9
3.5	Gevoeligheidsanalyse.....	3-11
3.5.1	Inleiding.....	3-11
3.5.2	Aanpak.....	3-11
3.5.3	Keuze van het aantal stochastische variabelen in Hydra-K	3-12

3.5.4	Gevoeligheidsanalyse op basis van drie stochastische variabelen.....	3-13
3.5.5	Gevoeligheidsanalyse op basis van vier stochastische variabelen.....	3-14
3.5.6	Conclusies	3-15
4	Methode “Vrijling” als alternatief voor methode “De Haan”	4-1
4.1	Inleiding	4-1
4.2	Beschrijving van de methode “Vrijling”	4-2
4.2.1	Algemeen	4-2
4.2.2	Illustratie van het concept van de methode “Vrijling”	4-3
4.3	Vergelijkingsmogelijkheden methode “De Haan” met methode “Vrijling”	4-6
5	Conclusies en aanbevelingen	5-1
6	Referenties	6-1

Bijlagen

A	Overzicht van rekenroosters SWAN	A-1
B	Ruimtelijk verloop correctiewaarden SWAN bij verschillende condities (Groeneweg & Doorn, 2005).....	B-1
C	Memo Les [2007] additionele quick scan analyses naar aanleiding van rapportage “Validatie methode De Haan”	C-1
D	Verhouding golfperiodematen T_p en $T_m-1,0$ ter plaatse van meetlocaties	D-1

I Inleiding

I.1 Kader

Vanaf januari 1996 is de nieuwe "Wet op de Waterkering" van kracht. Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat er iedere vijf jaar door de beheerders een toetsing op veiligheid moet plaatsvinden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Voor het toetsen op veiligheid is door het ministerie van Verkeer en Waterstaat een voorschrift uitgebracht: "Voorschrift Toetsen op Veiligheid" (VTV). Het geeft aan hoe de toetsing moet worden uitgevoerd om de veiligheid van de waterkeringen te kunnen beoordelen. Om de toetsing te kunnen uitvoeren moeten tevens de hydraulische randvoorwaarden bekend zijn. In de Wet op de Waterkering wordt de minister van Verkeer en Waterstaat opgedragen deze beschikbaar te stellen. De hydraulische randvoorwaarden worden elke vijf jaar vastgesteld en gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen" (HR).

Eén van de deelsystemen waarvoor randvoorwaarden moeten worden afgeleid zijn de zoute wateren. Meer specifiek zijn dat de Westerschelde, de Oosterschelde, de Waddenkust, de Zeeuwse Noordzeekust en de Hollandse kust. De hydraulische randvoorwaarden voor deze wateren bestaan voor elke locatie uit een combinatie van de waterstand en enkele relevante golfkarakteristieken (golfhoogte, golfperiode, golfrichting). Voor harde waterkeringen zijn de hydraulische randvoorwaarden bepaald aan de teen van de kering. Om te bepalen of een harde waterkering faalt is nodig:

1. de statistiek van de wind, de waterstand en golven op diep water;
2. de vertaling van de hydraulische condities van diep water naar ondiep water nabij de kering; en
3. de betrouwbaarheidsfunctie, d.w.z. het model dat de sterkte van de kering vergelijkt met de belasting.

De eerste twee onderdelen vormen samen het (probabilistische) model voor de hydraulische belasting, de derde is het (deterministische) sterktemodel. Voor harde waterkeringen zijn deze drie onderdelen geïmplementeerd in een probabilistisch rekenmodel, Hydra-K, waarmee uiteindelijk de Hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de zoute waterkeringen zijn vastgesteld. De probabilistische rekenmethode waarop Hydra-K gebaseerd is, staat bekend als de methode "De Haan".

I.2 Dit project

Naar aanleiding van het opstellen van de (concept-) randvoorwaarden voor HR2006 en het presenteren van de rekenmethoden die aan de basis liggen is een aantal vraagstukken naar voren gekomen. In een offerte-aanvraag van d.d. 27 maart 2007, kenmerk 2007/05188 heeft RIKZ een aantal van deze vraagstukken gebundeld in de vorm van werkzaamheden.

Op 23 april 2007 heeft het consortium van WL | Delft Hydraulics (penvoerder), ARGOSS en HKV LUN IN WATER offerte uitgebracht voor het uitvoeren van deze werkzaamheden (brief, kenmerk ZWS24780/Q4409/lj). Op 24 mei 2007 is het contract getekend tussen RIKZ als opdrachtgever en het genoemde consortium als opdrachtnemer (kenmerk RKZ/2007/05331).

De belangrijkste doelstelling van het project is het verschaffen van inzicht in de prestaties van de methode De Haan in Hydra-K op het gebied van het berekenen van lokale golfparameters, golfoploop en belastingen van steenbekledingen. Op basis van de uitkomsten wil RIKZ meer draagvlak krijgen voor de methode. Daarnaast wil RIKZ graag aanbevelingen krijgen om eventuele zwakkere onderdelen (indien aanwezig) in de methode te verbeteren.

De volgende activiteiten staan centraal in dit project:

1. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor golfparameters;
2. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor het mechanisme golfoploop;
3. testen en analyseren van de performance van de “methode Vrijling” voor golfparameters en het mechanisme golfoploop;
4. kwantificeren van de mogelijke overschatting van de faalkans door de methode De Haan op analytische wijze;
5. kwantificeren van de mogelijke overschatting van de faalkans door de methode De Haan op experimentele wijze;
6. kwantificeren van de nauwkeurigheid van de methode om op basis van simultane metingen de staartcorrelatiecoëfficiënt af te leiden;
7. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor het afleiden van toetsrandvoorwaarden voor steenbekledingen;
8. formuleren van een advies aangaande het toetsen en ontwerpen voor steenbekledingen (en kruinhoogte) met Hydra-K.

1.3 Dit rapport

Ter bevordering van de procesgang gedurende het project zijn de 8 activiteiten in 3 zogenaamde “blokken” onderverdeeld:

- blok 1 (activiteit 1-3): validatie Hydra-K;
- blok 2 (activiteit 4-6): validatie methode De Haan;
- blok 3 (activiteit 7-8): toetsen en ontwerpen van steenbekledingen.

Dit rapport beschrijft de activiteiten die zijn uitgevoerd in het kader van **blok 1: validatie Hydra-K**. Het rapport is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 gaat over de prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van golfparameters;
- Hoofdstuk 3 beschrijft de prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van golfoploop;
- Hoofdstuk 4 geeft een haalbaarheidstudie naar toepassing van methode “Vrijling” als alternatief voor methode “De Haan” weer;
- Hoofdstuk 5 vat de belangrijkste conclusies en aanbevelingen samen.

2 Performance Hydra-K voor golfparameters

2.1 Doelstelling en Werkwijze

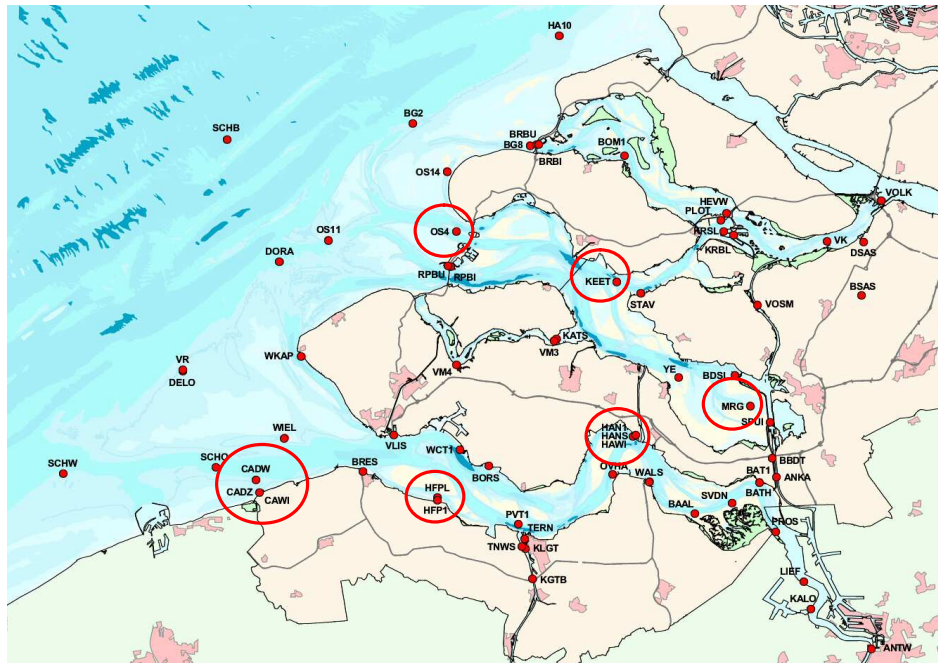
Het rekenpakket Hydra-K speelt een belangrijke rol bij het afleiden van hydraulische randvoorwaarden (golfhoogtes, golfperiodes en waterstanden) voor de harde primaire waterkeringen langs de kust. De hydraulische randvoorwaarde van een kering is de maatgevende hydraulische belasting op de kering (een gecombineerde toestand van waterstand en golfbelasting), die bij een wettelijk vastgelegde normfrequentie voor de veiligheid, optreedt.

De normfrequentie voor waterkeringen langs de Hollandse kust van Hoek van Holland tot Den Helder is 1:10.000, dat wil zeggen dat de keringen zo ontworpen dienen te worden dat deze gemiddeld éénmaal in de 10.000 jaar faalt. Voor de primaire waterkeringen in de Westerschelde en de Oosterschelde geldt een normfrequentie van 1:4000.

Het doel van dit onderzoeksonderdeel is inzicht te krijgen in de prestatie van de methode “De Haan” in Hydra-K met betrekking tot het berekenen van golfparameters. Hiertoe is de met Hydra-K berekende golfstatistiek op enkele meetlocaties vergeleken met de statistiek die direct volgt uit de metingen. Het betreft de volgende meetlocaties:

- Westerschelde:
Cadzand CADW
Cadzand CAWI
Hoofdplaat HFPL
Hoofdplaat HFP1
Hansweert HAWI
Hansweert HAN1
- Oosterschelde:
Oosterschelde 4;
Keeten
Marollegat
- Hollandse Kust:
IJmond Stroommeetpaal
Maasmond Stroommeetpaal

De ligging van de meetlocaties in de Westerschelde en Oosterschelde is weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Meetlocaties in de Westerschelde en Oosterschelde.

Uitgangspunt voor de vergelijking is de werkwijze van RIKZ met medewerking van WL | Delft Hydraulics en HKV LIN IN WATER die staat beschreven in RIKZ [2007a] en RIKZ [2007c] waarin met Hydra-K berekende overschrijdingskrommen van golfhoogten en golfperiodes zijn vergeleken met overschrijdingskrommen van dezelfde golfkarakteristieken die op basis van metingen zijn afgeleid. De resultaten van de vergelijkingen in de memo's RIKZ [2007a] en RIKZ [2007c] hebben aanleiding gegeven om voor meerdere meetlocaties de Hydra-K uitkomsten te vergelijken met metingen. Voor het bepalen van de stormomstandigheden uit de meetreeksen is voor deze eerder uitgevoerde analyse een snelle selectiemethode gekozen. In deze rapportage is gekozen voor een uitgebreidere en nauwkeurigere methode.

Om een vergelijking met metingen mogelijk te maken, zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Het afleiden van overschrijdingskrommen van de golfhoogte en de golfperiode op de meetlocaties uit Hydra-K berekeningen;
2. Het afleiden van overschrijdingskrommen van de golfhoogte en de golfperiode én een betrouwbaarheidsinterval rondom deze krommen op de meetlocaties uit metingen; en
3. Een vergelijking en analyse van de resultaten van de overschrijdingskromme volgend uit punt 1 en 2.

De bovengenoemde stappen worden hieronder toegelicht.

2.1.1 Overschrijdingskrommen van golfcondities afgeleid met Hydra-K

Om de overschrijdingskrommen van de golfhoogte en de golfperiode per meetlocatie uit Hydra-K berekeningen te bepalen, is de volgende procedure doorlopen:

I. Selectie van uitvoer van golfmodel SWAN voor de meetlocaties

Hydra-K maakt voor de vertaling van de hydraulische condities van diep water naar ondiep water gebruik van berekeningen met het golfmodel SWAN. Voor een groot aantal combinaties van windsnelheid, windrichting en waterstand zijn SWAN berekeningen uitgevoerd die de golfcondities op diep water vertalen naar ondiep water. Er zijn in de afgelopen jaren golfberekeningen met SWAN uitgevoerd voor de kustgebieden de Hollandsche Kust, de Westerschelde, de Oosterschelde, en de Waddenzee. Het aantal doorgerekende combinaties van windsnelheid, windrichting en waterstand varieert per kustgebied.

In Hydra-K ontbreken de vertaalmatrices ter plaatse van de meetlocaties. Dit komt doordat Hydra-K met name gebruikt wordt voor het afleiden van hydraulische randvoorwaarden voor locaties aan de teen van de waterkeringen langs de kust, en niet specifiek ter plaatse van de meetlocaties. Voor elke meetlocatie moet daarom een vertaalmatrix van diep water naar ondiep water worden gemaakt, die als database fungeert in Hydra-K. Dit kan op twee manieren:

1. **Methode 1:** In RIKZ [2007a] zijn de golfberekeningen met SWAN op de meetlocaties Marollegat en Oosterschelde vertaald naar de bestaande dichtstbijzijnde uitvoerlocaties in Hydra-K. De vertaling bestaat uit het toepassen van een constante factor op de golfkarakteristieken in de bestaande Hydra-K database. Deze factor is gelijk aan het gemiddelde quotiënt van de golfkarakteristieken op de meetlocaties berekend met SWAN en de golfkarakteristieken op de dichtstbijzijnde uitvoerlocaties in Hydra-K voor verschillende combinaties van waterstanden, windsnelheden en windrichtingen.
2. **Methode 2:** In RIKZ [2007a] was de vertalingsfactor voor de meetlocatie Keeten relatief groot ($\sim 1,12$) en varieerde deze sterk per combinatie van waterstand, windrichting en windsnelheid. In RIKZ [2007a] is daarom voor de meetlocatie Keeten een nieuwe locatie aan de Hydra-K database toegevoegd. Hiertoe is de Hydra-K database uitgebreid met de uitvoer van de SWAN berekeningen ter plaatse van de meetlocatie Keeten. Er is hiervoor gebruik gemaakt van de bestaande SWAN databases van de Oosterschelde. De vertaalmatrix ter plaatse van de meetlocatie Keeten is bepaald door middel van lineaire interpolatie van golfberekeningen tussen de dichtstbijzijnde hoekpunten van het rekenrooster van SWAN.

Beide methoden hebben voor- en nadelen. De eerste methode is relatief eenvoudig. Echter indien het golfspectrum van de meetlocatie in de richting van de kustlocatie in Hydra-K sterk verandert door bijvoorbeeld dieptebreking van golven op aanwezige tussengelegen platen, wordt de voorkeur gegeven aan de tweede methode. Een nadeel van de tweede methode is dat de beoordeling van de prestatie van Hydra-K dan niet plaatsvindt ter plaatse van de dijk waarin we eigenlijk geïnteresseerd zijn, maar ter plaatse van het meetpunt, waar geen dijk aanwezig is.

In dit onderzoek is voor elke meetlocatie de tweede methode toegepast. Kortom, de vergelijking tussen metingen en Hydra-K vindt plaats ter plaatse van de meetlocaties zelf. Er is in de berekeningen met Hydra-K gebruik gemaakt van een virtuele dijk met een standaard dijkprofiel. De richting van de dijknormaal is gelijk gekozen aan de richting van de dijknormaal van de dichtstbijzijnde Hydra-K locatie.

De SWAN berekeningen zijn uitgevoerd voor roosters met verschillende roosterresoluties: grove roosters met een resolutie van 500 m x 500 m, middelgrove roosters met een resolutie van 100 m x 100 m en fijne roosters met een resolutie van 20 m x 20 m. Om de vertaalmatrix af te leiden uit de SWAN databases is, met uitzondering van de meetlocaties Cadzand CADW en Oosterschelde OS4, gebruik gemaakt van SWAN berekeningen met de fijne rekenroosters. Voor de uitzonderingslocaties zijn de SWAN resultaten van de middelgrove roosters gebruikt. Tabel 2.1 geeft per meetlocatie aan welke SWAN database gebruikt is, zie ook Bijlage A. Informatie over de SWAN databases is terug te vinden in Alkyon (2005).

Tabel 2.1 Meetlocaties langs de Hollandse Kust, de Westerschelde en de Oosterschelde. De SWAN databases die met een D beginnen hebben een resolutie van 20 m X 20 m, de SWAN databases die met een B of een W beginnen hebben een gridresolutie van 100 m X 100 m.

Locatie	Omschrijving	x-coördinaat	y-coördinaat	SWAN database	# SWAN simulaties
<i>Westerschelde</i>					
CAWI	Cadzand	015010	378610	D01	216
CADW	Cadzand	014800	379251	W1	216
HAWI	Hansweert	058390	384990	D27	216
HAN1	Hansweert	058500	385100	D27	216
HFPL	Hoofdplaat	035614	377930	D50	216
HFP1	Hoodplaat	035637	377555	D50	216
<i>Oosterschelde</i>					
KEET	Keeten	037837	408813	D34	259
MRG	Marollegat	071992	388510	D17	216
OS4	Oosterschelde	037837	408813	B1	86
<i>Hollandse Kust</i>					
	Ijmuiden	95902	497709	HR basis	252
	Maasmond	60255	445768	HR basis	252

Er is een verschil tussen de type golfperiodematen die in de SWAN databases van de Hollandsche Kust en die in de SWAN databases van de Westerschelde en de Oosterschelde zijn opgenomen.

De SWAN database van de Hollandse Kust bevat de volgende periodematen:

- a) Spectrale golfperiodemaat $T_{m-1,0}$, ook wel ‘energieperiode’ genoemd, en bepaald uit de spectrale momenten m_{-1} en m_0 . De $T_{m-1,0}$ wordt vaak gebruikt bij de analyse van golfploopmetingen en voor de beschrijving van energietransport in een golfveld.
- b) Spectrale golfperiodemaat T_{m02} , bepaald uit het nulde en tweede moment van het energiespectrum volgens $T_{m02} = T_{m02} = \sqrt{m_0 / m_1}$; en
- c) Spectrale golfperiodemaat T_{m01} , vaak aangeduid als ‘gemiddelde periode, bepaald uit het nulde en eerste moment van het energiespectrum volgens $T_{m01} = m_0 / m_1$;
- d) Piek golfperiode van het energiespectrum T_p . De piek golfperiode is gelijk aan de inverse van de frequentie die behoort bij de waarde met de hoogste energiedichtheid in het spectrum.

In de nieuwe Hydra-K bestanden zijn de spectrale golfperiodemaat $T_{m-1,0}$, de spectrale golfperiodemaat T_{m02} en de piek golfperiode T_p opgenomen.

De SWAN databases van de Westerschelde en de Oosterschelde bevatten de volgende periodematen:

- a) Spectrale golfperiodemaat T_{m01} ;
- b) Spectrale golfperiodemaat $T_{m-2,-1}$, bepaald uit de spectrale momenten m_{-2} en m_{-1} ; en
- c) Piek golfperiode van het energiespectrum T_p .

Met andere woorden de spectrale golfperiodemaat $T_{m-1,0}$ die in het Hydraulische Randvoorwaardenboek wordt opgenomen, is geen standaard uitvoerparameter in de SWAN databases van de Westerschelde en de Oosterschelde. De spectrale golfperiodemaat $T_{m-1,0}$ is voor de HR locaties in de officiële Hydra-K database afgeleid uit berekende golfspectra die alleen ter plaatse van de HR locaties met SWAN zijn uitgevoerd. Dit impliceert dus dat een directe vergelijking met de spectrale golfperiodemaat $T_{m-1,0}$ uit metingen niet mogelijk is. Dat in RIKZ [2007a] deze vergelijking voor de meetlocaties Marollegat en Oosterschelde-4 wel is uitgevoerd, komt doordat in die analyse gebruik is gemaakt van een andere offshore nearshore vertaling, zie Methode 1 op pag 2-3.

In de nieuwe Hydra-K bestanden van de Westerschelde en de Oosterschelde zijn de spectrale golfperiodemaat T_{m01} , de spectrale golfperiodemaat $T_{m-2,-1}$ en de piek golfperiode T_p opgenomen.

2. Toepassen van correctiewaarden op de modeluitvoer van SWAN

Ondanks het feit dat de SWAN modellen uitvoerig gekalibreerd zijn, blijken er bij de toepassing van SWAN toch verschillen te zijn tussen metingen en berekeningen. Met de toepassing van correctiefactoren die op basis van hindcast studies zijn afgeleid, kunnen de verschillen tussen de metingen en de berekeningen in rekening worden gebracht. In Groeneweg & Doorn [2006] zijn voor verschillende golfparameters in de Westerschelde en de Oosterschelde per windrichting en per windsnelheid correctiefactoren afgeleid, als functie van de dimensieloze diepte, de golfsteilheid en de dimensieloze strijklengte. De correctiefactoren zijn dus in principe locatie- en conditieafhankelijk.

In het kader van dit project is om praktische redenen besloten om per gebied uit te gaan van de gemiddelde correctiefactoren uit het achtergrond rapport HR2006 van Den Heijer et al. [2006]. Deze gemiddelde correctiefactoren zijn gebaseerd op verschillen tussen berekende en gemeten golfparameters bij locaties op enkele honderden meters van de kruin van de dijk. De volgende gemiddelde correctiefactoren zijn toegepast:

1. Voor de modeluitvoer van het SWAN model van de Hollandse kust:

- a) Spectrale significante golfhoogte H_{m0} , bepaald uit het nulde moment van het energiespectrum: 0 %, geen correctie;
- b) Piek golfperiode van het energiespectrum T_p : 0 %, geen correctie nodig;
- c) Spectrale golfperiodemaat $T_{m-1,0}$: overschatting van 9,1 %, correctie 0.909; en
- d) Spectrale golfperiodemaat T_{m02} : 0%, correctiewaarde niet afgeleid in Den Heijer et al. [2006].

Voor de modeluitvoer van het SWAN model van de Oosterschelde en Westerschelde:

- a) Spectrale significante golfhoogte H_{m0} : onderschatting van 7,5 %, correctie 1,075
- b) Piek golfperiode van het energiespectrum T_p : onderschatting van 9,0 %, correctie 1,09
- c) Spectrale golfperiodemaat T_{m01} : 0%, correctiewaarde niet afgeleid in Den Heijer et al. (2006);
- d) Spectrale golfperiodemaat $T_{m-2,-1}$: 0%, correctiewaarde niet afgeleid in Den Heijer et al. (2006).

Het is moeilijk te zeggen in welke mate de locatie- en conditieafhankelijke correctiefactoren afwijken van de gemiddelde factoren. Ter illustratie is in Bijlage B, het ruimtelijke verloop van de correctiefactoren voor storm, zware en extreme condities weergegeven [Groeneweg & Doorn, 2005]. De correctiefactoren variëren als functie van locatie en conditie. De correctiefactoren zijn kleiner voor extreme condities dan voor stormcondities. Er is opgemerkt dat de correctiefactoren voor extreme situaties betrouwbaarder zijn, aangezien de correctiefuncties, die voor het bepalen van de correctiefactoren zijn gebruikt, voor extreme condities zijn afgeleid.

Grote afwijkingen van een correctiefactor van 1 komen voor bij locaties die in de schaduw van het land liggen en daarbij een zeer korte strijklengte (orde 100 m) hebben. Zowel de golfhoogte als de golfperiode zijn in deze locaties klein en zijn zodoende erg gevoelig voor afwijkingen. De correctiefactoren voor de situaties met zeer korte strijklengte zijn daardoor niet erg nauwkeurig. Echter de gecorrigeerde factoren voor de golfhoogte of de golfperiode zijn zo klein dat deze niet maatgevend zullen zijn.

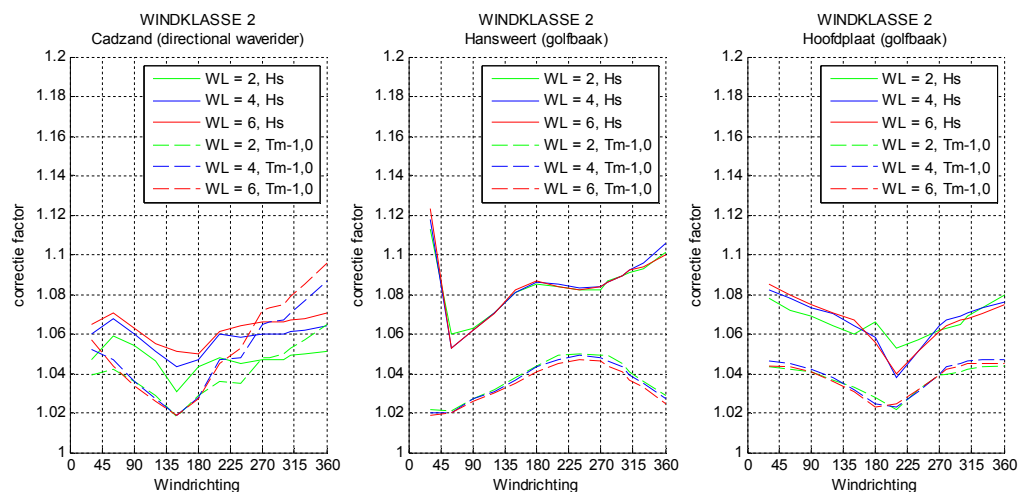
Ook de locaties waarvoor geen golfkarakteristieken met SWAN zijn uitgerekend (bijvoorbeeld door droogval), maar waarvoor wel een 'exception value' in de SWAN database is opgenomen, worden uitzonderlijke waarden voor de correctiefactoren berekend. Dit kan leiden tot hoge correctiefactoren die niet correct zijn, aangezien de fysische omstandigheden niet realistisch zijn.

Omdat deze uitzonderingssituaties zich met name voordoen bij milde condities, beperkt het springerige gedrag in het ruimtelijke verloop zich met name tot deze condities. Voor maatgevende condities vertonen de correctiefactoren ruimtelijk gezien een veel minder springerig verloop.

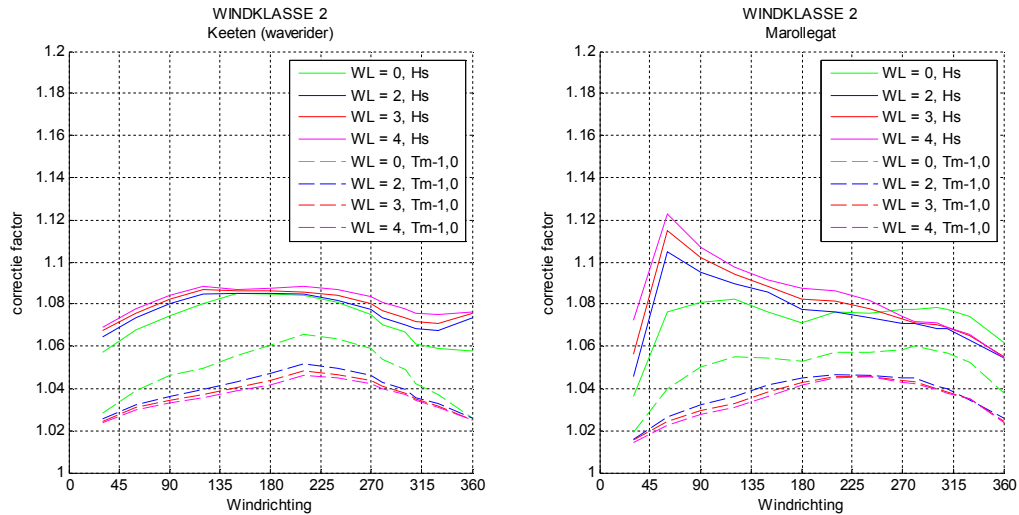
Om toch een inschatting te maken van het effect van de toepassing van de gemiddelde correctiefactoren, heeft Les [2007] voor de meetpunten in de Oosterschelde en de Westerschelde de correctiefactoren voor windklasse 2 ter plaatse van de dichtstbijzijnde dijkvakken bekeken. Deze correctiefactoren zijn in Figuur 2.2 en Figuur 2.3 weergegeven. De memo van Les [2007] is opgenomen in Bijlage C.

De figuren laten zien dat zeker voor de maatgevende windrichtingen de gemiddelde correctiefactoren van 7,5% voor de spectrale golfhoogte H_{m0} en 4% voor de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ goed in de buurt liggen van de conditie en ruimtelijk afhankelijke correctiefactoren.

Voor de piekperiode T_p is het effect van de toegepaste correctie in met name de Westerschelde iets gecompliceerder. Doordat de golfspectra bij maatgevende omstandigheden dubbeltoppig zijn, zijn hogere correcties berekend dan de gemiddelde correcties. Voor de Oosterschelde voldoet de gemiddelde correctiefactor beter. Dit komt doordat bij maatgevende condities de Oosterscheldekering gesloten is en alleen lokale golfgroei van belang is.



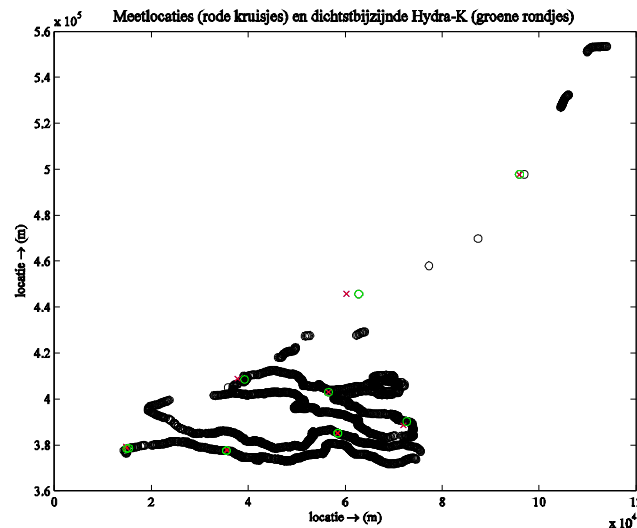
Figuur 2.2 Correctiefactoren van de golfhoogte H_{m0} en de golfperiode $T_{m-1,0}$ voor windklasse 2 in de Westerschelde [bron: Les, 2007].



Figuur 2.3 Correctiefactoren van de golfhoogte H_{m0} en de golfperiode $T_{m-1,0}$ voor windklasse 2 in de Oosterschelde [bron: Les, 2007].

3. Creëren van nieuwe invoerbestanden van Hydra-K

Tot slot zijn voor het creëren van nieuwe invoerbestanden van Hydra-K de dijknormalen, de wettelijke normfrequentie en de bijbehorende toetspeilen bepaald. Deze zijn afgeleid uit de bestaande Hydra-K database door de dijknormalen, de wettelijke normfrequentie en de toetspeilen van de dichtstbijzijnde Hydra-K locaties over te nemen, zie Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Alle Hydra-K locaties langs de Hollandse Kust en in de Zeeuwse Delta (zwarte bolletjes), meetlocaties (rode kruisjes) en dichtstbijzijnde Hydra-K locaties (groene bolletjes), waarvan de dijknormalen, de wettelijke normfrequentie en de toetspeilen zijn overgenomen.

4. Afleiden van golfstatistiek met Hydra-K

Bij een ontwerpberekening voor het faalmechanisme *golfoploop* wordt voor alle (opgeschaalde) stormgebeurtenissen de oploophoogte bepaald. Deze oploophoogte is een functie van de waterstand, de golfhoogte, de golfperiode en de golfrichting en wordt bepaald met het programma PC-Overslag. De ontwerp-kruinhoogte is dan dié waarde waarvoor geldt dat er exact 50 (kappa) stormgebeurtenissen zijn die tot falen leiden. Anders gezegd: dié waarde waarvoor geldt dat er exact 50 stormgebeurtenissen zijn met een hogere oploophoogte.

Het bepalen van de golfhoogte of golfperiode met maatgevende herhalingstijd (bijv. 10.000 of 4.000 jaar) met Hydra-K gaat op grotendeels dezelfde wijze. In plaats van de *oploophoogte* is nu echter de golfhoogte zelf het bepalende criterium. De golfhoogte van alle (opgeschaalde) stormgebeurtenissen worden gerangschikt op volgorde van grootte en de 50^e in de ranglijst is de gezochte golfhoogte met maatgevende herhalingstijd (bijv. 10.000 of 4.000 jaar).

Het is belangrijk op te merken dat de golfhoogte en de golfperiode behorende bij de maatgevende herhalingstijd uit Hydra-K (dus de individuele marginale golfstatistiek) niet gelijk zijn aan de golfhoogte en de golfperiode die onderdeel vormen van het illustratiepunt en welke zijn opgenomen in het Hydraulische Randvoorwaardenboek. Het illustratiepunt is de maatgevende combinatie van waterstand, significante golfhoogte, golfperiode en golfinvalsrichting, die samen resulteren in een maatgevende belasting behorende bij de toetsfrequenties. Kijkend naar de marginale statistiek zal de golfhoogte en de golfperiode uit het illustratiepunt dus een kleinere herhalingstijd hebben (of te wel een grotere kans van voorkomen) dan de herhalingstijd die hoort bij het illustratiepunt zelf. Met andere woorden, de golfhoogte en de golfperiode met een bepaalde herhalingstijd zijn groter dan de golfhoogte en de golfperiode in de illustratiepunten met dezelfde herhalingstijd.

De meetreeksen van de golfhoogte of golfperiode op de meetlocaties zijn erg kort in vergelijking tot de normfrequentie (1:10.000 of 1:4000) waarop waterkeringen langs de kust zijn ontworpen. Om een vergelijking te maken tussen de golfstatistiek volgend uit Hydra-K berekeningen en metingen, zijn daarom met Hydra-K berekeningen uitgevoerd voor situaties met een veel grotere kans van voorkomen dan de ontwerpcondities. Er zijn berekeningen uitgevoerd voor herhalingstijden tussen 2 en 10.000 jaar: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 4000 en 10.000 jaar.

HKV [2006] geeft aan dat de Hydra-K resultaten minder betrouwbaar zijn voor herhalingstijden tussen de 1 en 10 à 20 jaar. Dit komt doordat de Weibullfrequentieverdelingen onder hun drempels worden gedrukt. Indien de Weibullverdelingen de data onder de drempels niet goed beschrijven, zullen met Hydra-K onnauwkeurige resultaten worden berekend. In het kader van dit project moet gerealiseerd worden dat de Hydra-K resultaten voor de lage herhalingstijden dus minder betrouwbaar zijn.

oor elke meetlocatie zijn met het nieuwe Hydra-K model berekeningen uitgevoerd met bovengenoemde herhalingstijden. Voor de Hollandse Kust zijn de golfkarakteristieken $T_{m-1,0}$ en H_{m0} , en voor de Zeeuwse Delta zijn de golfkarakteristieken T_p en H_{m0} bij de verschillende overschrijdingsfrequenties bepaald. Met de golfkarakteristieken behorende bij de overschrijdingsfrequenties zijn vervolgens de overschrijdingskrommen geconstrueerd.

2.1.2 Overschrijdingskrommen van golfcondities afgeleid uit metingen

In aanvulling op RIKZ [2007a], zijn in dit rapport niet alleen de overschrijdingskrommen van de gemeten golfparameters afgeleid, maar zijn ook conditionele Weibull verdelingen gefit op de geselecteerde stormmaxima van de golfparameters. Daarnaast zijn betrouwbaarheidsintervallen rondom deze Weibull verdelingen geconstrueerd. Deze betrouwbaarheidsintervallen geven inzicht in de onzekerheid van de afgeleide extreme waarde verdelingen.

Voor het fitten van de conditionele Weibull verdelingen en de betrouwbaarheidsintervallen is het rekenprogramma GolfStat gebruikt. Voor een uitgebreide beschrijving van het programma Golfstat en de gebruikte methode wordt verwezen naar WL [2004] en WL [2005]. Een beknopte beschrijving van de methode is hieronder gegeven.

Om de overschrijdingskrommen, de conditionele Weibull verdelingen en de betrouwbaarheidsintervallen van de golfhoogte en de golfperiode per meetlocatie uit de metingen te bepalen, is de volgende procedure doorlopen:

I. Verzamelen en verwerken van de golfmeetgegevens

Op de meetlocaties langs de Hollandse Kust, de Westerschelde en de Oosterschelde uit Tabel 2.1 zijn diverse hydrometeo-metingen beschikbaar, waaronder golfmetingen. Voor de Westerschelde en de Oosterschelde is de meetdata afkomstig van het meetnet Zeeuwse getijdewateren van Rijkswaterstaat Zeeland. Deze meetdata is te downloaden via de website www.hmcz.nl. Voor de Hollandse kust is de meetdata opgeslagen in de DONAR database.

De golfmetingen zijn opgeslagen in twee verschillende bestanden afhankelijk van de meetperiode. De meetgegevens zijn tot medio 1998 opgeslagen in GS02-bestanden, waarin naast het golfspectrum van 0 tot 0,995 Hz, ook de significante golfhoogte $H_{1/3}$, de golfpiekperiode T_p en de piekfrequentie zijn opgenomen. Vanaf medio 1998 zijn de meetgegevens opgeslagen in GHr2-bestanden, welke naast het golfspectrum van 0,03 tot 1,0 Hz, de significante golfhoogte H_{m0} en de golfperiodemaat $T_{m-1,0}$ bevatten. In de oudere bestanden ontbreken dus de significante golfhoogte H_{m0} en de golfperiodemaat $T_{m-1,0}$. Voor de eenduidigheid zijn de significante golfhoogte H_{m0} , de golfperiode $T_{m-1,0}$ (voor de meetlocaties langs de Hollandse kust) en de golfpiekperiode T_p (voor de meetlocaties in de Westerschelde en de Oosterschelde) waarvoor de vergelijking met Hydra-K is uitgevoerd, uit de gemeten golfspectra afgeleid.

2. Selectie van stormmaxima van golfhoogte en golfperiode

Uit de tijdreeksen moet een aantal stormgebeurtenissen worden geselecteerd. Op basis van de geselecteerde stormmaxima zijn de overschrijdingskrommen afgeleid. Vervolgens zijn extreme waarde verdelingen gefit door de geselecteerde maxima.

De eerste stap in de procedure bestaat dus uit de selectie van de hoogste waarden van de golfhoogte en de golfperiode uit de meetreeksen.

Er is rekening gehouden met het feit dat:

- waarnemingen van extremen die kort na elkaar optreden wellicht afhankelijk van elkaar zijn;
- gemeten maxima van de golfkarakteristieken geen zuivere schatters zijn van de werkelijk opgetreden maxima van die golfkarakteristieken, zie Forristall (1996);
- hoge waarden van de golfperiode die optreden in combinatie met lage waarden van de golfhoogte, zoals het geval is bij deining, niet relevant zijn voor de extreme waarden statistiek en derhalve niet moeten worden geselecteerd.

a. Selectie van stormmaxima van golfhoogte en golfperiode

De selectie van een reeks van waargenomen maxima begint met de keuze van een drempelwaarde, die als ondergrens dient van de te selecteren maxima. Met betrekking tot de drempelwaarde is enerzijds belangrijk dat deze zodanig gekozen is dat het aantal stormmaxima voldoende groot is om een betrouwbare fit van de extreme waarde verdeling af te leiden. Anderzijds is het van belang dat de drempelwaarde niet te laag is dat er ook gebeurtenissen worden geselecteerd die niet onder stormgebeurtenissen vallen. Als vuistregel is aangehouden dat de drempelwaarde zodanig is gekozen dat er per jaar ongeveer 10 maxima zijn geselecteerd. Deze vuistregel is overgenomen uit RIKZ [2007a].

In Tabel 2.2 staan de drempelwaarden per golfkarakteristiek per meetstation gespecificeerd. De drempelwaarden voor de meetlocaties Marollegat, Keeten en Oosterschelde verschillen iets met de drempelwaarden die in RIKZ [2007a] zijn gebruikt, zie Tabel 2.3.

Om de onafhankelijkheid tussen twee opeenvolgende maxima te waarborgen zijn twee aanvullende voorwaarden gedefinieerd 1) de tijdsduur tussen twee opeenvolgende maxima (de zogenaamde *zichtduur*) moet voldoende groot zijn, en 2) de laagste waarde die tussen de twee maxima is waargenomen moet voldoende klein zijn. In RIKZ [2007a] is met de laatste voorwaarde geen rekening gehouden. De zichtduur is gelijk genomen aan 48 uur (zie Den Heijer et al., 2006). Voor de tweede randvoorwaarde is een drempelwaarde gedefinieerd in de vorm van maximumfactor die de waarde van de drempel relateert aan de waarde van het voorliggende maximum. Voor de golfperioden en de golfhoogten is de maximumfactor gelijk aan respectievelijk 0,8 en 0,7 [Den Heijer et al., 2006].

Op basis van bovenstaande criteria zijn stormgebeurtenissen gedefinieerd, waarbij tenminste 12 waarden voor en na het optreden van het stormmaximum worden geselecteerd.

Tabel 2.2 Drempelwaarden voor de stormmaxima.

Locatie	Omschrijving	Type meting	Golfhoogte Hmo	Golfperiode		Meetperiode
				Tp	Tm-1,0	
Westerschelde						
CAWI	Cadzand	wind	1,90 m	7,1 sec	-	02/09/1998 tot heden
CADW	Cadzand	directional waverider	1,75 m	7,0 sec	-	23/11/1997 tot heden
HAWI	Hansweert	wind	0,85 m	3,6 sec	-	20/08/1998 tot heden
HAN1	Hansweert	golfbaak	0,50 m	3,3 sec	-	02/09/1998 tot heden
HFPL	Hoofdplaat	wind	0,45 m	3,1 sec	-	20/08/1998 tot heden
HFP1	Hoofdplaat	golfbaak	0,33 m	2,8 sec	-	20/08/1998 tot heden
Oosterschelde						
KEET	Keeten	waverider	0,77 m	4,1 sec	-	28/10/1999 tot heden
MRG	Marollegat	wind	0,60 m	3,5 sec	-	01/01/1986 tot heden
OS4	Oosterschelde	wind	1,50 m	6,0 sec	-	vanaf 1980 tot heden
Hollandse Kust						
-	IJmuiden	-	2,90 m	-	7,0 sec	30/10/2002 – 1/1/2007
-	Maasmond	-	2,30 m	-	6,7 sec	vanaf 2003 tot heden

Tabel 2.3 Drempelwaarden die in RIKZ [2007a] voor de meetlocaties in de Oosterschelde zijn gebruikt. Let op de vergelijking tussen Hydra-K en metingen in RIKZ [2007a] is voor andere golfperiodematen uitgevoerd.

Locatie	Omschrijving	Golfhoogte H_{mo}	Golfperiode	
			T_{m02}	$T_{m-1,0}$
KEET	Keeten	0,60 m	-	3,0 sec
MRG	Marollegat	0,860 m	3,5 sec	-
OS4	Oosterschelde 4	1,60 m	-	5,0 sec

b. Filteren van de meetreeksen

Om te corrigeren voor het feit dat de gemeten maxima gedurende stormperioden geen zuivere schatters zijn [Forristall, 1996] van de opgetreden maxima van die golfkarakteristieken wordt een filtertechniek toegepast. De gemeten maxima worden gecorrigeerd met 8 filters. De keuze voor een bepaald filter is gebaseerd op het tijdsverloop van een stormgebeurtenis. Een licht filter wordt toegepast voor een kortdurende storm met snel toe- en afnemende golfhoogte om het werkelijke verloop van de golfkarakteristiek niet te veel geweld aan te doen. Voor een zeer langdurige langzaam veranderende storm is een zwaar filter het meest geschikt om het werkelijke stormmaximum zo goed mogelijk te benaderen.

c. Correctie van hoge golfperioden bij deining

Tot slot volgt een correctie van de reeks van hoge golfperioden bij deining. In omstandigheden met relatief kleine golfhoogten en lage windsnelheden kan het voorkomen dat de gemiddelde golfperiode soms zeer hoog is. Het golfveld bestaat dan meestal geheel of gedeeltelijk uit deining.

In RIKZ [2007] is voor de correctie van hoge golfperioden bij deining een subjectief golfsteilheidscriterium gebruikt. In dit onderzoek wordt een andere correctiemethode toegepast. Het identificeren en corrigeren van de hoge golfperioden bij deining is gebaseerd op empirische relaties die zijn afgeleid door RIKZ [1995]. De functiebeschrijving verschilt per periodemaat en ziet er voor de periodemaat $T_{m-1,0}$ en T_p als volgt uit [WL, 2004]:

$$\begin{aligned} T_p &= 1,15 \cdot c_1 \cdot \sqrt{H_{m0}} + 0,2 \cdot H_{m0} + 1,11 \\ T_{m-1,0} &= 1,13 \cdot c_2 \cdot \sqrt{H_{m0}} + 0,15 \cdot H_{m0} + 0,8 \end{aligned} \quad (2-1)$$

De golfperioden van alle combinaties van H_{m0} en T_p of $T_{m-1,0}$ die boven de empirische relatie liggen worden gereduceerd. Deze reductie ziet er als volgt uit:

$$\begin{aligned} T_p &= 1,05 \cdot c_1 \cdot \sqrt{H_{m0}} + 0,1 \cdot H_{m0} + 0,25 \\ T_{m-1,0} &= 1,04 \cdot c_2 \cdot \sqrt{H_{m0}} + 0,075 \cdot H_{m0} + 0,15 \end{aligned} \quad (2-2)$$

WL [2004] geeft een overzicht van de waarden van de parameters c_1 en c_2 uit de bovenstaande empirische relaties voor de golfmeetstations langs de Nederlandse kust.

Voor de meetlocaties in voorliggend onderzoek zijn de parameters overgenomen van de dichtstbijzijnde golfmeetstations, zie Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Overzicht van de parameters c_1 en c_2 die worden gebruikt voor de correctie van de hoge golfperioden bij deining.

Locatie	Omschrijving	Dichtbijzijnde golfmeetstation	Parameter c
CAWI	Cadzand	Scheur West SCW	$c_1 = 4,49$
CADW	Cadzand	Scheur West SCW	$c_1 = 4,49$
HAWI	Hansweert	Scheur West SCW	$c_1 = 4,49$
HAN1	Hansweert	Scheur West SCW	$c_1 = 4,49$
HFPL	Hoofdplaat	Scheur West SCW	$c_1 = 4,49$
HFP1	Hoodplaat	Scheur West SCW	$c_1 = 4,49$
KEET	Keeten	Schouwenbank	$c_1 = 4,36$
MRG	Marollegat	Schouwenbank	$c_1 = 4,36$
OS4	Oosterschelde	Schouwenbank	$c_1 = 4,36$
-	IJmuiden	IJmuiden 06	$c_2 = 3,99$

-	Maasmond	Lichteiland Goeree	$c_2 = 3,81$
---	----------	--------------------	--------------

3. Afleiden van overschrijdingskrommen, golfstatistiek en betrouwbaarheidsintervallen

In aanvulling op RIKZ [2007a], zijn in dit rapport niet alleen de overschrijdingskrommen gemaakt, maar zijn ook conditionele Weibull verdelingen gefit op de geselecteerde storm-maxima van de golfparameters. Daarnaast zijn betrouwbaarheidsintervallen rondom deze Weibull verdelingen geconstrueerd.

Voor het maken van de overschrijdingskrommen van de gemeten golfperiode en golfhoogte moet men de kans van overschrijding van de maxima kennen. De achterliggende gedachte is dat de hoogste waarde uit een tienjarige meetreeks, wel bij benadering maar niet precies een gemiddelde overschrijdingskans van voorkomen van eens in de 10 jaar hoeft te hebben. In Den Heijer [2005] wordt de overschrijdingskans van een maxima als volgt afgeschat:

$$g_{xm} = \frac{N}{T_r} \cdot \left(1 - \frac{(m-a)}{(N+b)} \right) \quad (2-3)$$

met:

- g_{xm} schatting voor de overschrijdingskans
- N aantal maxima
- T_r aantal jaren waarnemingen
- m oplopend volgnummer van de maxima, waarbij het hoogste maximum de hoogste waarde van m krijgt
- a een constante gelijk aan 0,44
- b een constante gelijk aan 0,12

Deze methode is ook toepast in dit onderzoek.

Naast het afleiden van de overschrijdingskrommen van de gemeten maxima, zijn conditionele Weibull verdelingen gefit op de gemeten maxima en zijn betrouwbaarheidsintervallen rondom deze Weibull verdelingen geconstrueerd. De keuze voor de conditionele Weibull verdeling is gebaseerd op onderzoek naar golfparameters in RIKZ [1995].

De conditionele Weibull verdeling ziet er als volgt uit:

$$F(X > x) = \rho \cdot e^{\left\{ -\left(\frac{x}{\sigma}\right)^a + \left(\frac{\omega}{\sigma}\right)^a \right\}}; \quad x \geq \omega \quad (2-4)$$

Met:

- X de betreffende golfparameter waarvoor de Weibull verdeling is afgeleid;
- x de mogelijke waarde van X ;
- a de krommingsparameter;
- ω de drempelwaarde waarboven de statistiek is afgeleid;

- σ de schaalparameter;
- ρ de overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde ω

Let op de drempelwaarde ω is niet gelijk aan de drempelwaarde die voor de selectie van stormmaxima is gebruikt.

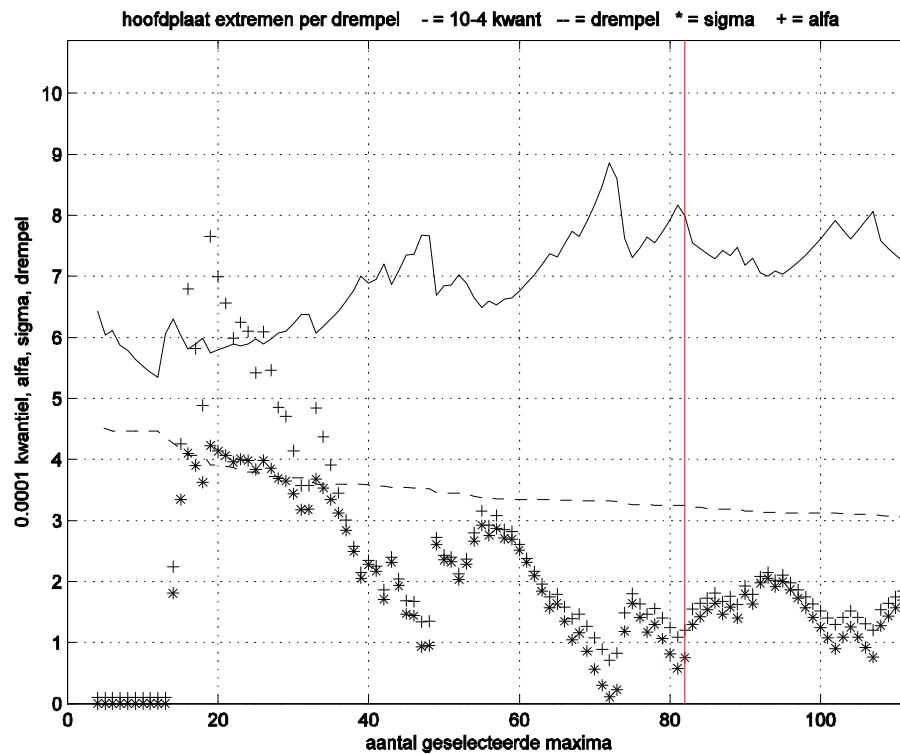
De waarde van de krommingsparameter α is afhankelijk van het aantal maxima waarop de verdelingfunctie gefit wordt. Het aantal te selecteren maxima is zodanig gekozen dat de waarde van α relatief ongevoelig is voor een kleine aanpassing in de drempelwaarde. Met ‘meest stabiele’ gebied is bepaald door de variatie van α binnen intervallen te kwantificeren en vervolgens dat interval te selecteren waar de waarde van α het minst varieert. Er is daarbij uitgegaan van een interval van 51 maxima dat langs het aantal te selecteren maxima wordt geschoven met als bovengrens 10 stormmaxima per jaar. Figuur 2.5 toont de waarde van α als functie van het aantal geselecteerde stormmaxima.

Nadat de waarde van krommingsparameter α is bepaald zijn de overige parameters van de conditionele Weibull verdeling afgeleid en kan de overschrijdingcurve worden geconstrueerd, zie Figuur 2.6.

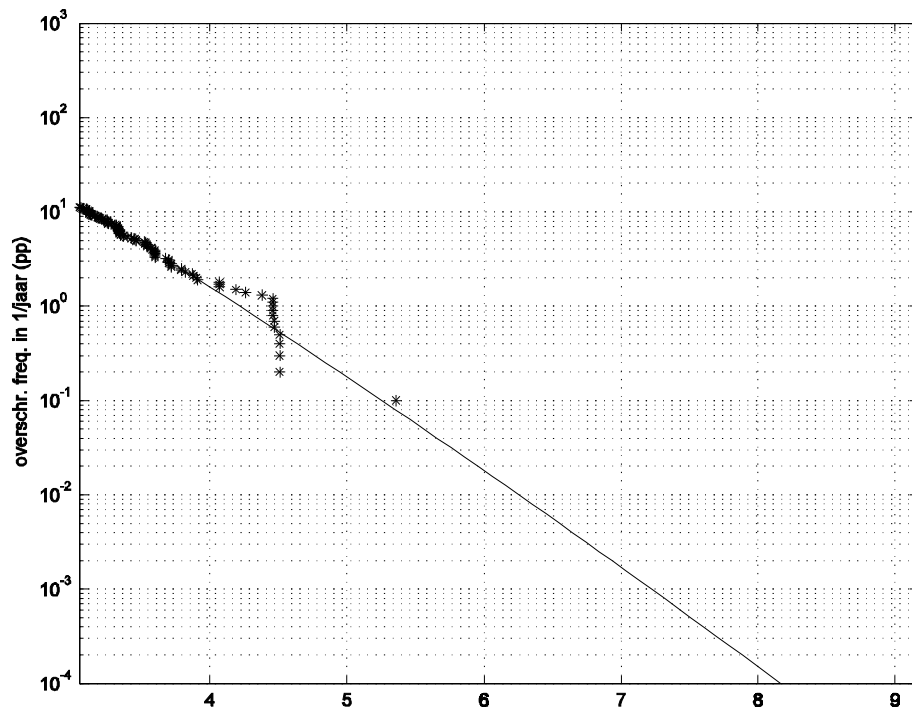
Om de betrouwbaarheidsintervallen af te leiden rond de Weibullverdelingen wordt een Monte Carlo procedure uitgevoerd. Door middel van de Bootstrap resampling methode wordt voor elke meetlocatie uit de reeks met N geselecteerde stormmaxima uit stap 2, een groot aantal nieuwe random reeksen met N maxima gegenereerd. De Bootstrap resampling is een techniek waarbij random trekkingen worden gedaan uit de originele reeks met waarnemingen [Efron, 1982].

Door voor elk van deze reeksen de parameters van de conditionele Weibull verdeling af te leiden kan de statistische karakteristieken van de overschrijdingskrommen worden bepaald, zoals de gemiddelde overschrijdingskromme, de 5% en 95% percentielwaarden en het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de overschrijdingskromme.

In overeenstemming met WL [2005] is het aantal berekeningen in de Monte Carlo procedure, M , gelijk genomen aan 1000. Dat wil zeggen dat er met behulp van Bootstrap resampling voor elke meetlocatie uit de N geselecteerde stormmaxima, 1000 random reeksen zijn gegenereerd.



Figuur 2.5 Het verloop van de parameters van de conditionele Weibull verdeling van de piekperiode voor meetlocatie Hoofdplaat als functie van het aantal geselecteerde maxima: de krommingsparameter α , de drempelwaarde ω en de schaalparameter σ . De rode lijn geeft het aantal maxima weer waarvoor de waarde van α het minst varieert.



Figuur 2.6 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Hoofdplaat geconstrueerd uit de geselecteerde maxima en de conditionele Weibull verdeling die op basis van deze maxima is afgeleid.

2.1.3 Vergelijking overschrijdingskrommen van golfcondities afgeleid met Hydra-K en uit metingen

De overschrijdingskrommen van de golfhoogte en de golfperiode afgeleid met Hydra-K en uit metingen zijn in Sectie 2.2 tot en met Sectie 2.9 voor elke meetlocatie met elkaar vergeleken.

Voor de meetlocaties langs de Hollandse Kust is de vergelijking uitgevoerd voor de spectrale golfhoogte H_{m0} en de golfperiode $T_{m-1,0}$. Door het ontbreken van de periodemaat $T_{m-1,0}$ als standaard uitvoerparameter in de SWAN databases van de Westerschelde en Oosterschelde, is voor de meetlocaties in de Westerschelde en Oosterschelde de vergelijking uitvoert voor de golfpiekperiode.

De piekperiode die door SWAN wordt bepaald en ook uit het gemeten golfspectrum is afgeleid, is de periode die hoort bij de maximale energiedichtheid in het spectrum (T_p). Deze periodemaat is een geschikte periodemaat voor een enkeltoppig en niet te breed golfspectrum.

Voor een meertoppig en een breed golfspectrum is deze piekperiodemaat minder geschikt. In het golfspectrum zijn dan meerdere processen terug te vinden die de vorm van het spectrum beïnvloeden. Zo zijn de laagfrequente golven aan deining gerelateerd en de hoogfrequente golven aan wind gerelateerd. Daarnaast kan het golfspectrum richting de kust vervormen door dieptegeïnduceerde golfbreking.

Meertoppige spectra worden met name gevonden in de monding van estuaria. De piekperiode T_p vertoont in meertoppige spectra een veel minder stabiel verloop. Dit is inderdaad terug te vinden in de overschrijdingskrommen die met Hydra-K in het estuaria van de Westerschelde en de Oosterschelde zijn afgeleid. De overschrijdingskrommen laten een springerig verloop zien. De piekperiode T_p neemt op een aantal meetlocaties zelfs af als functie van de herhalingsstijd¹.

De overschrijdingskrommen voor de periodemaat $T_{m-1,0}$ voor de locaties langs de Hollandse Kust laten wel een geleidelijk oplopende curve zien: de golfperiode neemt toe bij grotere herhalingsstijd. Kennelijk geeft deze periodemaat een stabiel verloop dan de piekperiode. Om deze hypothese te toetsen is voor elke meetlocatie in de Westerschelde en de Oosterschelde, de periodemaat $T_{m-1,0}$ uit de Hydra-K database van de dichtstbijzijnde HR-locaties getransformeerd naar de piekperiode T_p ter plaatse van het meetpunt. Deze transformatie ziet er als volgt uit:

$$T_{p,\text{meetpunt}} = \alpha_1 \cdot T_{m-1,0,\text{meetpunt}} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot T_{m-1,0,\text{HRlocatie}} \quad (2-5)$$

met:

- α_1 de transformatiefactor van golfperiode $T_{m-1,0}$ naar de piekperiode T_p ter plaatse van het meetpunt
- α_2 de transformatiefactor om de verschuiving van het golfspectrum van de dichtstbijzijnde Hydra-K locatie naar de meetlocatie in rekening te brengen

De transformatiefactor α_1 van de golfperiode $T_{m-1,0}$ naar de piekperiode T_p ter plaatse van de meetlocatie j is als volgt bepaald:

$$\alpha_{1,j} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{T_{p,i,j}}{T_{m-1,0,i,j}}}{N} \quad (2-6)$$

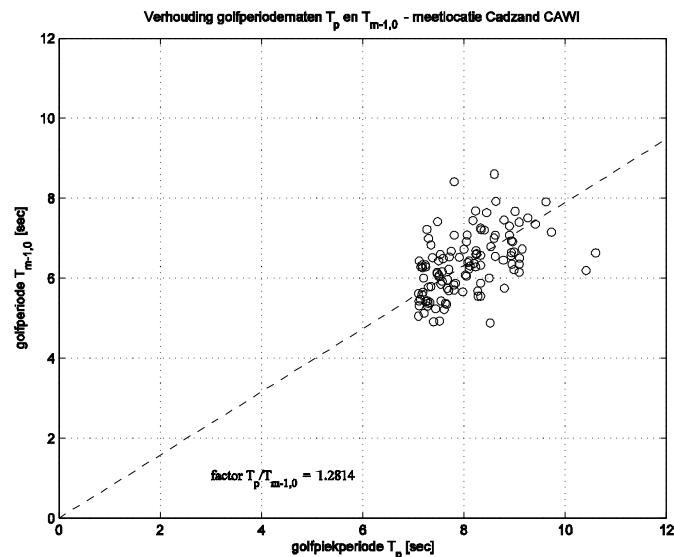
Met N het aantal combinaties van periodematen $T_{m-1,0}$ en T_p die uit de gemeten golfspectra zijn afgeleid.

Een voorbeeld voor meetlocatie Cadzand is gegeven in Figuur 2.7. De correlatie tussen $T_{m-1,0}$ en T_p is relatief zwak. Dit is onder andere te wijten aan het instabiele en fluctuerende verloop van de piekperiode door de dubbeltoppigheid van het spectrum. Bovendien is elk golfspectrum ontstaan onder verschillende omstandigheden. De vorm van het spectrum en dus de periodematen zijn beïnvloed door processen als deining, wind en dieptegeïnduceerde golfbreking. Ondanks de relatief zwakke correlaties gebruiken we de transformatiefactor om de piekperiode uit de periodemaat $T_{m-1,0}$ af te leiden.

1. In de HR-studies komen verschillende piekperiodematen terug, zoals T_{pm} , T_{pb} , T_{pbeq} . Om het een en ander te verduidelijken merken we het volgende op. Roskam [1997] heeft de voor de Nederlandse zeekust een methode ontwikkeld om de maatgevende piekperiode te bepalen die representatief is voor een arbitrair spectrum. Deze maatgevende piekperiode, de T_{pm} , is gelijk aan de maximale waarde van 1) de piekperiode voor een enkeltoppig (en eventueel een breed spectrum) T_{pb} en 2) de piekperiode voor meertoppige en/of brede spectra T_{pbeq} . In voorliggend onderzoek is dit onderscheid niet gemaakt en is gebruik gemaakt van piekperiode T_p , welke gelijk is aan de piekperiode T_{pb} van een enkeltoppig spectrum.

De figuren voor de overige meetlocaties zijn opgenomen in Bijlage D. Tabel 2.5 geeft een overzicht van de transformatiefactoren voor de meetlocaties in de Westerschelde en de Oosterschelde.

Er is aangenomen dat het golfspectrum van de meetlocatie in de richting van de kust niet meer verandert. De transformatiefactor α_2 is gelijk genomen aan 1.



Figuur 2.7 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Cadzand CAWI.

Tabel 2.5 Transformatiefactor van golfperiode naar $T_{m-1,0}$ naar de piekperiode T_p .

Locatie	Omschrijving	Verhouding golfperiode T_p en $T_{m-1,0}$
<i>Westerschelde</i>		
CAWI	Cadzand ¹	1,28
CADW	Cadzand ¹	1,18
HAWI	Hansweert	1,39
HAN1	Hansweert	1,25
HFPL	Hoofdplaat	1,09
HFP1	Hoodplaat	1,05
<i>Oosterschelde</i>		
KEET	Keeten	1,14
MRG	Marollegat	1,19
OS4	Oosterschelde	1,26

¹ het verschil CAWI en CADW van 1.28 en 1.18 is vrij groot. De reden hiervoor is hoogstwaarschijnlijk het verschil tussen rekenroosters, zie bijlage A en Tabel 2.1. De resultaten van CADW zijn gebaseerd op een veel grover rekenrooster waarin de bodemligging op de specifieke locatie niet goed overeenkomt met de werkelijke bodemligging.

De overschrijdingskrommen voor de golfpiekperiode T_p die bepaald is op basis van de golfperiode $T_{m-1,0}$ zijn aan de figuren in Sectie 0 tot en met Sectie 2.9 toegevoegd. Ze laten inderdaad een stabiel verloop zien. Per meetlocatie zijn de volgende figuren opgenomen:

1. de overschrijdingskrommen van de golfhoogte en de golfperiode voor de meetlocaties zonder betrouwbaarheidsband; en
2. de overschrijdingskrommen van de golfhoogte en de golfperiode voor de meetlocaties met betrouwbaarheidsband;

Voor een aantal meetlocaties is ook een figuur opgenomen met de golfhoogten behorend bij de geselecteerde maxima voor de golfpiekperioden voor meetlocaties. Deze figuur is bedoeld om na te gaan of de geselecteerde maxima gelijktijdig optreden met hoge golven, met andere woorden of er echt sprake is van een geselecteerde storm.

Ondanks het feit dat de Hydra-K resultaten voor herhalingstijden tussen de 1 en 10 à 20 jaar minder betrouwbaar zijn, zie HKV&WL [2006], zijn de resultaten van deze herhalingstijden wel opgenomen in de figuren.

2.2 Golfparameters meetlocatie Cadzand CAWI & Cadzand CADW

Voor de meetlocaties Cadzand CAWI en Cadzand CADW kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

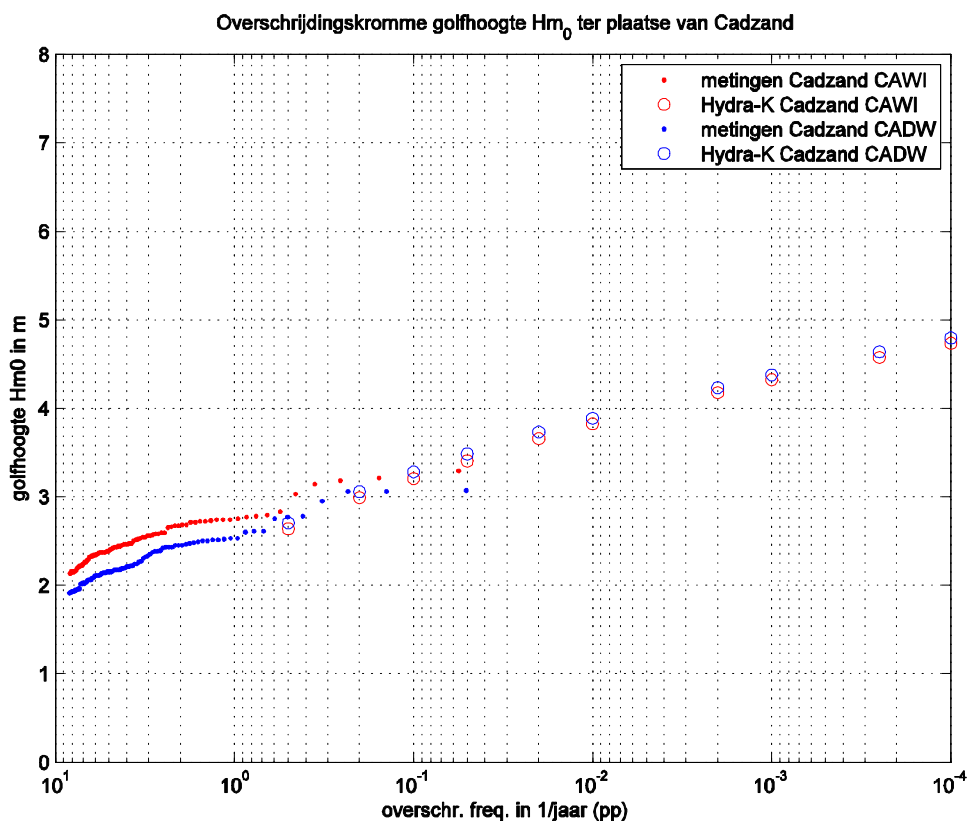
- in het frequentiebereik waar metingen en Hydra-K elkaar overlappen (herhalingstijd tussen de 2 en 20 jaar) kan op basis van de overschrijdingskrommen van de golfhoogte zonder onzekerheidsband worden geconcludeerd dat de verschillen tussen metingen en Hydra-K beperkt zijn. Echter de overschrijdingskrommen van de golfhoogte met onzekerheidsband laten zien dat de golfhoogte bij kleinere overschrijdingsfrequenties voor de metingen minder sterk toenemen dan de Hydra-K resultaten aangeven. De golfhoogte afgeleid met Hydra-K ligt voor Cadzand CAWI net boven voor Cadzand CADW net op 95%-percentielwaarde en is dus iets aan de hoge kant. Dit betekent niet direct dat Hydra-K voor lage overschrijdingsfrequenties (buiten het gemeten frequentiebereik) de golfhoogte ter plaatse van Cadzand overschat. In omstandigheden met zeer extreme waterstanden kunnen de golven namelijk beter doordringen tot aan de dijk en de meetpaal. In de meetreeksen ontbreken deze omstandigheden en wordt de doordringing van golven gerelateerd aan deining gehinderd door zandbanken langs de kust.
- de overschrijdingskrommen van de golfpiekperiode T_p afgeleid met Hydra-K (open cirkels in Figuur 2.9) tonen een springerig verloop en zijn lager dan de metingen. De piekperioden liggen structureel onder de curve met de 5%-percentielwaarden van de metingen. De piekperioden bij een normfrequentie 1/4000 liggen orde grootte 1,0-1,5 sec (~ 11%) onder de 5%-percentielwaarden.

- de overschrijdingskrommen van de via periodemaat $T_{m-1,0}$ afgeleide piekperiode T_p (plus-teken in Figuur 2.9) laten een stabiel verloop zien. Voor Cadzand CAWI valt de piekperiode bij de normfrequentie binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval. Voor Cadzand CADW ligt deze echter nog onder het 5%-percentiel.

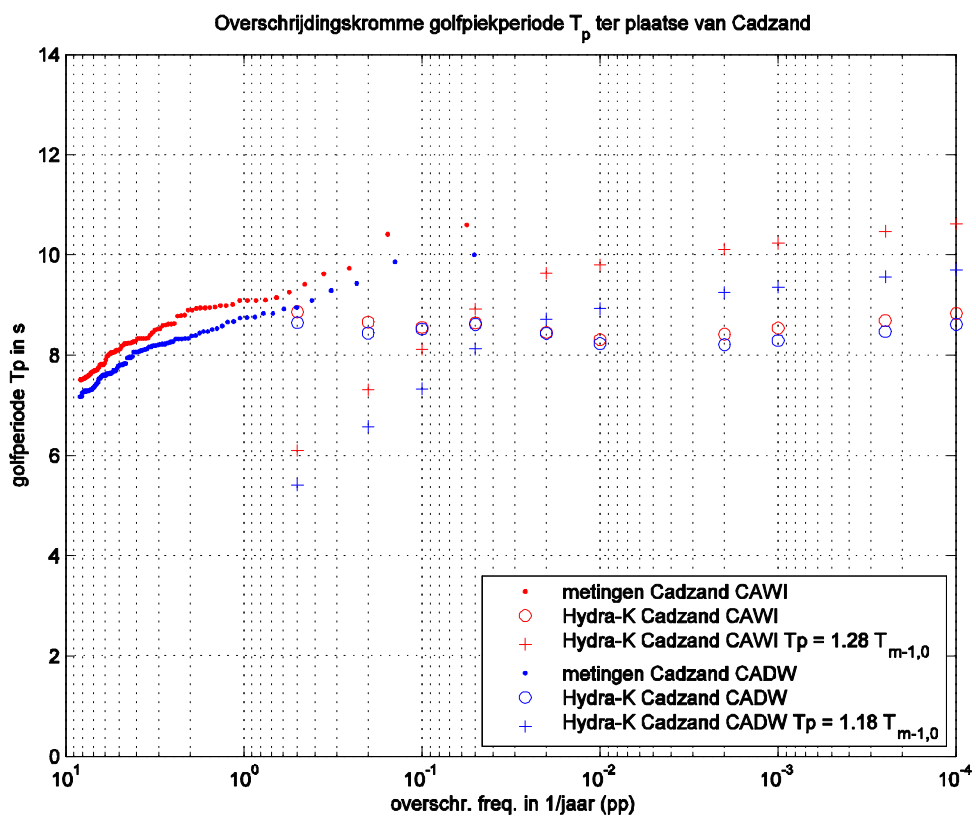
Met name de onderschatting van de piekperiode door Hydra-K is significant. Les [2007] is daarom nagegaan of de golfrichting behorend bij de geselecteerde stormmaxima ook een belastende richting is, dus in de richting van de dijknormaal en niet parallel aan de virtuele dijk in het meetpunt. Aangezien ter plaatse van Cadzand CADW met een directional waverider is gemeten kan dit eenvoudig worden nagegaan. In Bijlage C is de golfrichting behorend bij de geselecteerde golfhoogte en golfperiode weergegeven. Voor Cadzand komen de golven zoals verwacht mag worden bij de geselecteerde stormmaxima hoofdzakelijk uit de noordwestelijke richting. Dit betekent dat de geselecteerde stormmaxima uit de belastende richting komen.

Figuur 2.14 en Figuur 2.15 tonen de golfhoogten die tijdens de geselecteerde piekperiodes optreden. De figuren laten zien dat de golfhoogten in veel gevallen onder drempelwaarde liggen die voor de selectie van golfhoogten is toegepast. Met andere woorden, er kan worden afgevraagd of de geselecteerde piekperiodes daadwerkelijk stormcondities betreft. Les [2007] onderzocht hoe de overschrijdingskrommen van de gemeten piekperiodes eruit zien indien een strenger selectiecriteria wordt gehanteerd. Les heeft daartoe voor Cadzand CADW de overschrijdingskrommen van de golfperiodes behorend bij de geselecteerde maxima van de golfhoogtes afgeleid. Door deze vorm van conditionele selectie wordt automatisch een golfperiode geselecteerd met een golfhoogte boven een bepaalde drempel. De introductie van deze afhankelijkheid heeft een reducerende werking op de geselecteerde golfperiodes. De overschrijdingskromme komt lager te liggen, zie Bijlage C. Doordat de kromme echter een steiler verloop heeft, zal de golfperiode die correspondeert met de normfrequentie vermoedelijk wel hoger uitvallen.

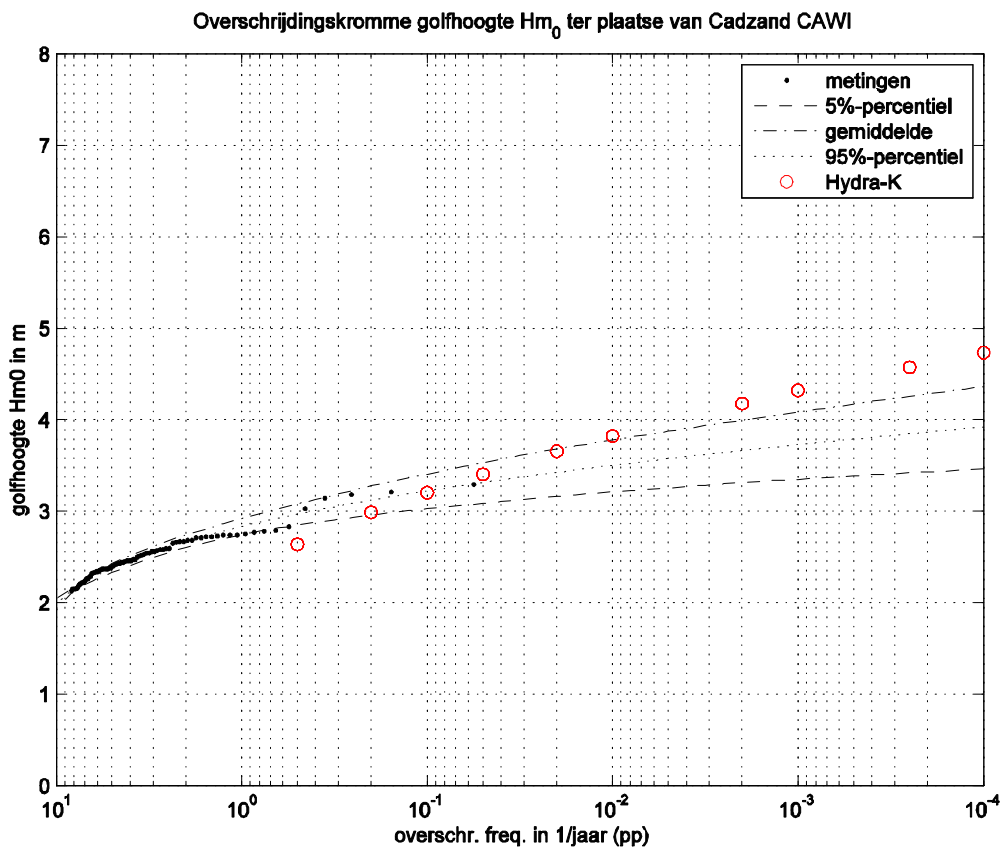
Er wordt aanbevolen de onderschatting van de golfperiode door Hydra-K in vervolg onderzoek verder te onderzoeken. Het is daarbij belangrijk om de gehele Hydra-K keten onder de loep te nemen. De oorzaak voor de afwijking kan gerelateerd zijn aan zowel de statistiek als aan de golfberekeningen met SWAN.



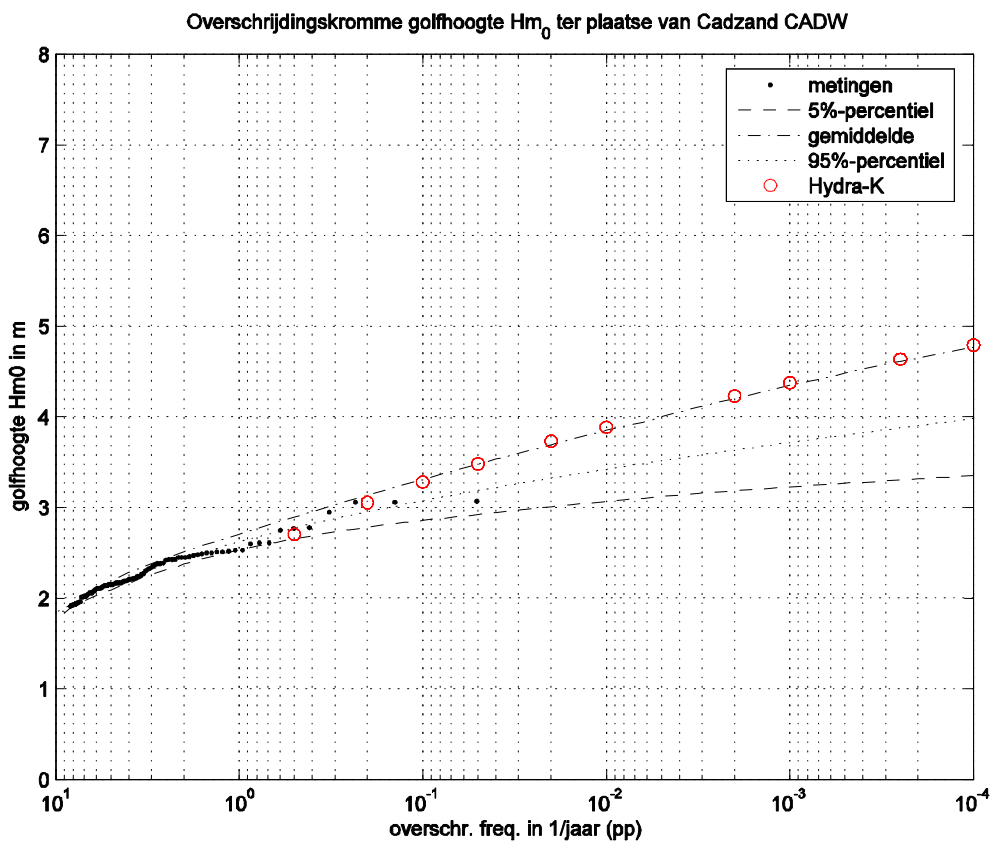
Figuur 2.8 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Cadzand CAWI en Cadzand CADW.



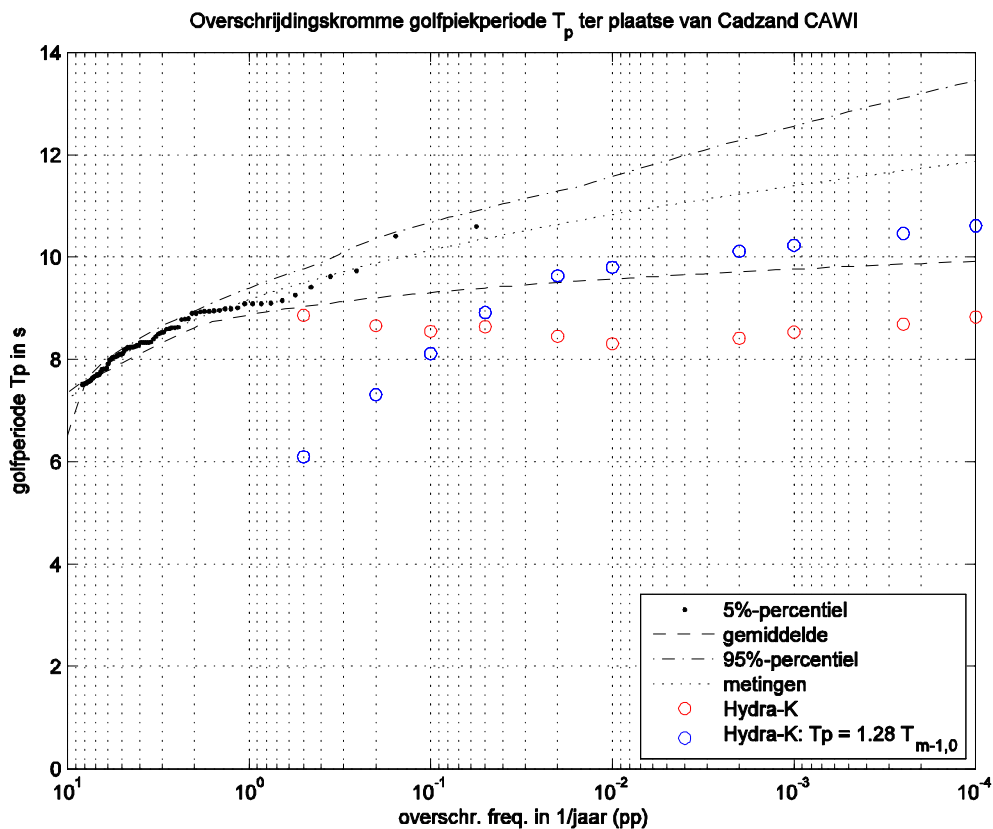
Figuur 2.9 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Cadzand CAWI en Cadzand CADW.



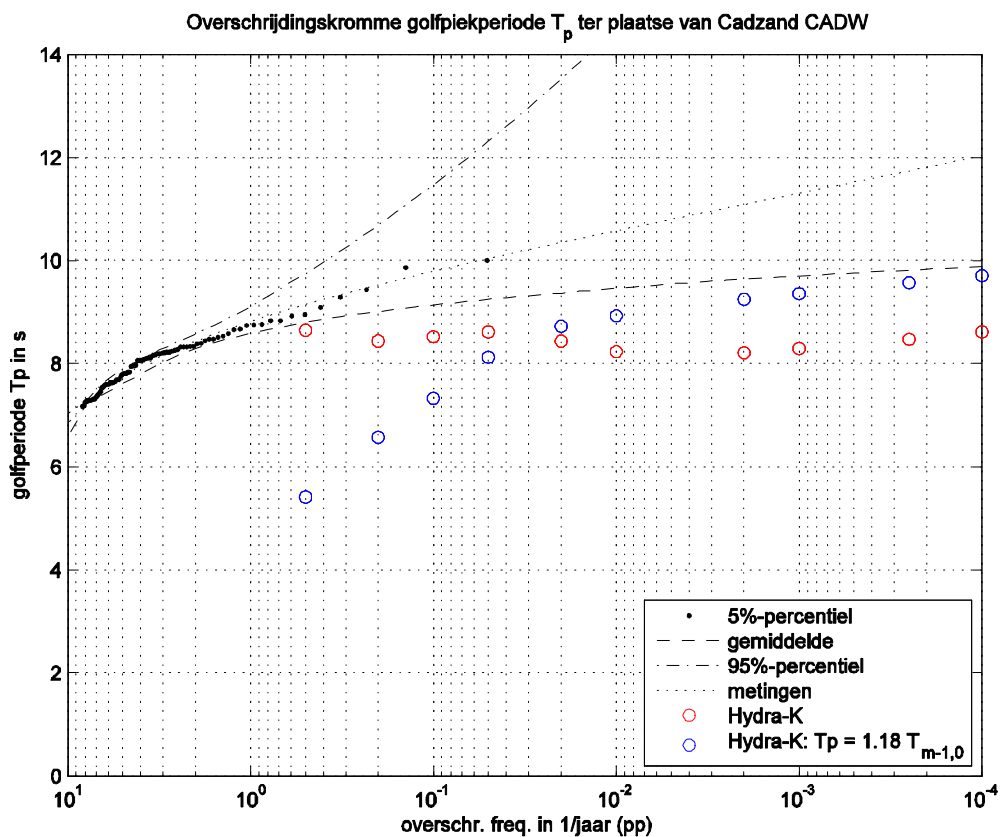
Figuur 2.10 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Cadzand CAWI.



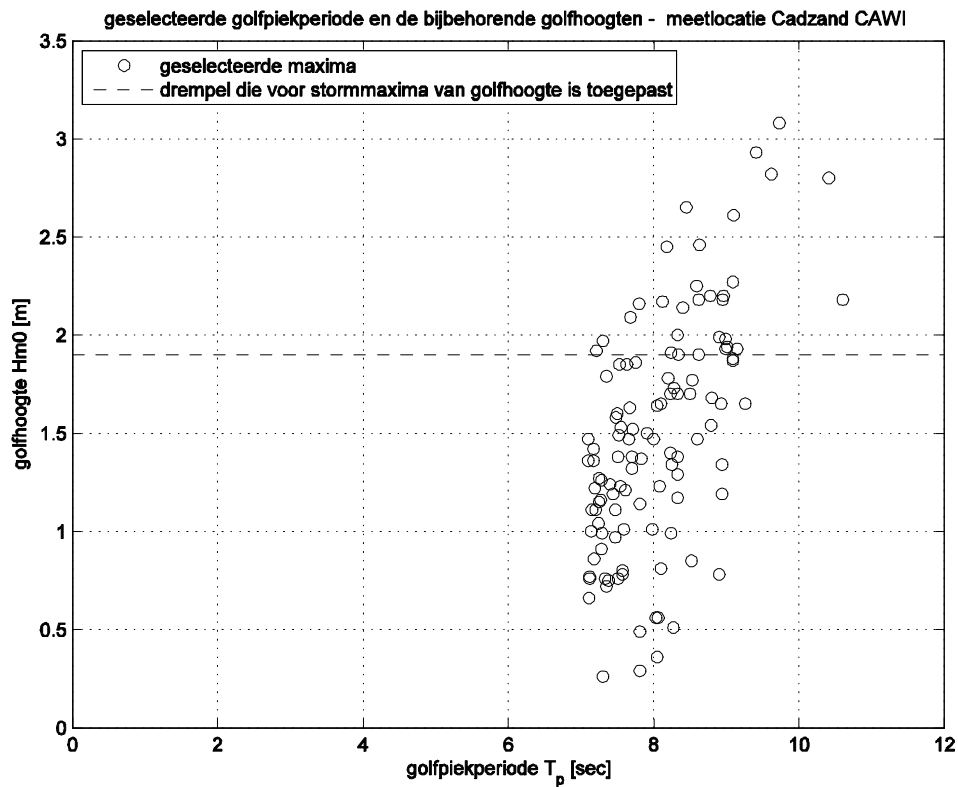
Figuur 2.11 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Cadzand CADW.



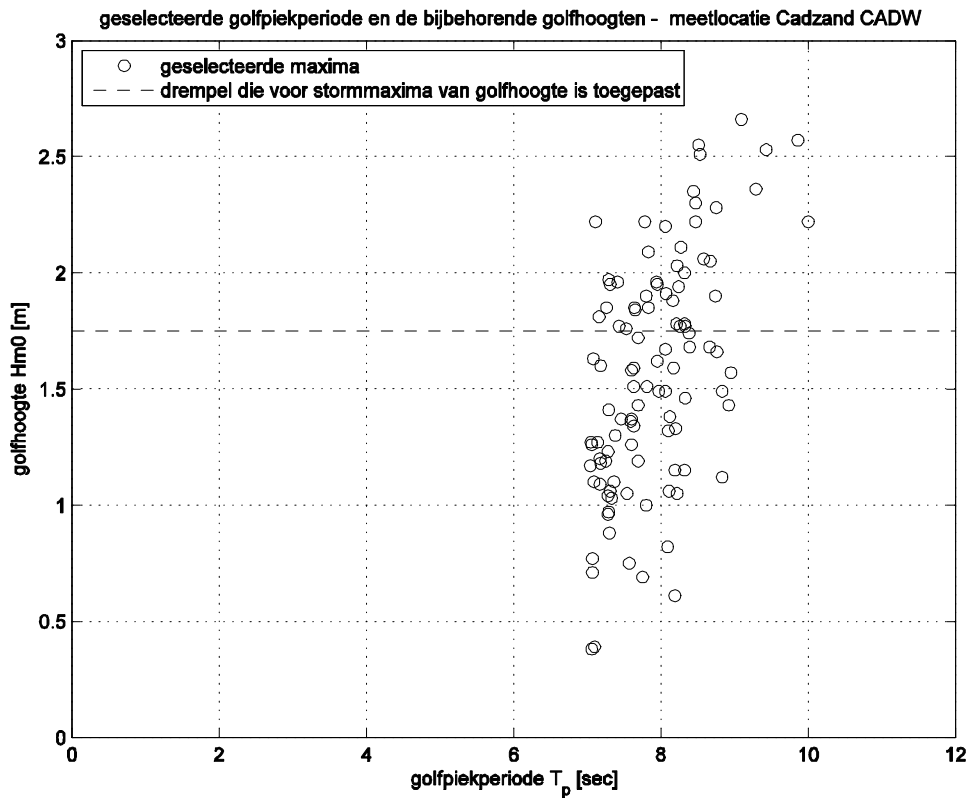
Figuur 2.12 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Cadzand CAWI.



Figuur 2.13 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Cadzand CADW.



Figuur 2.14 Golfhoogten behorend bij de geselecteerde maxima voor de golfpiekperioden voor meetlocatie Cadzand CAWI.

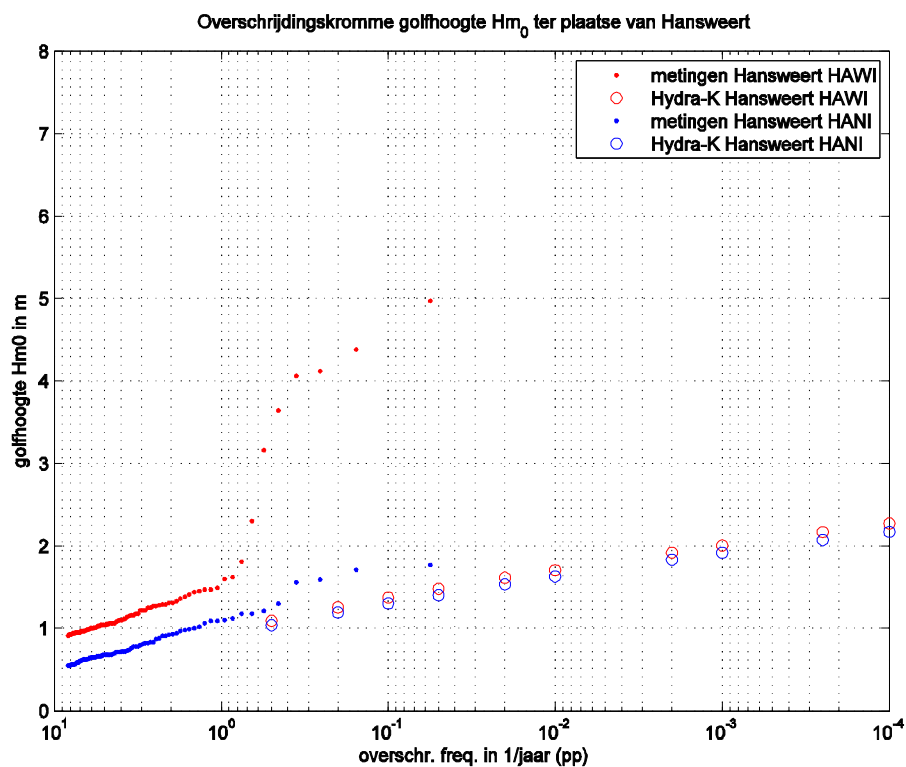


Figuur 2.15 Golfhoogten behorend bij de geselecteerde maxima voor de golfpiekperioden voor meetlocatie Cadzand CADW.

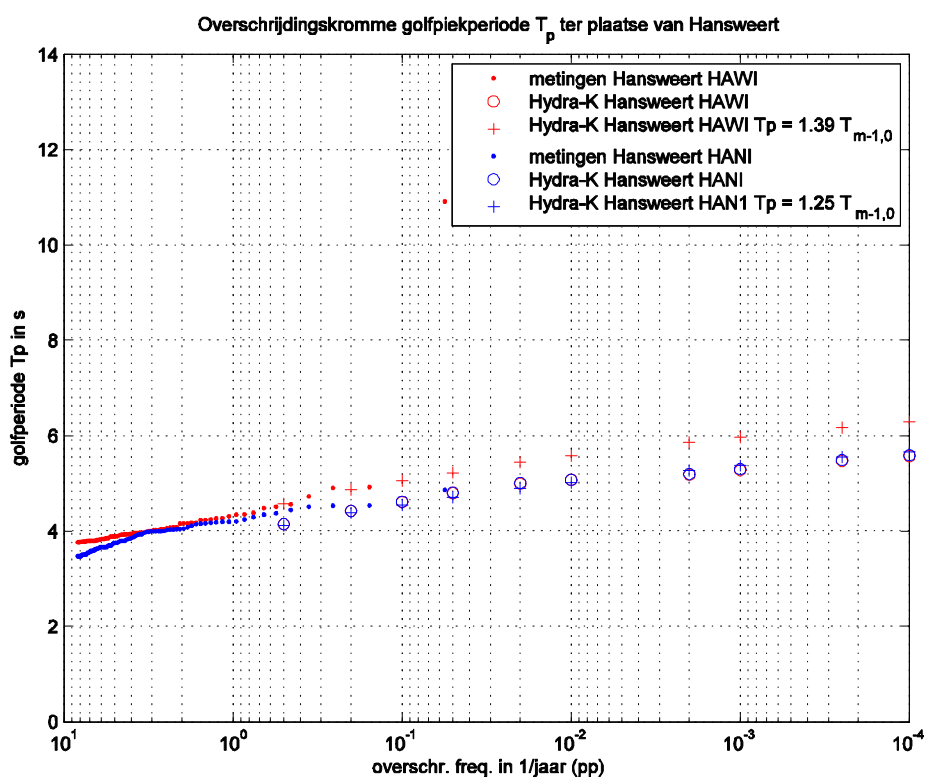
2.3 Golfparameters meetlocaties Hansweert HAWI & Hansweert HANI

Voor de meetlocaties Hansweert HAWI en Hansweert HANI kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

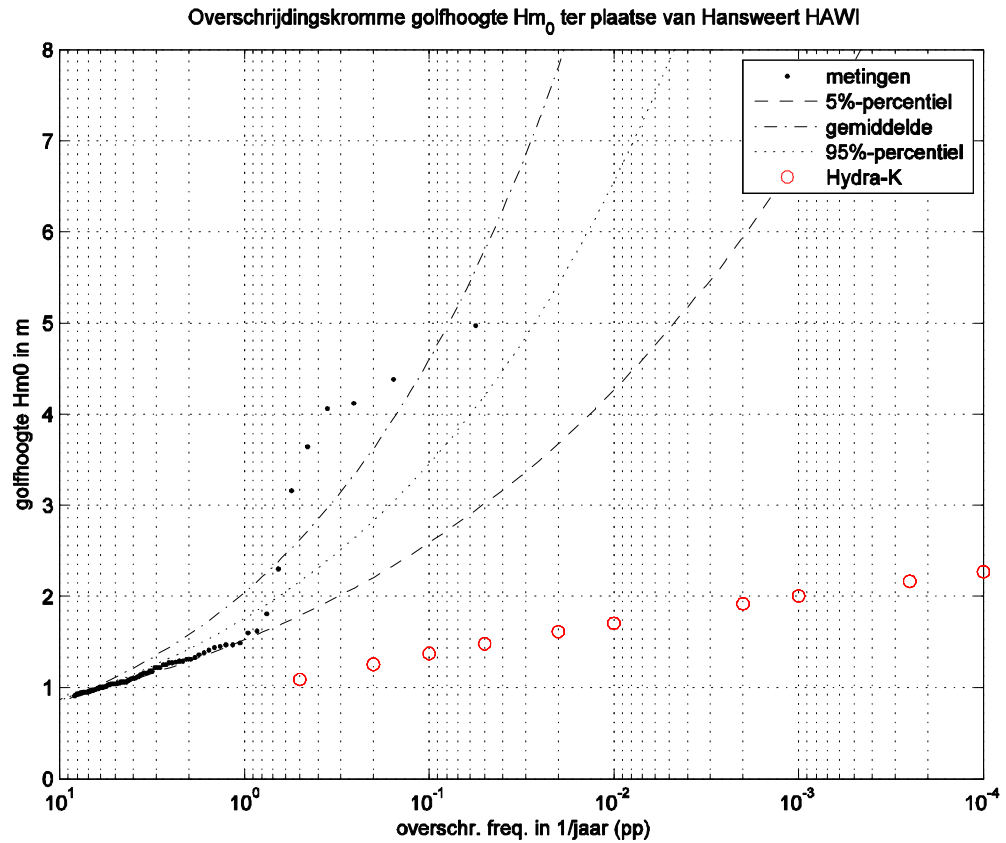
- het meest opvallend is het afwijkende verloop van de golfhoogte voor de locatie Hansweert HAWI. De golfhoogten afgeleid met Hydra-K zijn veel lager dan de golfhoogten die in de meetreeksen geselecteerd zijn. Indien de metingen betrouwbaar zijn impliceert dit dat de SWAN berekeningen er goed naast zitten. Les [2007] heeft de SWAN resultaten uit de Hydra-K keten geïsoleerd en zodoende de prestatie van SWAN verder onderzocht. Hieruit blijkt inderdaad dat SWAN nooit golfhoogten groter dan 2 m berekend in de omgeving van Hansweert. Nader analyse van de meetbestanden maakte duidelijk dat het verschil in overschrijdingskrommen tussen Hydra-K en metingen te verklaren zijn door fouten in meetbestanden. De betrouwbaarheidsbanden zijn sterk beïnvloed door de fouten, daarom trekken we conclusies op basis van Figuur 2.16. De golfhoogten afgeleid met Hydra-K in het gemeten frequentiebereik wijken orde 0,2 m af van de golfhoogten afgeleid uit metingen. Aangezien Hansweert relatief ver landinwaarts in de Westerschelde ligt, worden de golfcondities met name bepaald door locale windgedreven golven. De afwijkingen tussen de overschrijdingskrommen zijn daardoor met name gerelateerd aan locale verstoringen, bijvoorbeeld het effect van morfologische verstoringen als gevolg van zandbanken op de golfmetingen, en in mindere mate aan de diepladerstatistiek.
- de overschrijdingskrommen van de golfpiekperiode T_p afgeleid met Hydra-K en afgeleid met Hydra-K via periodemaat $T_{m-1,0}$ tonen beide een stabiel en geleidelijk verloop. De overschrijdingskrommen van de piekperiode afgeleid met Hydra-K vallen voor het hele frequentiebereik binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de metingen. Ook de kromming van de curves komt goed overeen met die van de metingen.



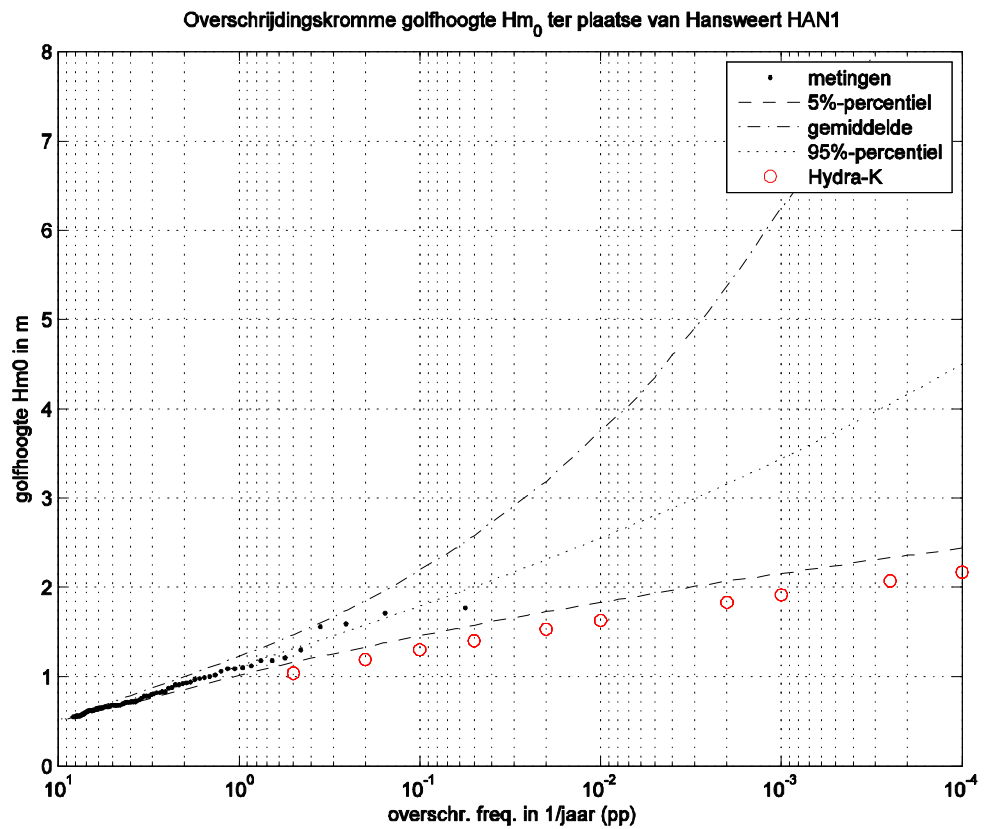
Figuur 2.16 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Hansweert HAWI en Hansweert HANI.



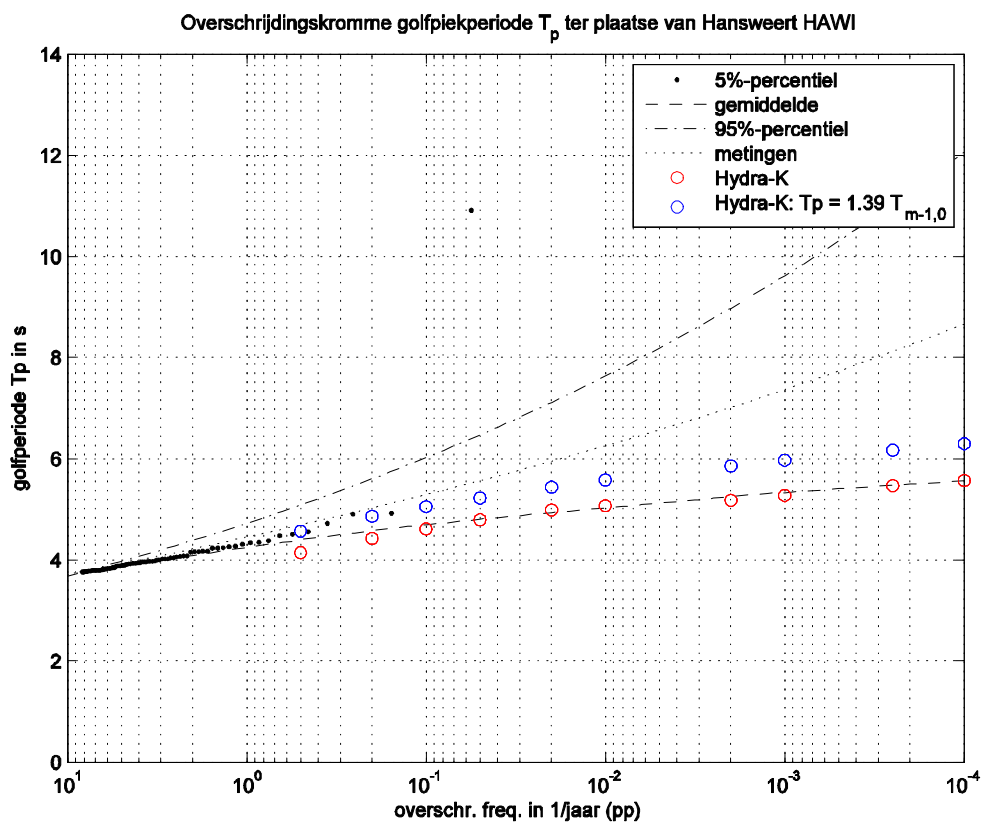
Figuur 2.17 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Hansweert HAWI en Hansweert HANI.



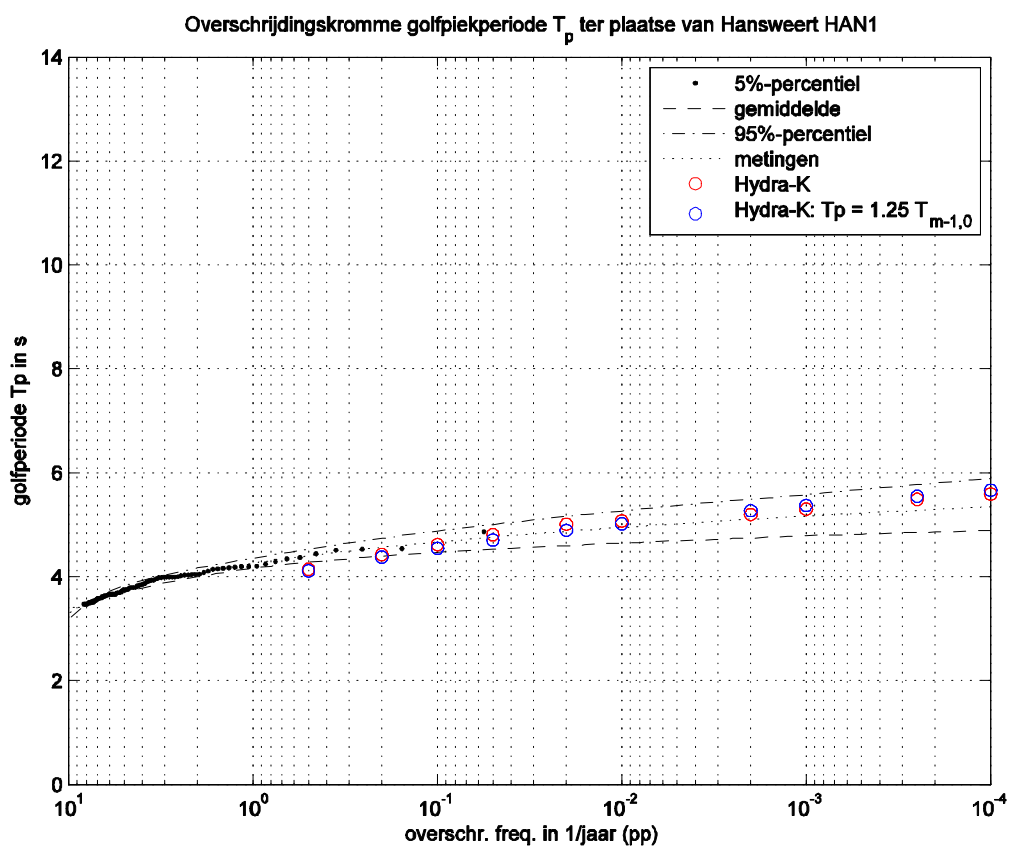
Figuur 2.18 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Hansweert HAWI.



Figuur 2.19 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Hansweert HAN1.



Figuur 2.20 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Hansweert HAWI.

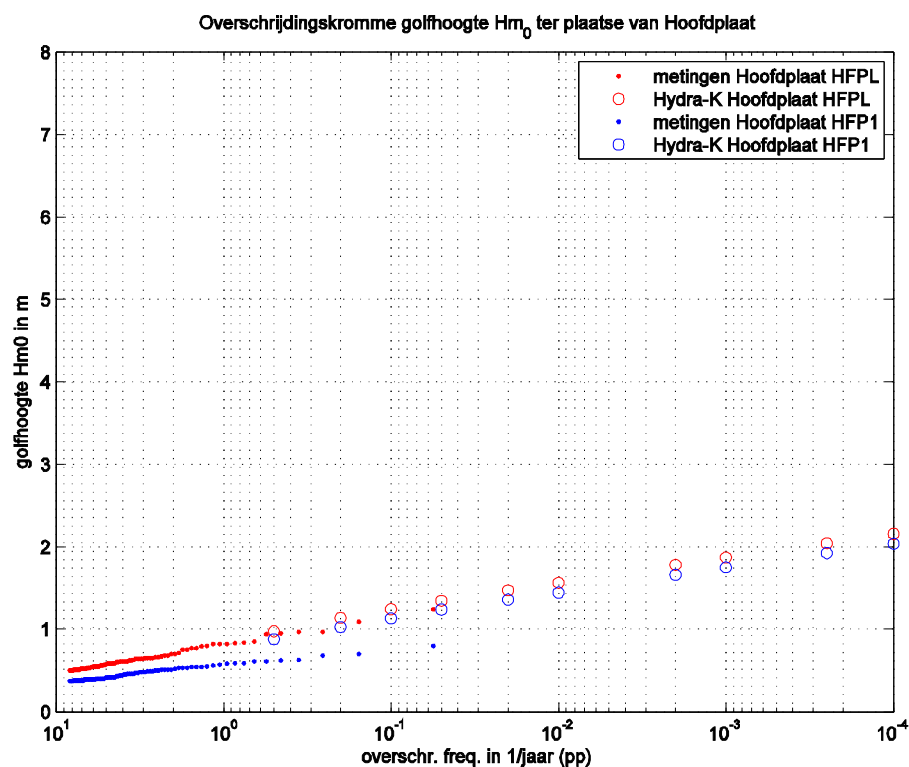


Figuur 2.21 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Hansweert HAN1.

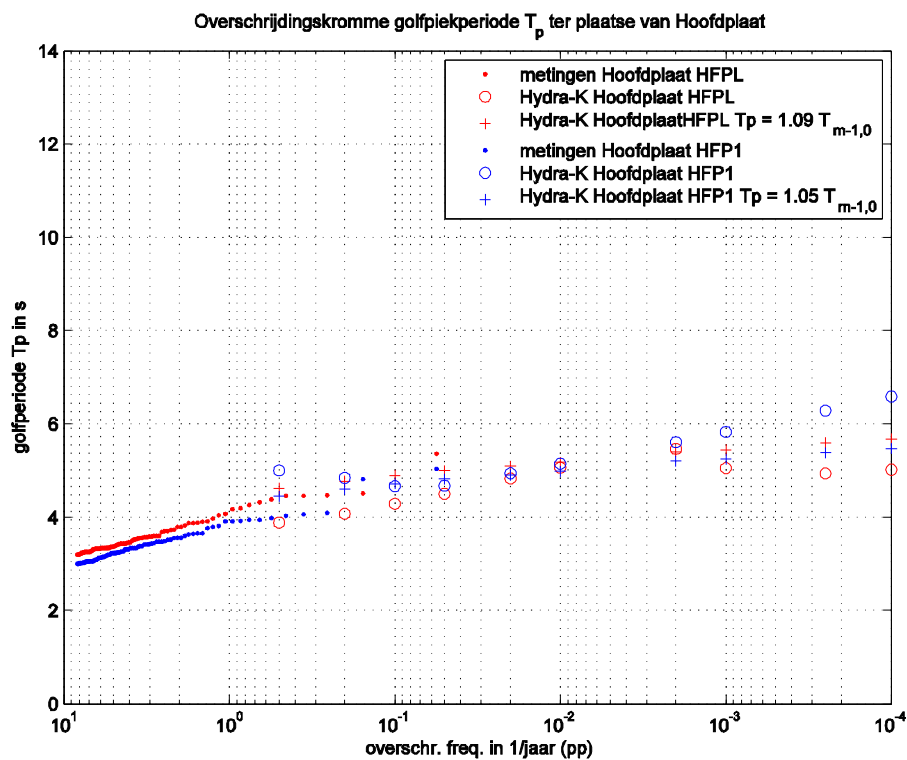
2.4 Golfparameters meetlocaties Hoofdplaat HFPL & Hoofdplaat HFP1

Voor de meetlocaties Hoofdplaat HFPL en Hoofdplaat HFP1 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

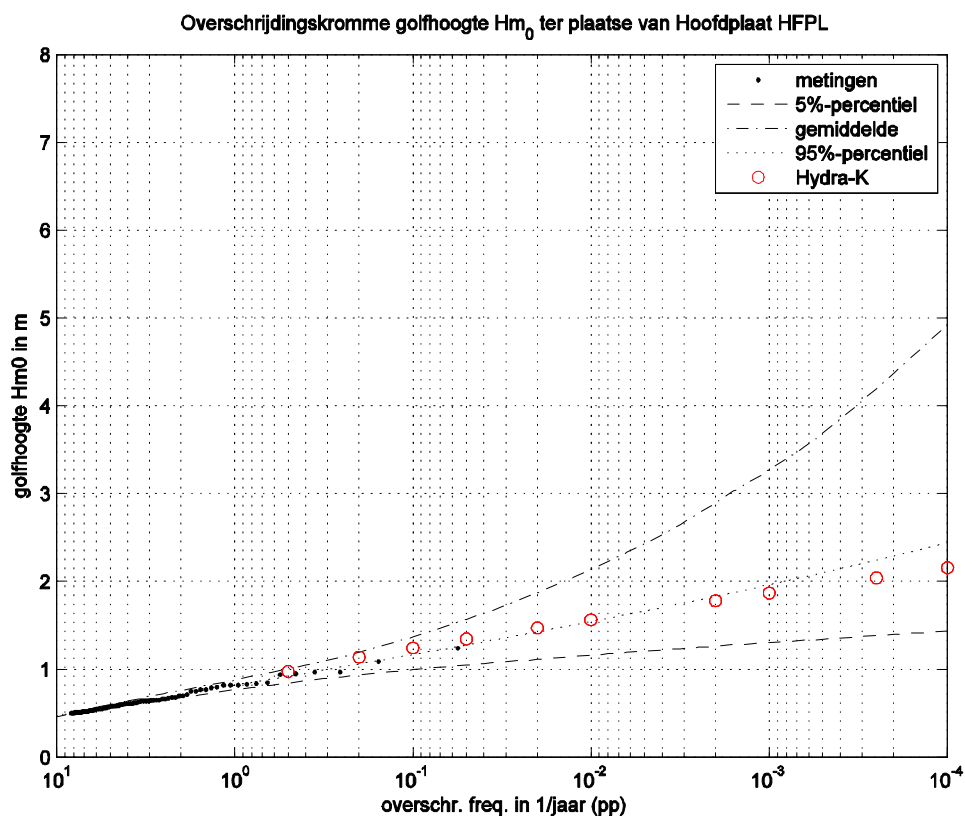
- op basis van de overschrijdingskrommen van de golfhoogte zonder én met onzekerheidsband kan worden geconcludeerd dat de verschillen tussen metingen en Hydra-K voor de meetlocatie Hoofdplaat HFPL beperkt zijn. In het gehele frequentiebereik vallen de met Hydra-K berekende golfhoogtes binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de metingen.
- Voor meetlocatie Hoofdplaat HFP1 die iets dichterbij de kust ligt lijken de met Hydra-K berekende golfhoogtes aan de hoge kant. Redenen hiervoor kunnen zijn dat door de verdiepte bodem in het SWAN model van de Westerschelde, de golven in de richting van de kust in het SWAN model minder breken dan in werkelijkheid. De golfhoogte behorende bij de normfrequentie valt nog wel net binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de metingen.
- de overschrijdingskrommen van de golfpiekperiode T_p afgeleid met Hydra-K (open cirkels in Figuur 2.24) tonen een beetje een springerig verloop. De overschrijdingskrommen van de via periodemaat $T_{m-1,0}$ afgeleide piekperiode T_p (plustekens in Figuur 2.24) laten een stabiel verloop zien. De krommen vallen voor beide meetlocaties vallen redelijk binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de metingen.



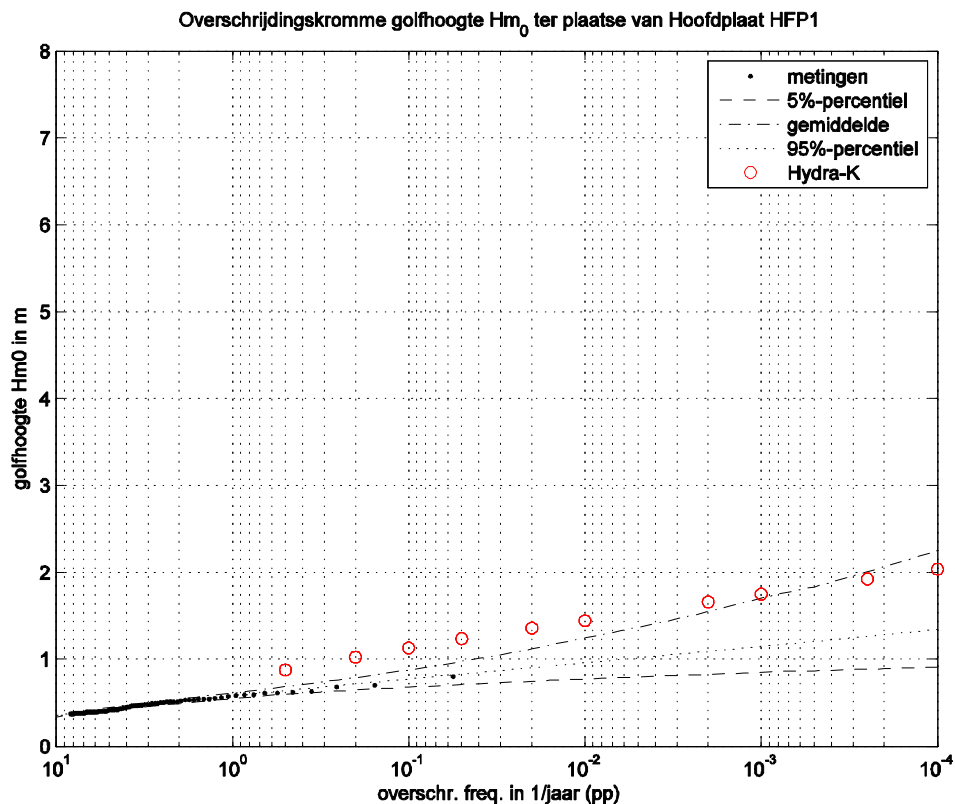
Figuur 2.22 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Hoofdplaat HFPL en Hoofdplaat HFP1.



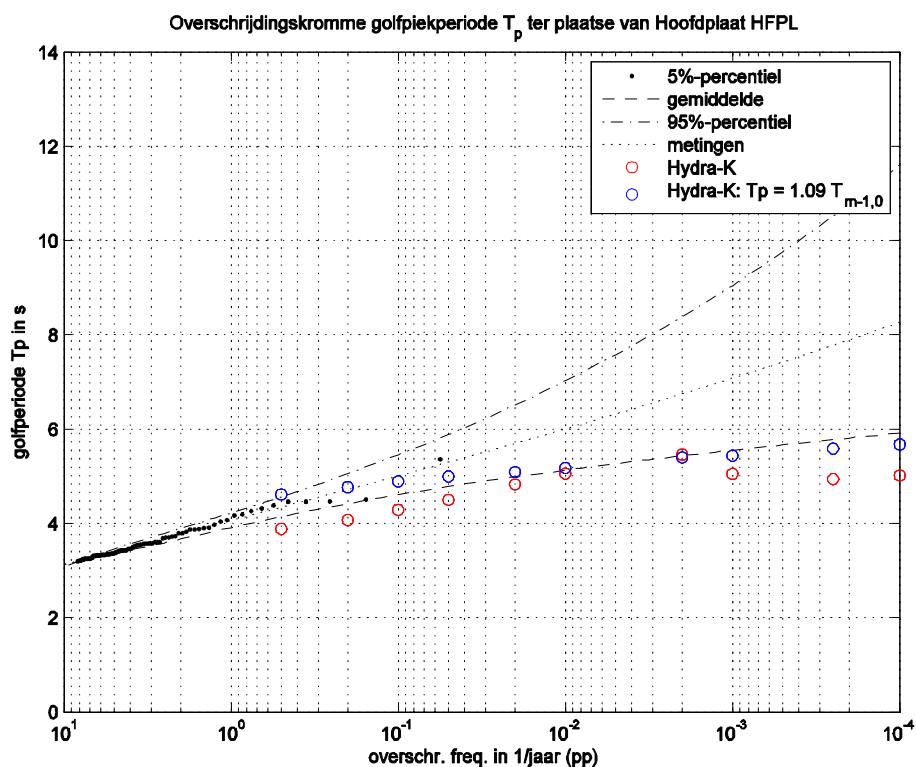
Figuur 2.23 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Hoofdplaat HFPL en Hoofdplaat HFP1.



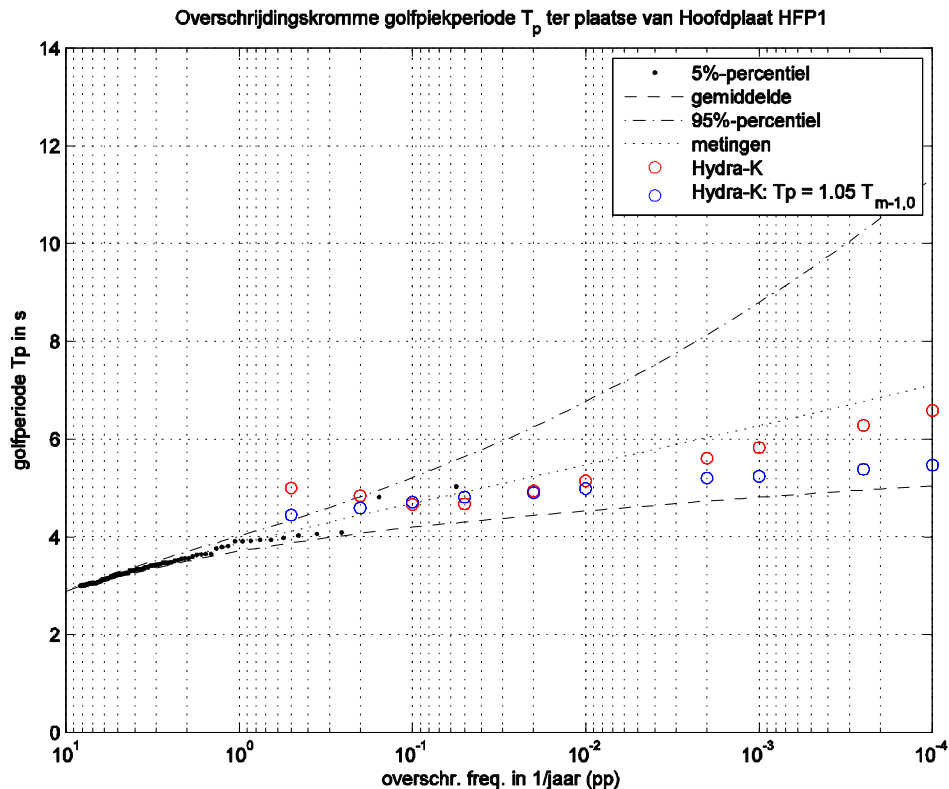
Figuur 2.24 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Hoofdplaat HFPL.



Figuur 2.25 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Hoofdplaat HFP1.



Figuur 2.26 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Hoofdplaat HFPL.

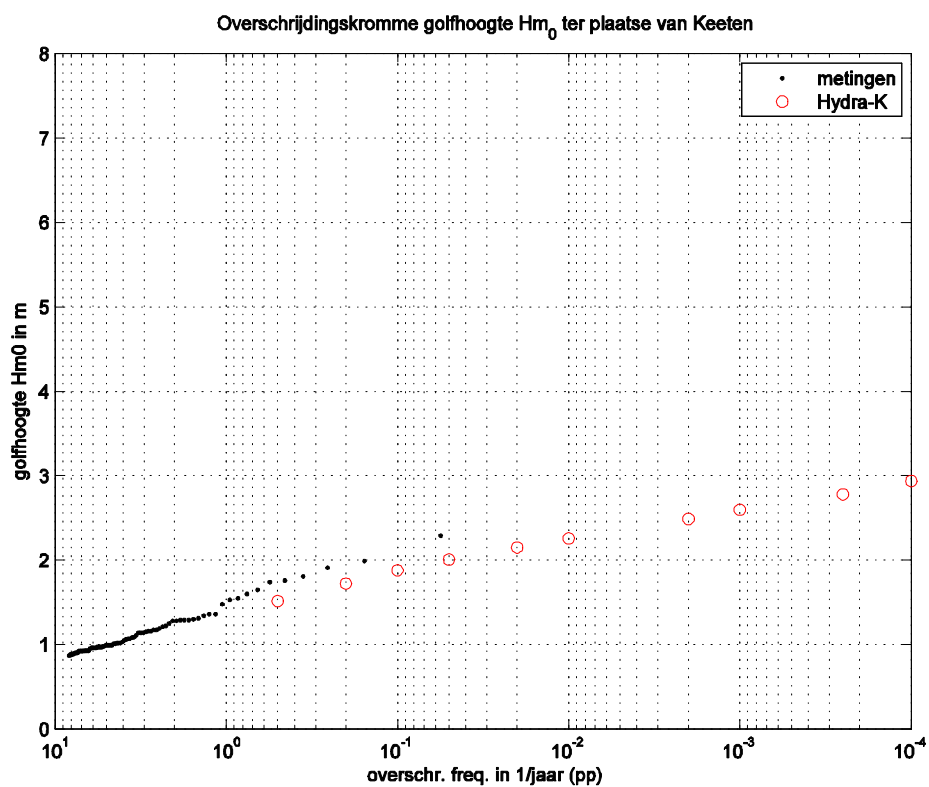


Figuur 2.27 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Hoofdplaat HFP1.

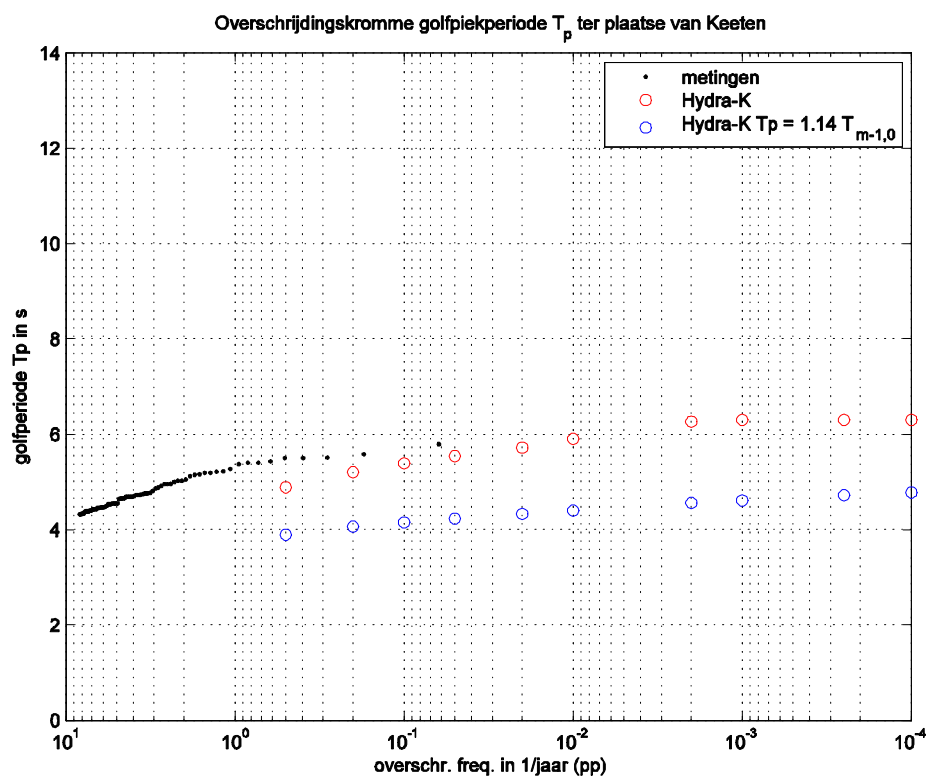
2.5 Golfparameters meetlocaties Keeten

Voor de meetlocatie Keeten kan het volgende worden geconcludeerd:

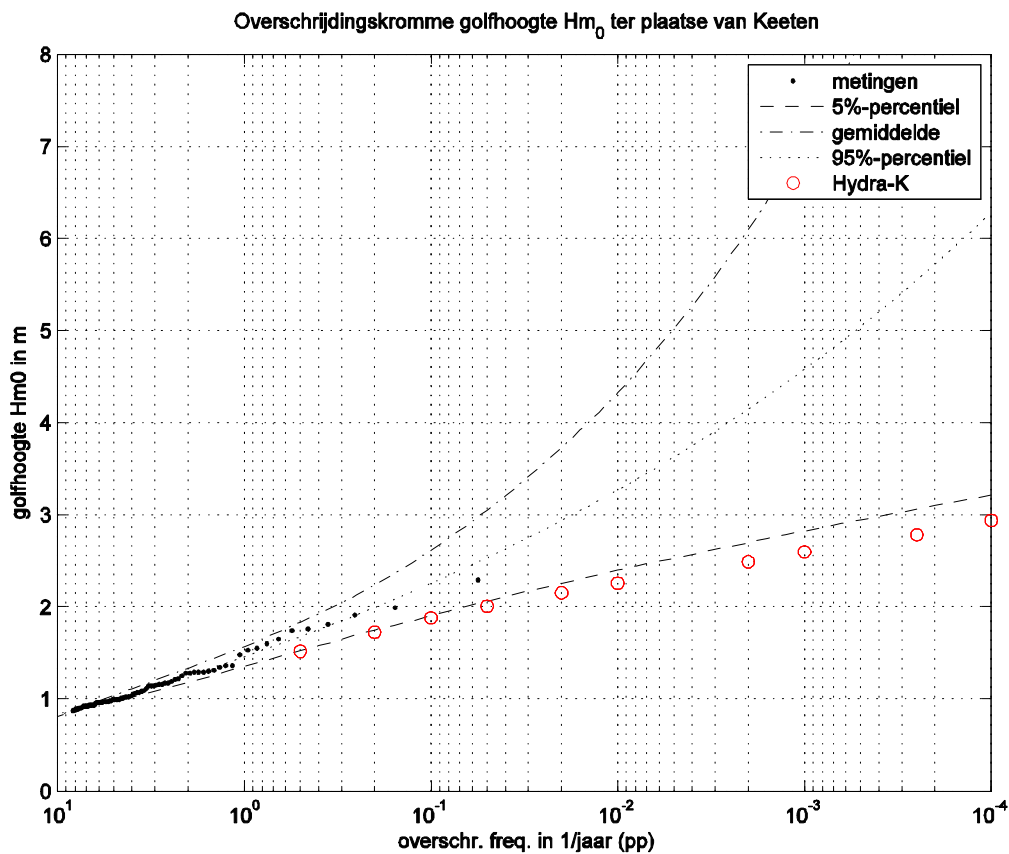
- op basis van de overschrijdingskrommen van de golfhoogte en piekperiode met én zonder onzekerheidsband kan worden geconcludeerd dat de met Hydra-K berekende golfparameters lager zijn dan de metingen. De onzekerheidsbanden plaatsen de verschillen echter wel in een beter perspectief. In het frequentiebereik waar metingen en Hydra-K elkaar overlappen (herhalingstijd tussen de 2 en 20 jaar) is het verschil tussen de golfhoogte bij tussen de metingen en Hydra-K kleiner dan 0,2 m, dus orde 10 %. Het verschil in golfperiode is ongeveer 0,2 sec, orde 5%. Voor beide golfparameters liggen de overschrijdingskrommen van Hydra-K tegen de curve met de 5%-percentielwaarden van de metingen aan.
- de overschrijdingskrommen van de via periodemaat $T_{m-1,0}$ afgeleide piekperiode T_p blijft verder achter bij de metingen. Kennelijk resulteert de toegepaste transformatiefactor in te lage golfperioden voor Keeten. Het is wellicht niet helemaal juist om aan te nemen dat het golfspectrum van de meetlocatie in de richting van de kust niet zoveel verandert.
- Figuur 2.32 toont dat de lichte onderschatting van de golfperioden met Hydra-K niet komt doordat de geselecteerde stormmaxima geen stormcondities betreft. Het merendeel van de geselecteerde perioden vinden gelijktijdig plaats met een grote golfhoogte.



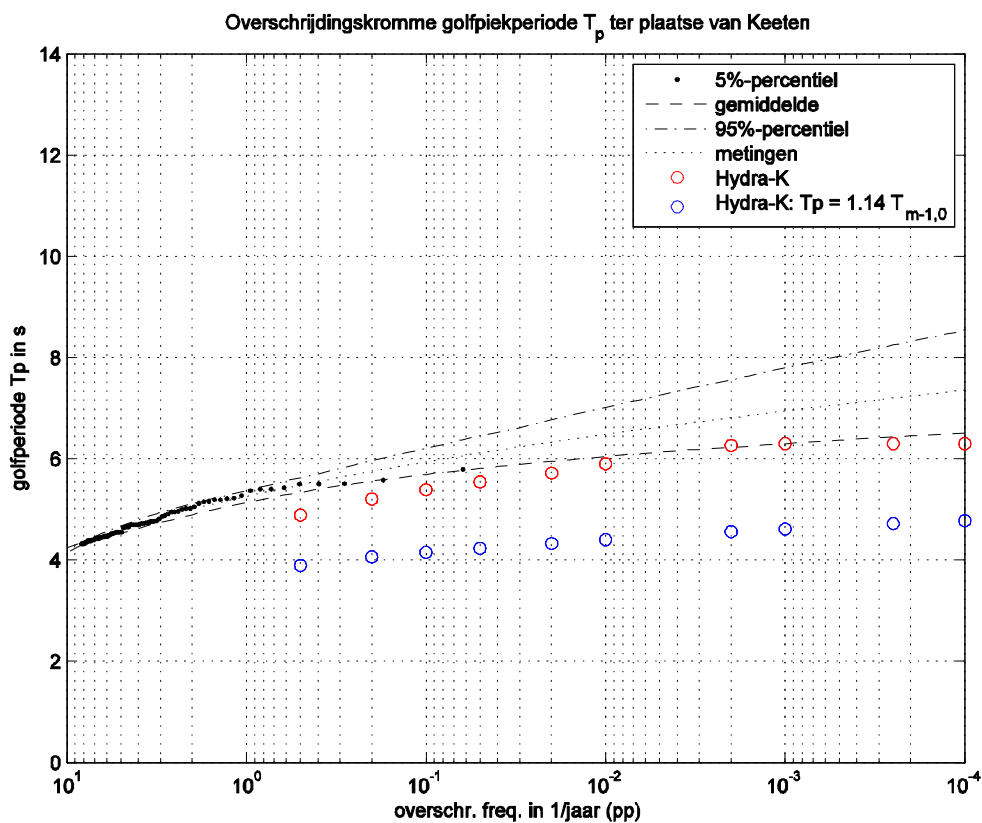
Figuur 2.28 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Keeten.



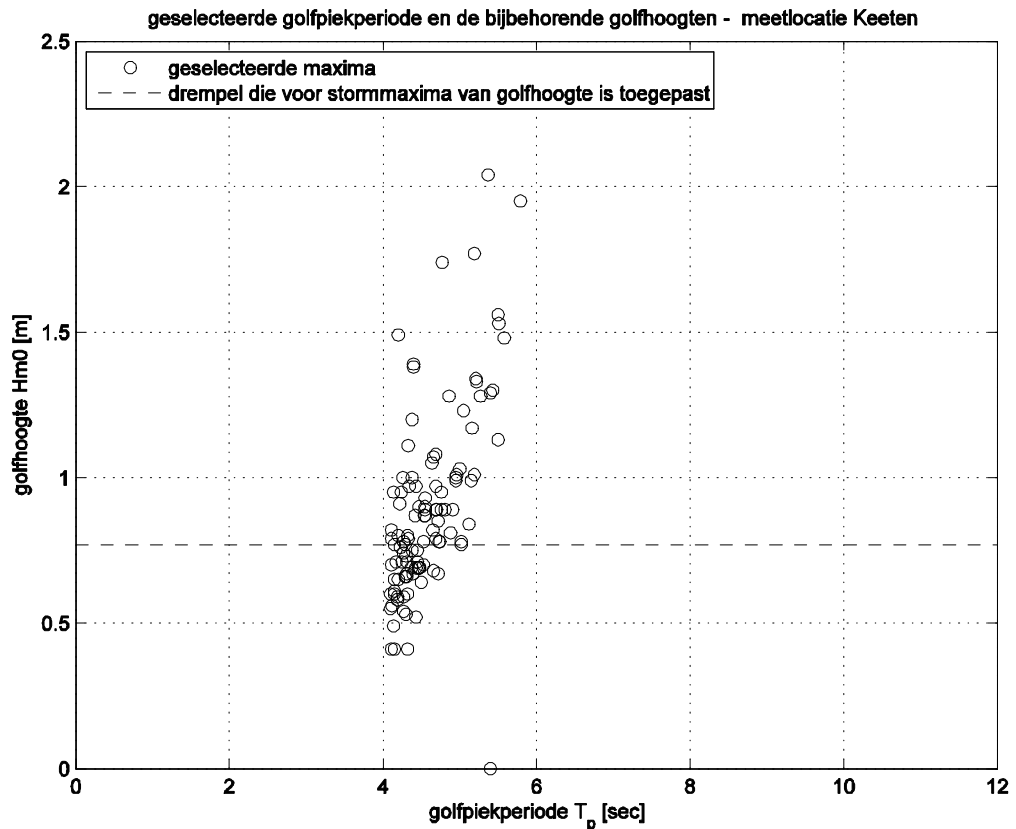
Figuur 2.29 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Keeten.



Figuur 2.30 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Keeten.



Figuur 2.31 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Keeten.

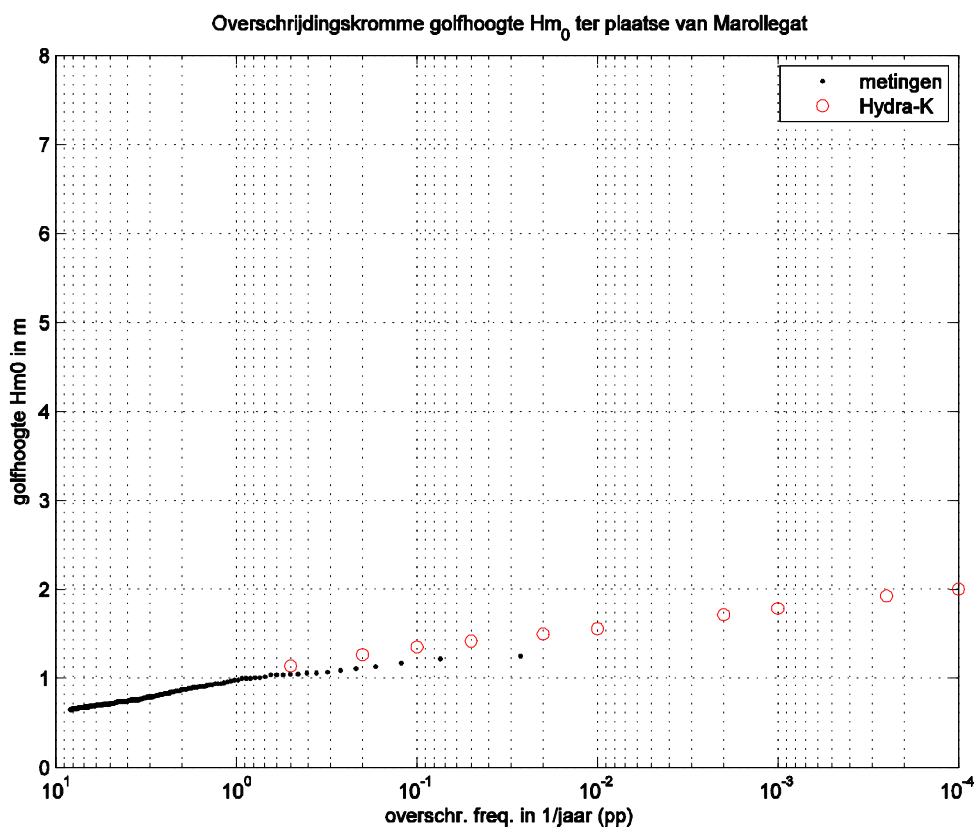


Figuur 2.32 Golfhoogten behorend bij de geselecteerde maxima voor de golfpiekperioden voor meetlocatie Keeten.

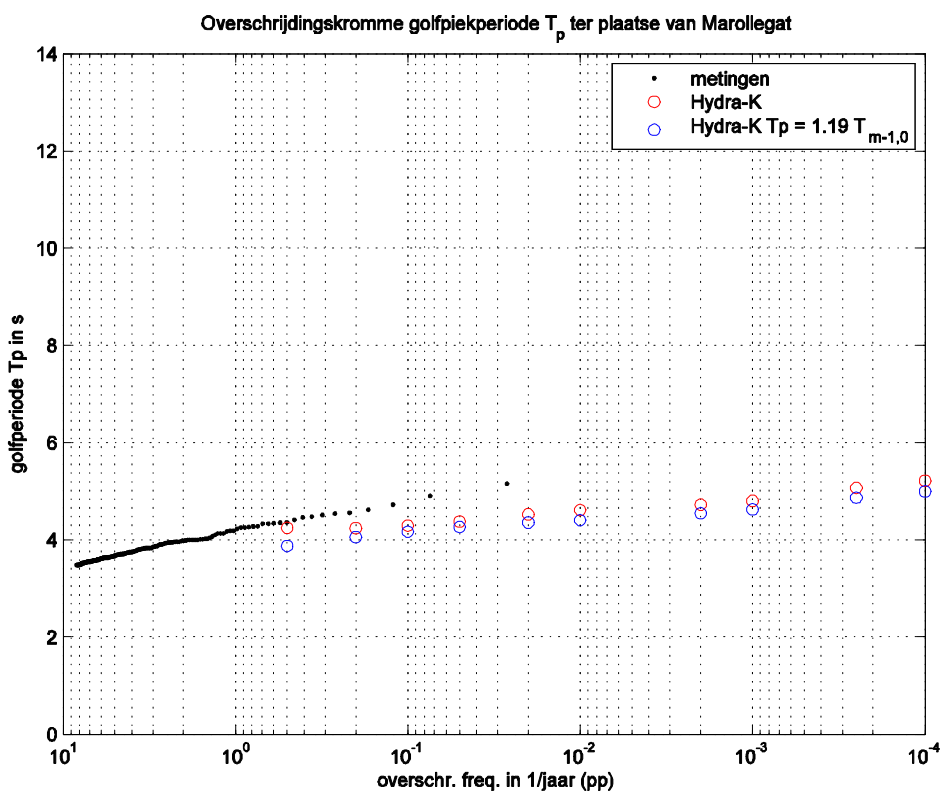
2.6 Golfparameters meetlocaties Marollegat

Voor de meetlocatie Marollegat kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

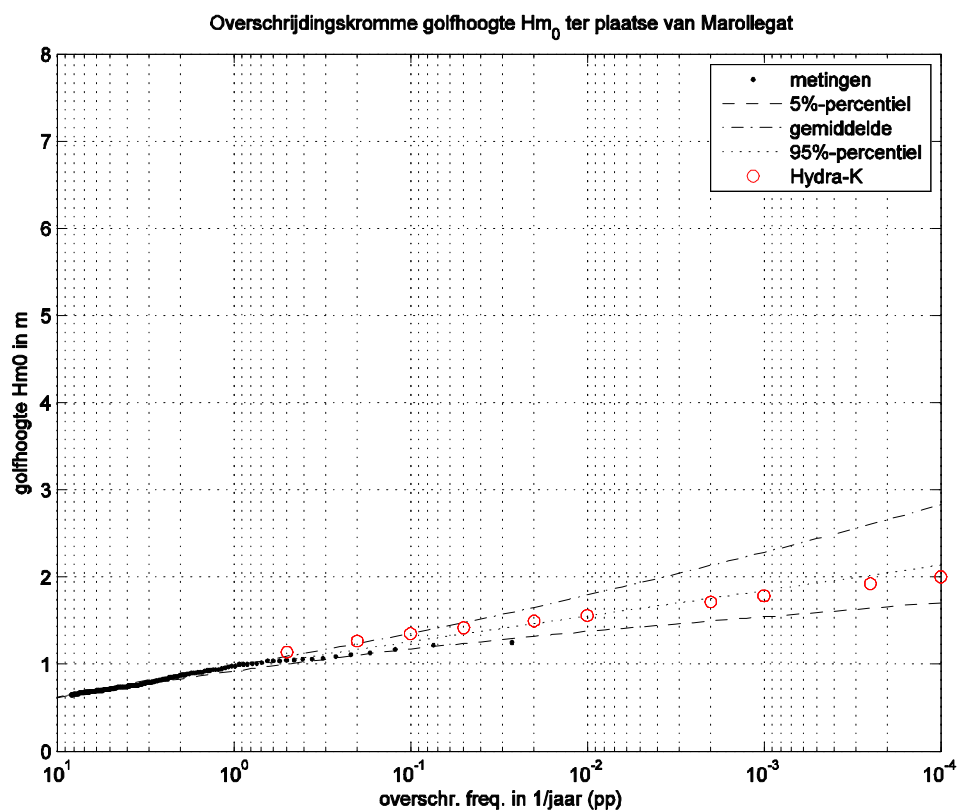
- de overschrijdingskrommen van de golfhoogte laten zien dat de verschillen tussen metingen en Hydra-K zeer beperkt zijn. De overschrijdingskromme afgeleid met Hydra-K valt goed binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval en komt redelijk overeen met de gemiddelde kromme.
- de overschrijdingskrommen van de golfpiekperiode met Hydra-K vertonen beide een stabiel verloop, maar liggen beide onder de curve van het 5%-percentiel van de metingen. Hydra-K onderschat dus de piekperiode ter plaatse van Marollegat. De piekperiode bij de normfrequentie volgend uit Hydra-K wijkt ongeveer 1 sec af van de verwachtingswaarde volgend uit de metingen. Dit is in de orde van 20 %. Figuur 2.37 laat zien dat de geselecteerde golfpiekperioden gelijktijdig optreden met grote golfhoogten en dat het dus stormcondities betreft.



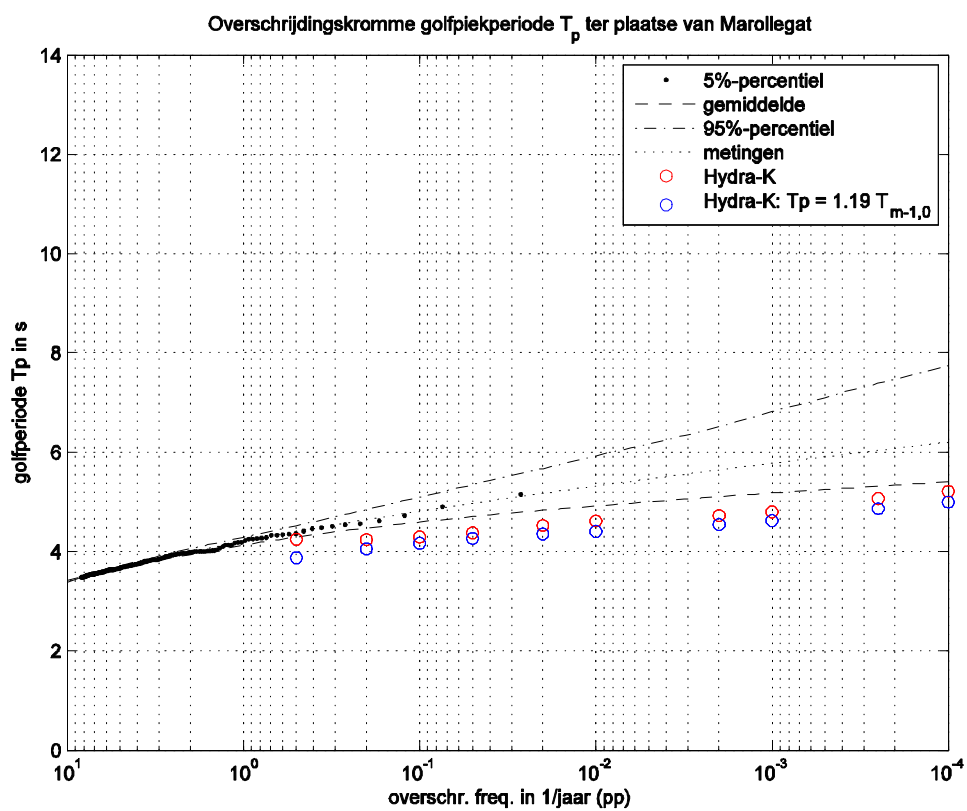
Figuur 2.33 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Marollegat.



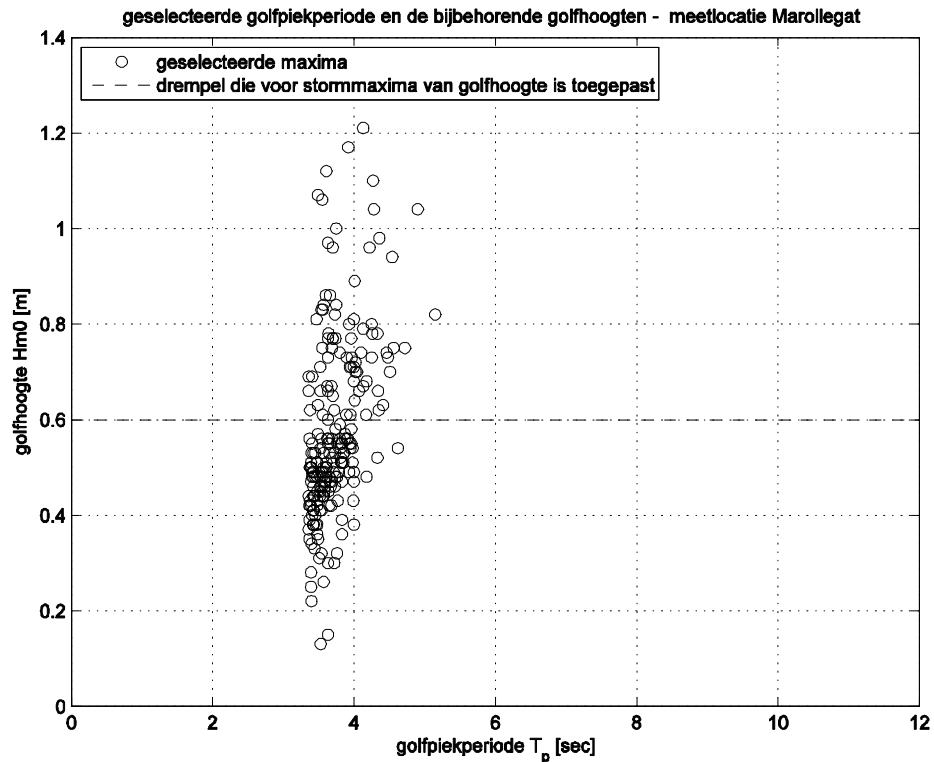
Figuur 2.34 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Marollegat.



Figuur 2.35 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Marollegat.



Figuur 2.36 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Marollegat.

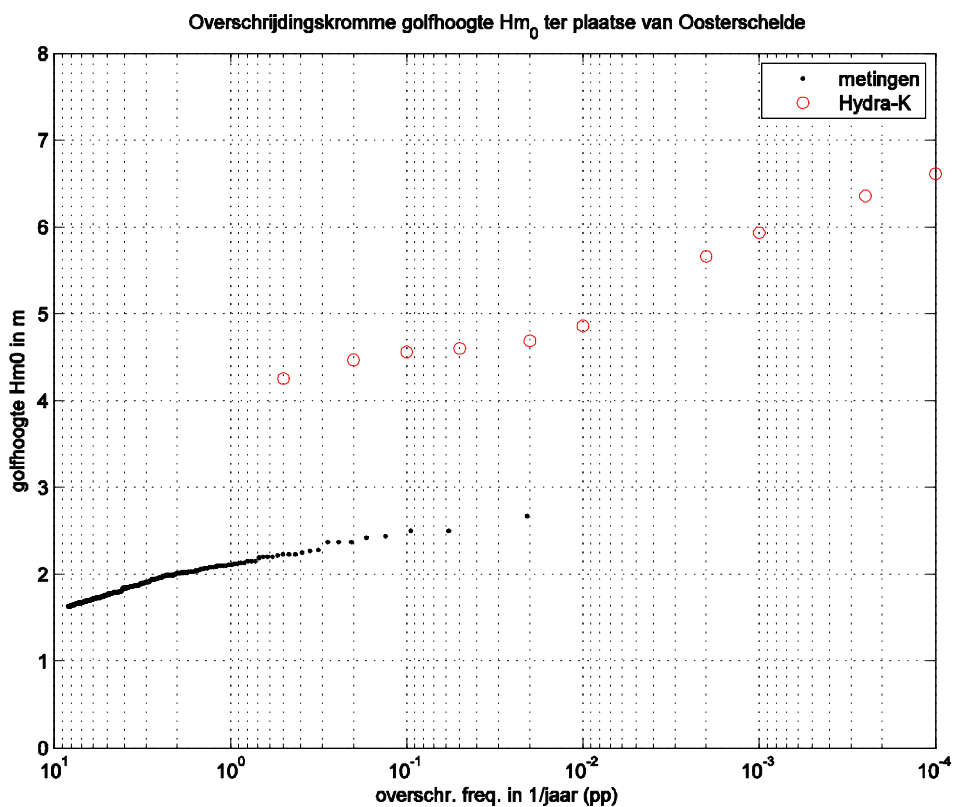


Figuur 2.37 Golfhoogten behorend bij de geselecteerde maxima voor de golfpiekperioden voor meetlocatie Marollegat.

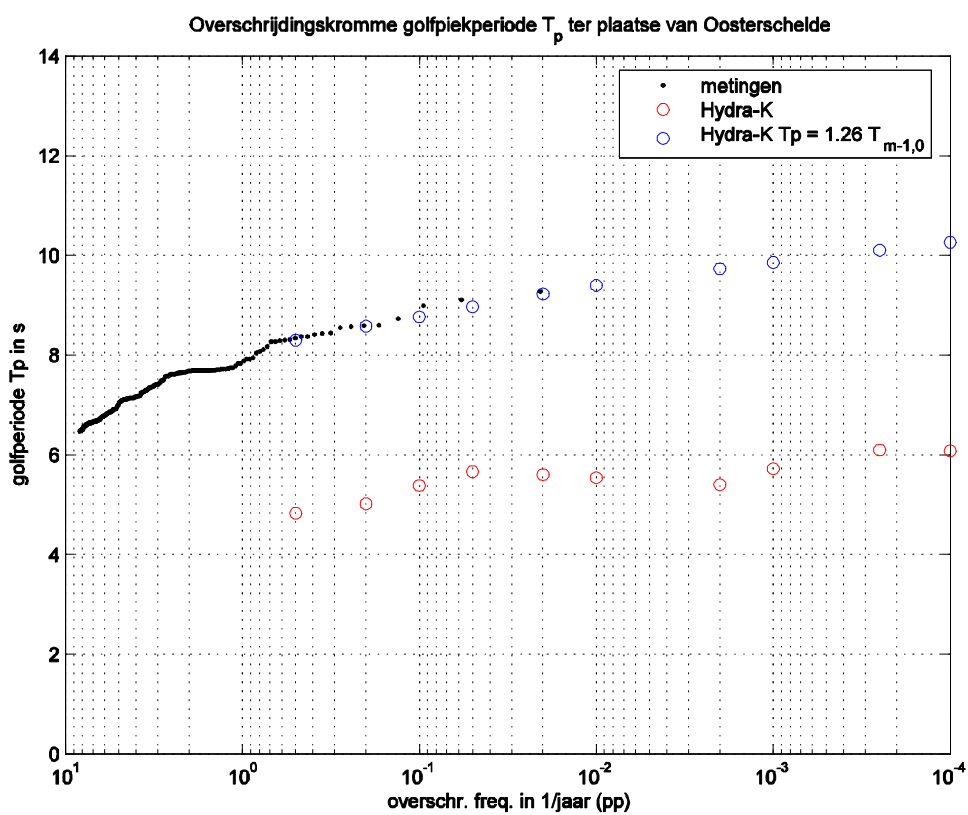
2.7 Golfparameters meetlocaties Oosterschelde

Voor de meetlocatie Oosterschelde kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

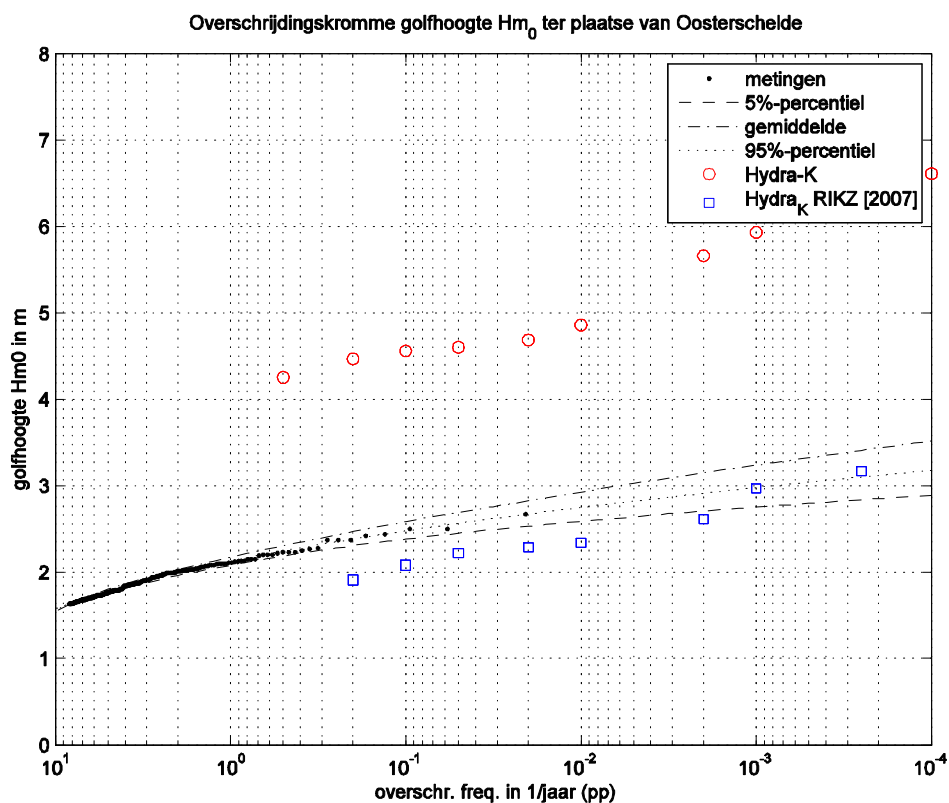
- de overschrijdingskrommen van de golfhoogte en de golfperiode met Hydra-K vertonen beide een slechte overeenkomst met de metingen. Oorzaak hiervoor kan onder andere gezocht worden in het feit dat voor de meetlocatie Oosterschelde een vrij ruwe SWAN database is gebruikt met een grove rooster en slechts 86 doorgerekende stormcondities in plaats van 216 voor de andere meetlocaties.
- in RIKZ [2007a] is de KustDataBase gebruikt met SWAN resultaten aan de teen van de dijk volgend uit een SWAN model met een grotere resolutie. De resulterende overschrijdingskrommen zijn opgenomen in de figuren. Deze laten een veel beter beeld zien. De overschrijdingskrommen van zowel de golfperiode als de golfhoogte van deze Hydra-K berekeningen vallen beide binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval. Daarmee wordt geconcludeerd dat Hydra-K goed presteert voor de meetlocatie Oosterschelde.



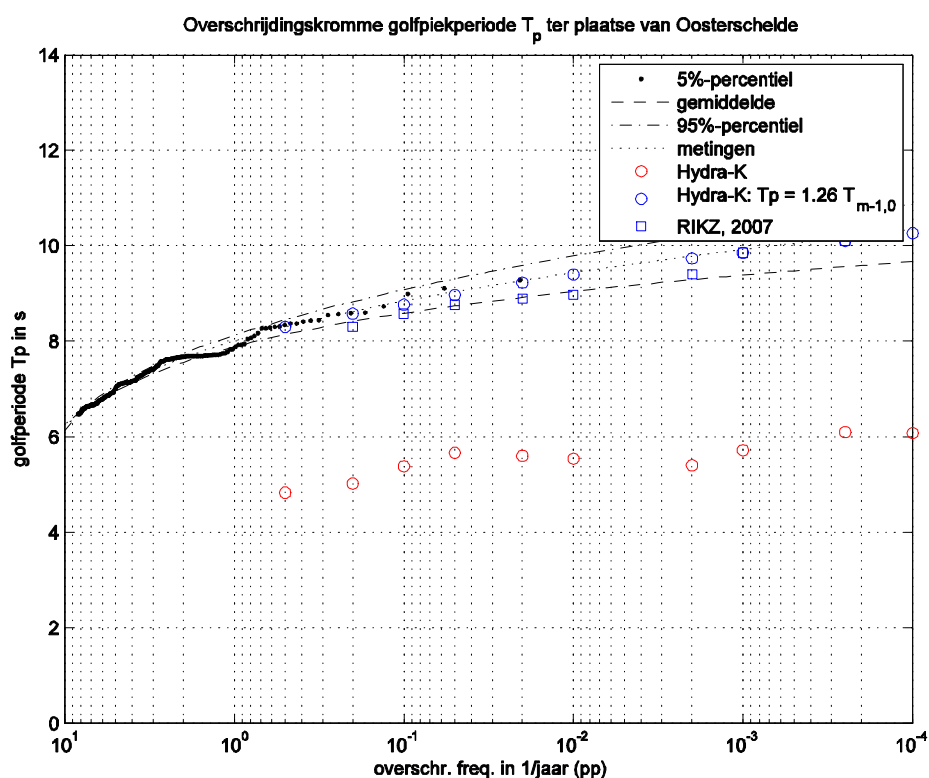
Figuur 2.38 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Oosterschelde OS4.



Figuur 2.39 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Oosterschelde OS4.



Figuur 2.40 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Oosterschelde OS4.

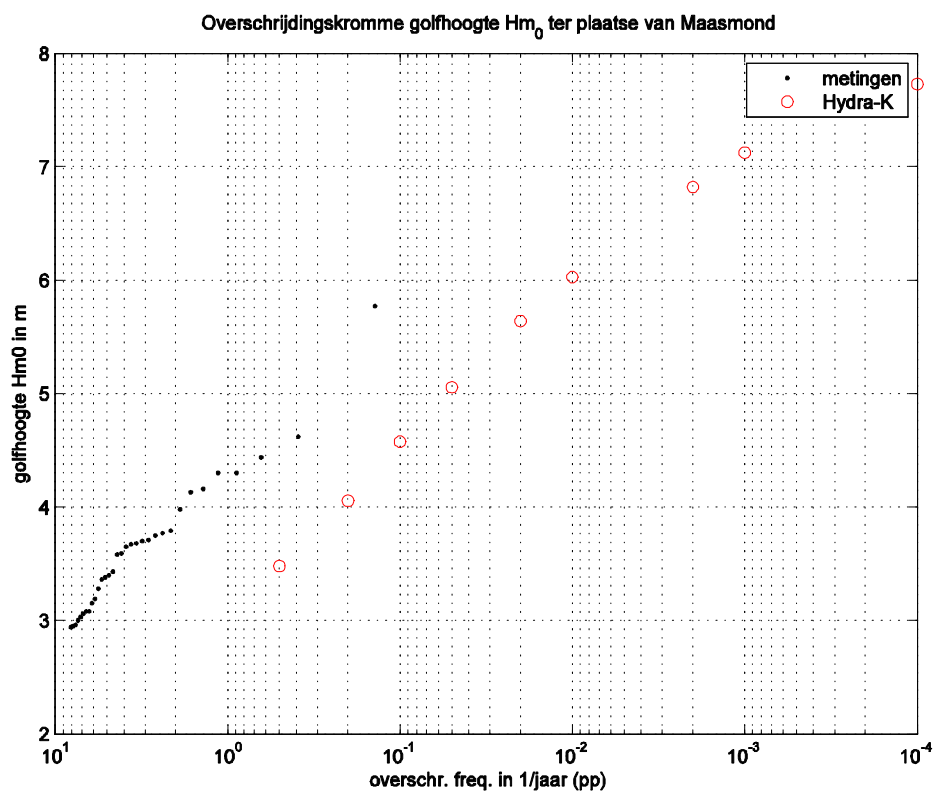


Figuur 2.41 De overschrijdingskromme van de golfpiekperiode voor meetlocatie Oosterschelde OS4.

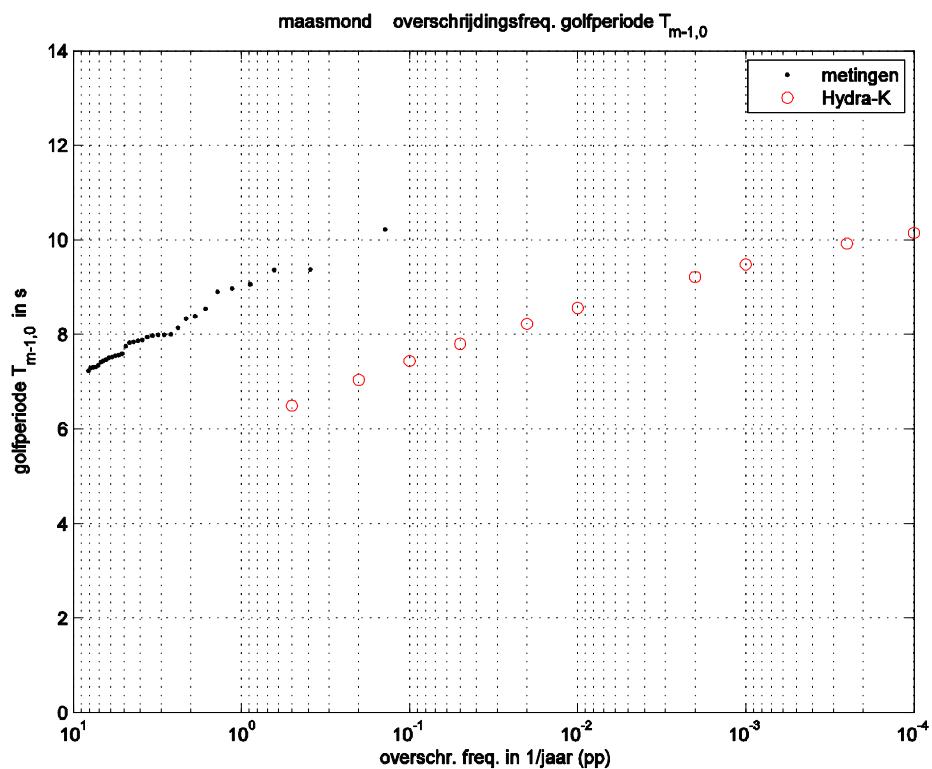
2.8 Golfparameters meetlocaties Maasmond

Voor de meetlocatie Maasmond kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

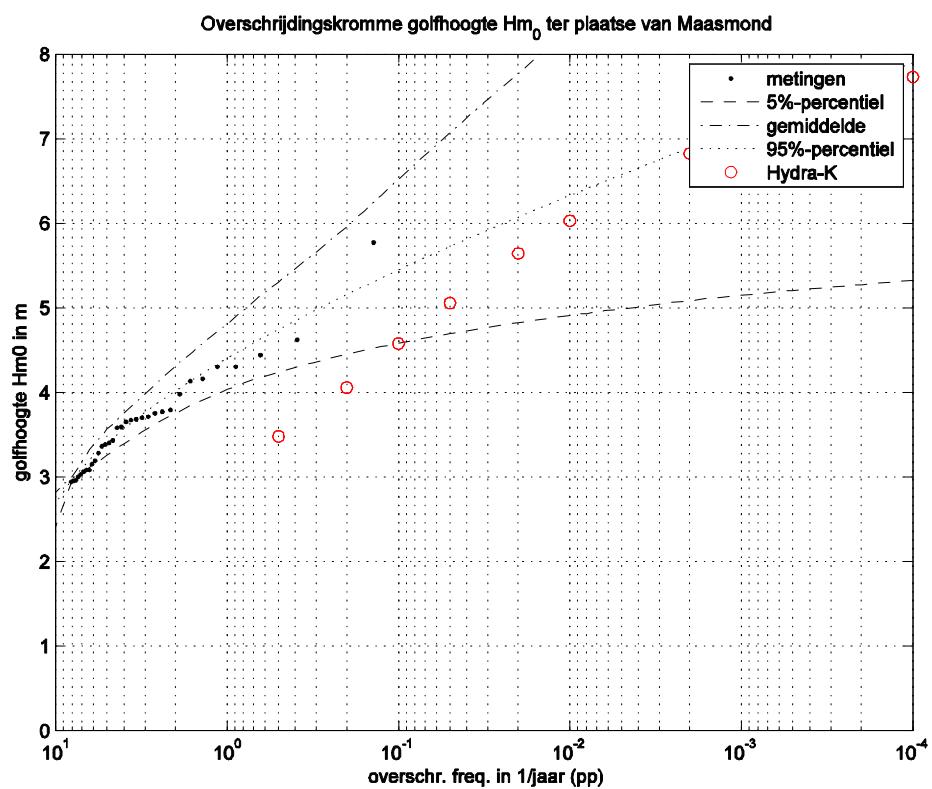
- in het frequentiebereik waar metingen en Hydra-K elkaar overlappen (herhalingsstijd tussen de 2 en 20 jaar) liggen de golfhoogten afgeleid uit metingen en met Hydra-K orde grootte 1 m uit elkaar. Dat is een grote afwijking. Doordat de met Hydra-K afgeleide overschrijdingscurve van de golfhoogte een steiler verloop heeft dan de curven afgeleid uit metingen, valt de golfhoogte bij de normfrequentie als nog binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval.
- de overschrijdingskromme van de golfperiode $T_{m-1,0}$ afgeleid met Hydra-K ligt een stuk lager dan de kromme afgeleid uit metingen. Voor het gehele frequentiebereik ligt de overschrijdingskromme onder het 5%-percentiel van de metingen. Kortom, Hydra-K presteert niet goed met betrekking tot de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$.



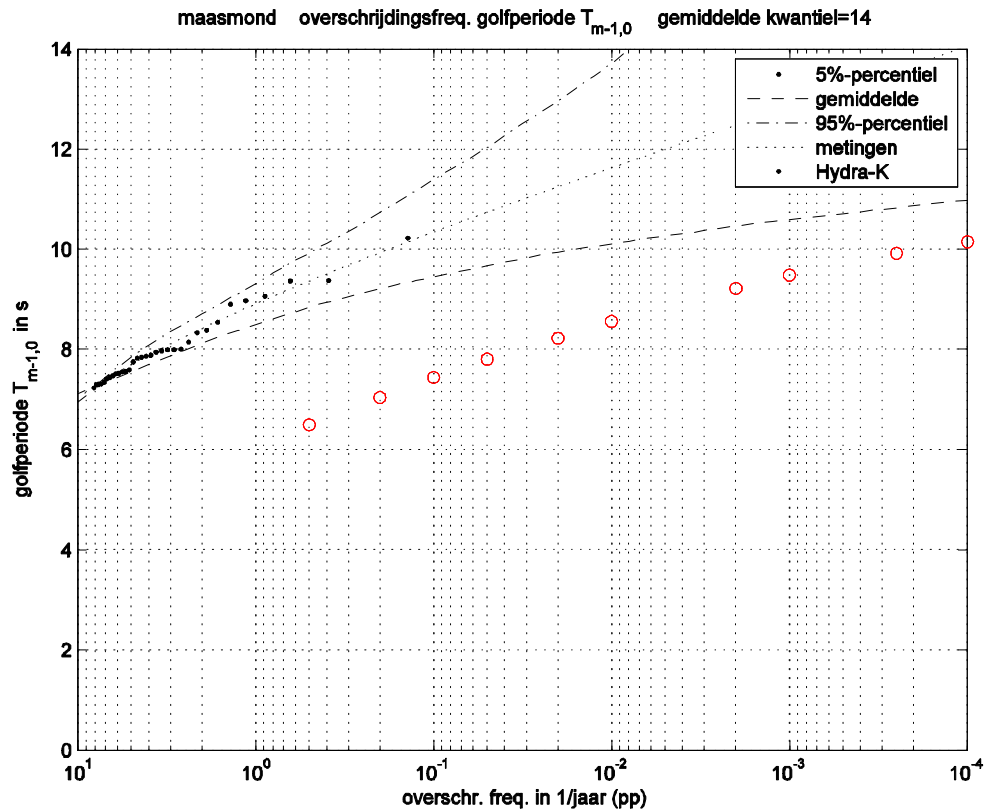
Figuur 2.42 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Maasmond.



Figuur 2.43 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Maasmond.



Figuur 2.44 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie Maasmond.

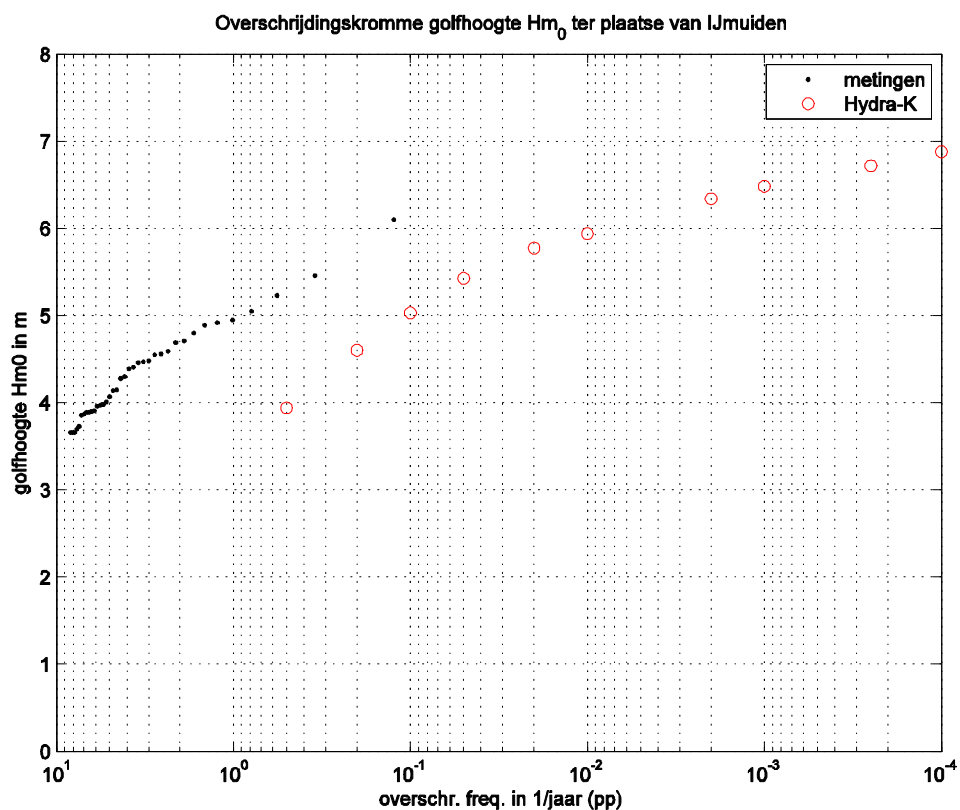


Figuur 2.45 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie Maasmond.

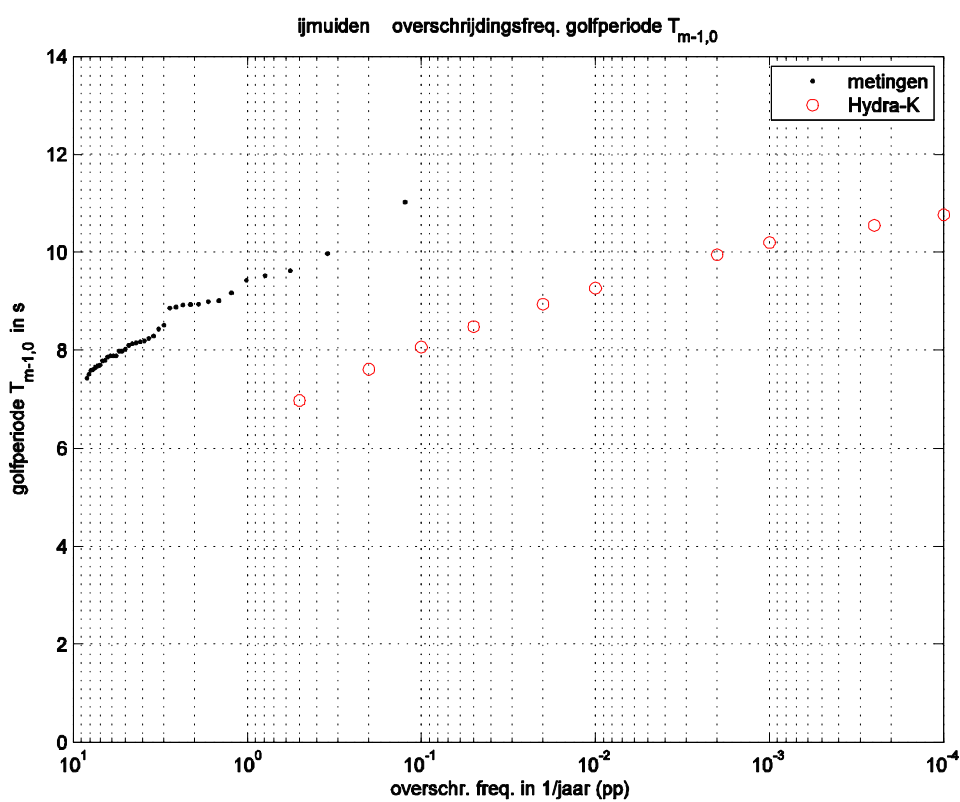
2.9 Golfparameters meetlocaties IJmuiden

Voor de meetlocatie IJmuiden gelden dezelfde conclusies als voor meetlocatie Maasmond:

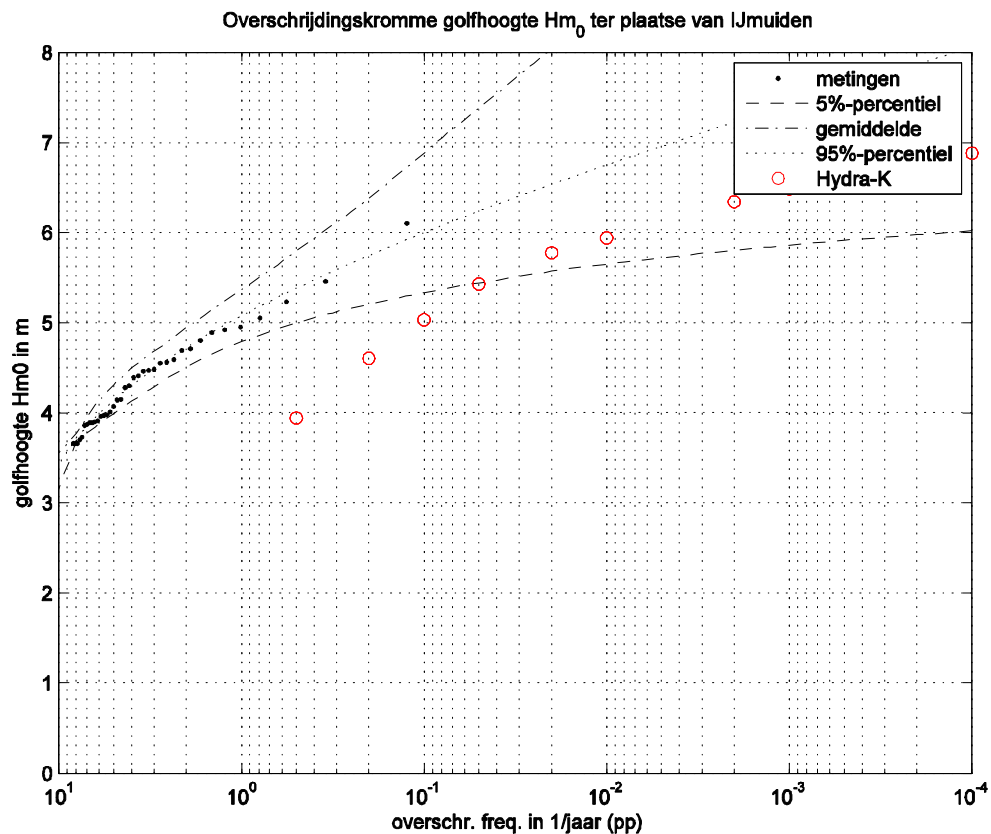
- in het frequentiebereik waar metingen en Hydra-K elkaar overlappen (herhalingstijd tussen de 2 en 20 jaar) liggen de golfhogten afgeleid uit metingen en met Hydra-K orde grootte 1,5 m uit elkaar. Doordat de met Hydra-K afgeleide overschrijdingscurve van de golfhogte een steiler verloop heeft dan de curven afgeleid uit metingen, valt de golfhogte behorend bij de normfrequentie als nog binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval.
- de overschrijdingskromme van de golfperiode $T_{m-1,0}$ afgeleid met Hydra-K ligt een stuk lager dan de kromme afgeleid uit metingen. Voor het gehele frequentiebereik ligt de overschrijdingskromme onder het 5%-percentiel van de metingen. Kortom, Hydra-K presteert niet goed met betrekking tot de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$.



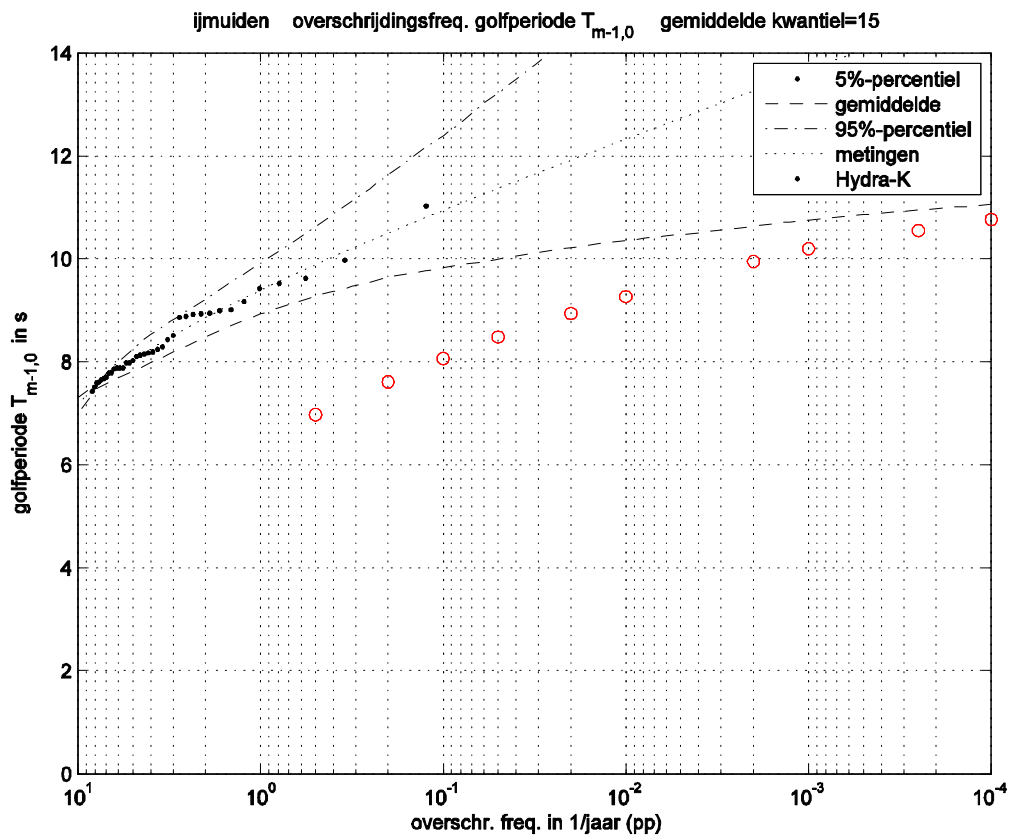
Figuur 2.46 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie IJmuiden.



Figuur 2.47 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie IJmuiden.



Figuur 2.48 De overschrijdingskromme van de golfhoogte voor meetlocatie IJmuiden.



Figuur 2.49 De overschrijdingskromme van de golfperiode voor meetlocatie IJmuiden.

2.10 Samenvatting resultaten

Figuur 2.50 tot en met Figuur 2.53 geven inzicht in de prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van golfparameters in het net nog overlappende frequentiebereik en voor de normfrequentie, voor alle meetlocaties. In de figuren zijn golfhoogte en golfperioden afgeleid met Hydra-K én de gemiddelde waarde, het 95%-percentiel en het 5%-percentiel van de uit metingen bepaalde betrouwbaarheidsbanden van de overschrijdingskrommen weergegeven. De percentielwaarden vormen samen het 90%-betrouwbaarheidsinterval. De figuren laten zien in welke mate de Hydra-K berekeningen afwijken van de metingen in het gemeten bereik en voor de normfrequentie.

Indien de met Hydra-K berekende golfparameters bij de normfrequentie binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de metingen vallen, is de prestatie van Hydra-K met 'goed' beoordeeld. Indien deze er buiten vallen is de prestatie met 'slecht' beoordeeld. In een aantal gevallen ligt de waarde van de golfparameter bij de normfrequentie tegen het 5%- of het 95%-percentiel aan. De prestatie is dan met matig bestempeld.

Presentatie met betrekking tot de golfhoogte

In het algemeen wordt geconcludeerd dat Hydra-K redelijk goed presteert met betrekking tot het berekenen van spectrale golfhoogte bij de normfrequentie. Voor twee locaties vallen de met Hydra-K berekende golfhoogten buiten het 90%-betrouwbaarheidsinterval. Dit betreft locatie 3 Hansweert HAWI en locatie 9 Oosterschelde. Voor de eerste locatie is dat te verklaren doordat de meetdatabase meetfouten bevatte. De slechte prestatie van de tweede locatie is vermoedelijk het gevolg van het gebruik van een vrij ruwe database waarin slechts 86 stormcondities zijn doorgerekend.

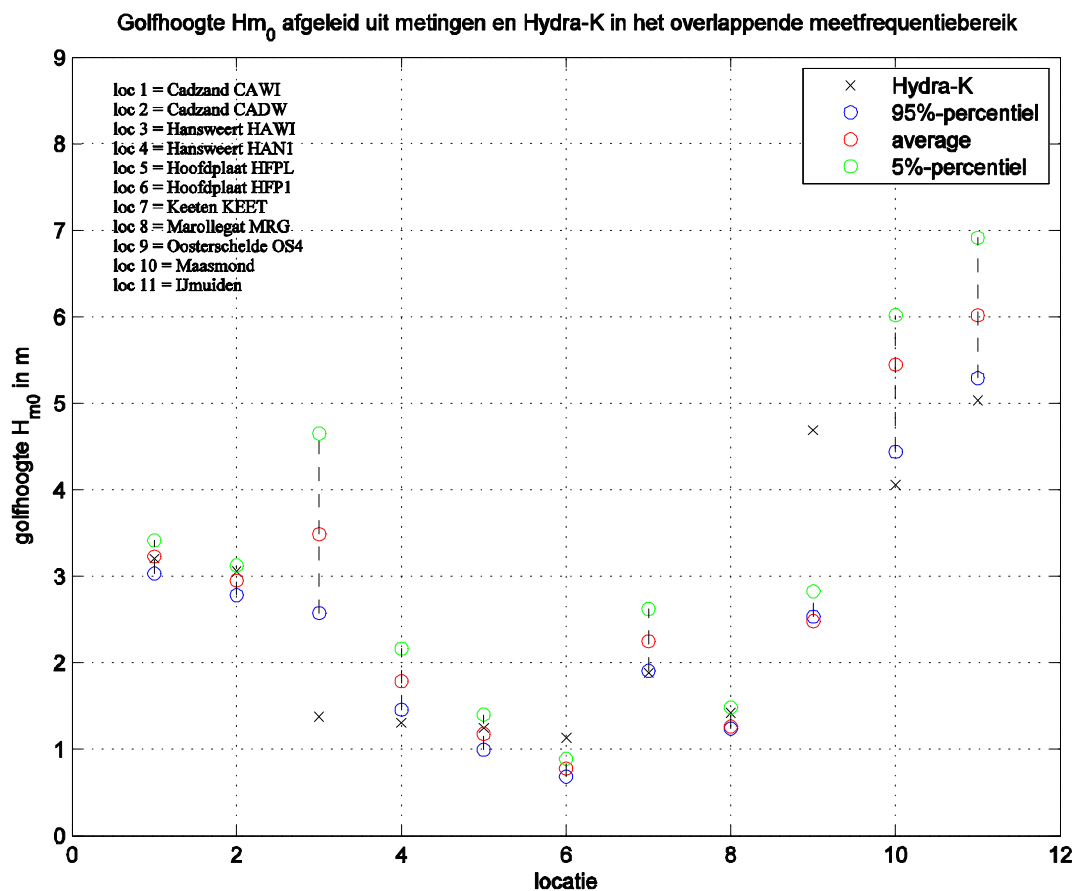
Bij de verdere beoordeling van de resultaten is het belangrijk onderscheid te maken in de diepte ter plaatse van de meetlocatie. De meetlocaties langs de Hollandse kust liggen op relatief diep water (> 15 m), en een aantal meetlocatie in de Westerschelde en de Oosterschelde ligt op relatief ondiepwater (< 10 m), zie Tabel 2.6.

De meetlocaties op ondiepwater ondervinden relatief veel invloed van de omgeving. Zo is het voorland van de meetlocaties bij Cadzand vrij ondiep. Onder zeer extreme omstandigheden met hoge waterstanden kan deining daar beter doordringen dan tijdens de stormomstandigheden waaronder de metingen zijn uitgevoerd. Op ondiepe locaties als Cadzand zullen de golfcondities bij storm- en extreme omstandigheden daardoor verder uit elkaar liggen dan bij dieper gelegen meetlocaties. Voor dieper gelegen locaties, zoals de locaties Maasmond en IJmuiden (beide op ongeveer 15 tot 20 m diepte) is de vergelijking uniformer te maken, met andere woorden het verschil in fysische processen tijdens storm- en extreme omstandigheden is daar klein. Daarom heeft een onderschatting bij deze locaties veel meer impact op betrouwbaarheid van Hydra-K dan voor de locaties op ondiepwater.

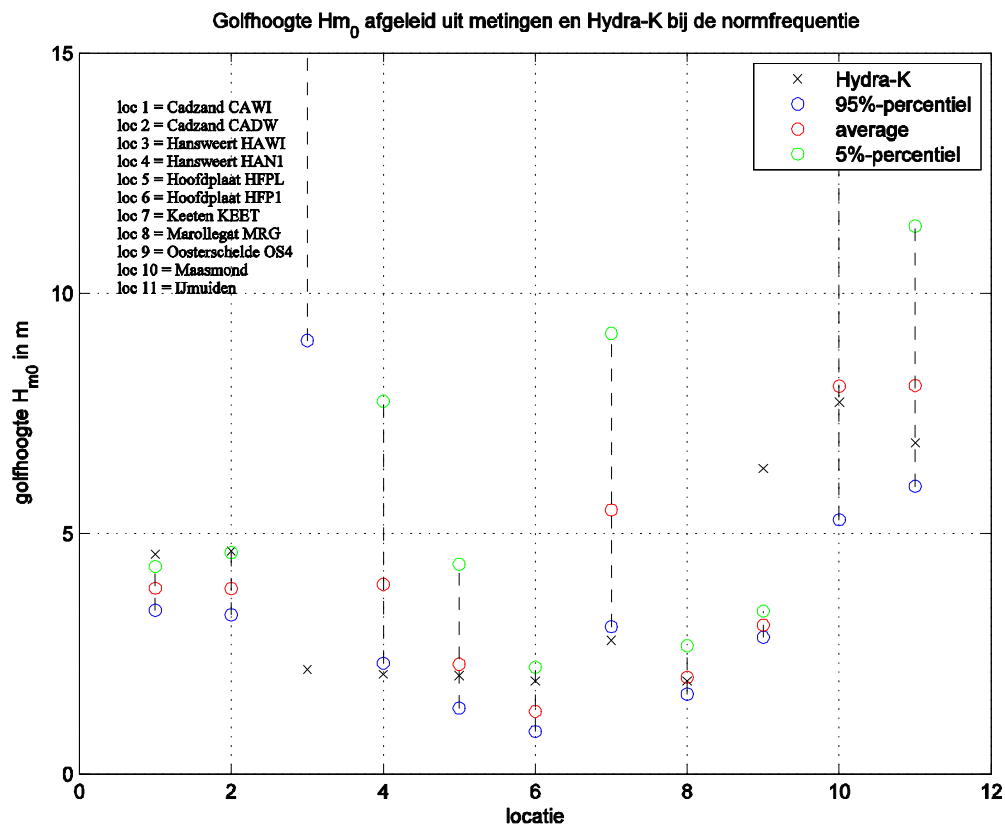
Bij extreme omstandigheden zal het effect van doordringende deining bij de ondiepwater locaties, de golfcondities sterker beïnvloeden. Aangezien dit proces niet in de stormmetingen zit, is een overschatting van de golfhoogte met Hydra-K voor de ondiepwater locaties dus minder erg dan een afwijking voor de locaties langs de Hollandse kust.

Kortom bij de interpretatie van de resultaten moet de ruimtelijk variabiliteit van bodemligging dus eigenlijk meegenomen worden.

In Figuur 2.50 (zie ook Figuur 2.48 en Figuur 2.44) zien we dat in het overlappende frequentiebereik de afwijking tussen de golfhogten afgeleid met Hydra-K en met metingen in de orde van 0,3 tot 1 m is. Bij de normfrequentie vallen de Hydra-K resultaten binnen het betrouwbaarheidsinterval, zie Figuur 2.51. Dit komt doordat de met Hydra-K afgeleide overschrijdingskromme een steiler verloop heeft dan de kromme afgeleid uit metingen. Dat betekent dat de krommen in het extreme bereik naar elkaar toegroeien. De resultaten langs de Hollandse kust bestempelen we daarom als matig.



Figuur 2.50 Prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van de golfhogte voor het net nog overlappende frequentiebereik voor alle meetlocaties



Figuur 2.51 Prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van de golfhoogte voor de normfrequentie voor alle meetlocaties

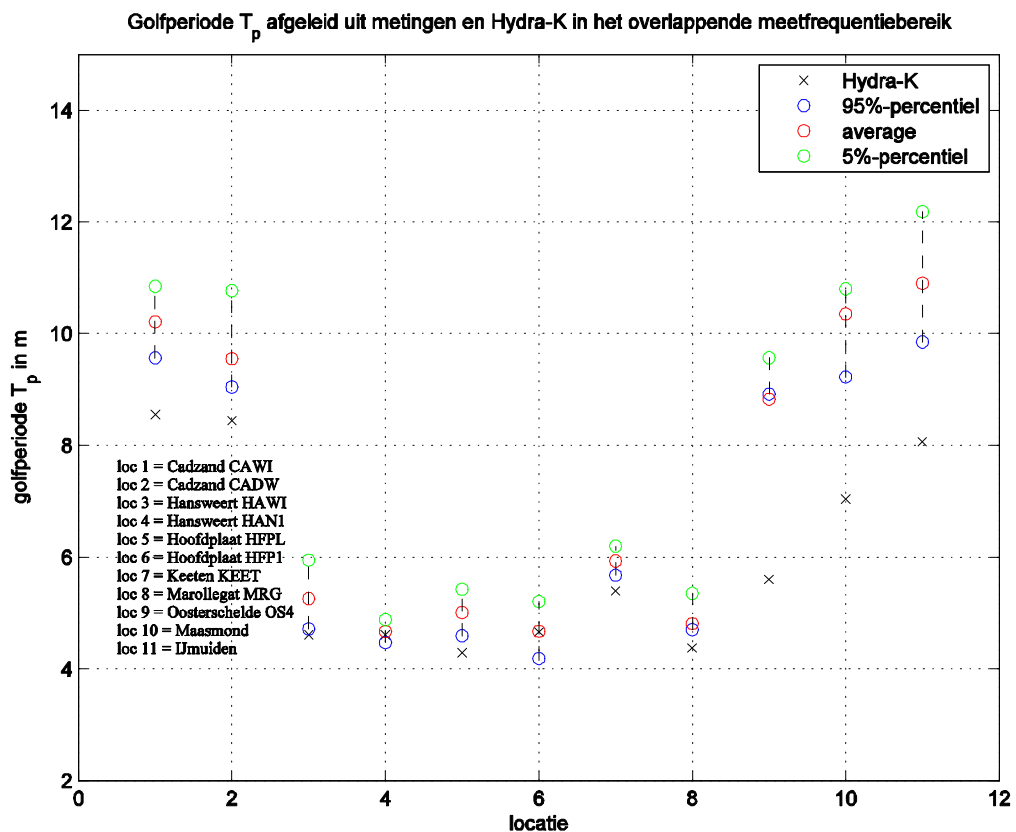
Tabel 2.6 Diepte meetlocatie geschat op basis van bodemliggingen van het WAQUA model van de kuststrook [Les, 2007]

Locatie	Omschrijving	Diepte meetlocatie [m +NAP]
CAWI	Cadzand	6 m
CADW	Cadzand	8 m
HAWI	Hansweert	9 m
HAN1	Hansweert	4 m
HFPL	Hoofdplaat	15 m
HFP1	Hoodfplaat	4 m
KEET	Keeten	16 m
MRG	Marollegat	10 m
OS4	Oosterschelde	8 m
-	IJmuiden	16 m
-	Maasmond	18 m

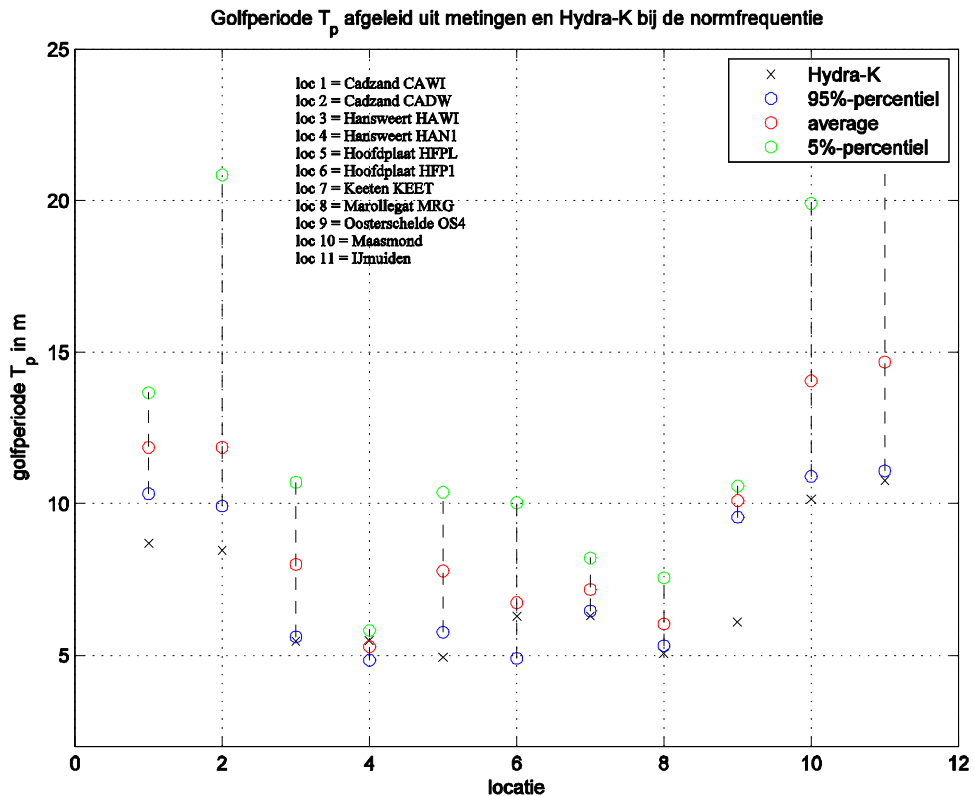
Presentatie met betrekking tot de golfperiode

Hydra-K presteert matig tot slecht met betrekking tot het berekenen van golfperiode bij de normfrequentie. De golfperiode is structureel aan de lage kant. Ondanks de correctie van de golfperiode van de SWAN uitvoer van de Westerschelde & Oosterschelde naar boven (SWAN geeft onderschatting van orde 9 %) en dankzij de Hollandse Kust naar onder (SWAN geeft overschatting van orde 9 %) geeft Hydra-K een onderschatting van golfperiode bij de normfrequentie. Onderzoek naar de structurele onderschatting van de golfperiode door Hydra-K wordt aanbevolen.

Voor de Westerschelde en Oosterschelde is de piekperiode gebruikt voor de vergelijking met Hydra-K. Deze vergelijking bleek niet optimaal voor de locaties in de monding en op zee, waarbij de piekperiode erg gevoelig is door het voorkomen van windzee en deining in het golfspectrum, zie Sectie 2.1.3. Door de transformatie van de piekperiode T_p uit de spectrale golfperiodemaat $T_{m-1,0}$ wordt voor bovengenoemde locaties een stabielere verloop van de piekperiode gevonden, namelijk de piekperiode neemt toe bij een grotere herhalingsstijd.



Figuur 2.52 Prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van de golfperiode voor het overlappende frequentiebereik voor alle meetlocaties (NB voor de locatie langs de Hollandse kust 10 en 11 is in de figuur de $T_{m-1,0}$ gegeven)



Figuur 2.53 Prestatie van Hydra-K met betrekking tot het berekenen van de golfperiode voor de normfrequentie voor alle meetlocaties (NB voor de locatie langs de Hollandse kust 10 en 11 is in de figuur de $T_{m-1,0}$ gegeven)

Algemene opmerkingen

Oorzaken van de verschillen tussen metingen en Hydra-K kunnen worden gezocht in de gehele keten en kunnen gerelateerd worden aan, zowel de statistiek als de onderliggende golfberekeningen in Hydra-K. Aangezien de golfberekeningen gemakkelijk te isoleren zijn, raden we aan in eerste instantie te kijken naar de prestatie van het golfmodel SWAN. Deze aanpak bracht in voorliggend onderzoek de onbetrouwbare metingen in de golfdata van Hansweert aan het licht. Er wordt aanbevolen ook de datasets van alle andere meetlocaties op fouten te controleren.

De analyse van dit hoofdstuk is beperkt tot een vergelijking van Hydra-K resultaten op de meetlocaties. Echter in principe zijn we geïnteresseerd in de prestatie van Hydra-K aan de teen van de dijk. Hansweert HAN1 is meetlocatie die het dichtste bij de teen van de dijk ligt. Voor deze locatie presteert Hydra-K goed. Het heeft geen zin om in de toekomst metingen nog dicht bij de dijk uit te voeren. Vanwege morfologische activiteit leidt een dergelijke meetsessie tot een niet homogene dataset, waarmee moeilijk statistische analyses kunnen worden uitgevoerd.

3 Performance Hydra-K voor golfoploop

3.1 Inleiding

In RIKZ [2007] is de performance van Hydra-K getest door de met Hydra-K berekende *golfoploop* bij locatie Petten te vergelijken met de statistiek op basis van metingen. In dit hoofdstuk stellen we naar aanleiding van RIKZ [2007] een *foutendiscussie* op. Dit betreft een opsomming van de (mogelijke) oorzaken van verschillen tussen de uitkomsten van Hydra-K en de metingen, waar nodig aangevuld met een nadere analyse. Dit hoofdstuk is als volgt opgedeeld:

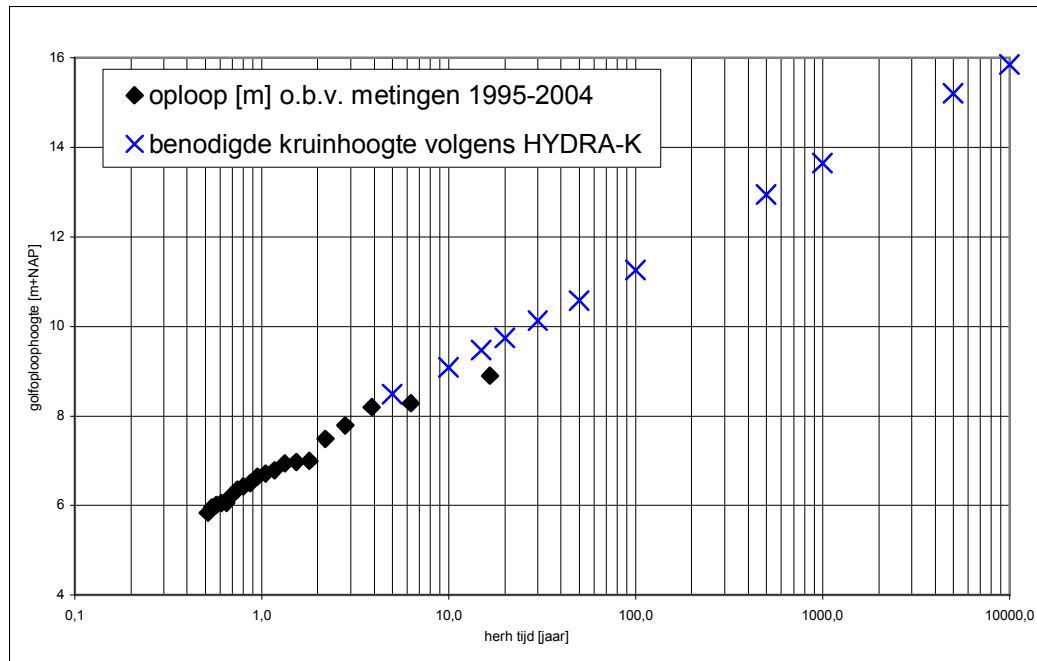
Sectie 3.2 geeft een samenvatting van de analyse en resultaten uit RIKZ [2007]. Sectie 3.3 beschrijft de componenten van de ‘modelketen’ op basis waarvan de hydraulische randvoorwaarden met Hydra-K worden bepaald en geeft indicaties over de onzekerheden van de diverse onderdelen. Sectie 3.4 kwantificeert de onzekerheid in de vertaalslag van de hydraulische belasting aan de teen van de dijk naar de geschatte golfoploophoogte. Sectie 3.5 beschrijft een gevoeligheidsanalyse naar de mogelijke invloed van de effecten van de onzekerheden uit Sectie 3.3 op de geschatte golfoploophoogte. Sectie 3.6, ten slotte, geeft extra aandacht aan de invloed van één keuzeoptie binnen Hydra-K op de geschatte golfoploop: het moment in de storm dat als representatief wordt beschouwd voor de belasting van de kering.

3.2 Samenvatting memo RIKZ [2007]

Sinds januari 1995 worden er golfmetingen nabij Petten uitgevoerd, waaronder de golfoploophoogte op de zeewering. Het instrument registreert zodra het water hoger komt dan de onderkant van de oploopbaak die op ca. NAP+5.7 m ligt. Op basis van de reeks oplooptmetingen is in RIKZ [2007] statistiek afgeleid die vervolgens is vergeleken met de statistiek die uit Hydra-K volgt. De volgende werkzaamheden zijn uitgevoerd:

- selectie van stormen op basis van een lijst met hoogwaters >1.8 m en stormdagen zoals genoemd in Svašek [2001];
- selectie van meetgegevens van de geselecteerde stormen;
- bepalen van de golfoploophoogte, z2%, voor perioden van 20 minuten (mits er 5 of meer gemeten oploopgebeurtenissen beschikbaar zijn in die 20 minuten);
- bepalen van de maximale waarde van z2% per stormgebeurtenis;
- toekennen van herhalingstijden van stormmaxima op basis van hun onderlinge rangorde;
- afleiden van de relatie van herhalingstijd en z2% met Hydra-K;
- vergelijken van de resultaten van stap 5 en 6.

Figuur 3.1 toont de resulterende statistieken op basis van metingen en op basis van berekeningen met Hydra-K. Daaruit blijkt dat beide goed in overeenstemming zijn.



Figuur 3.1 Vergelijking van golfoverloophoogte bij Petten op basis van golfoverloophoogtemetingen en Hydra-K (uit: RIKZ [2007]).

3.3 Onzekerheden in het bepalen van de hydraulische belasting

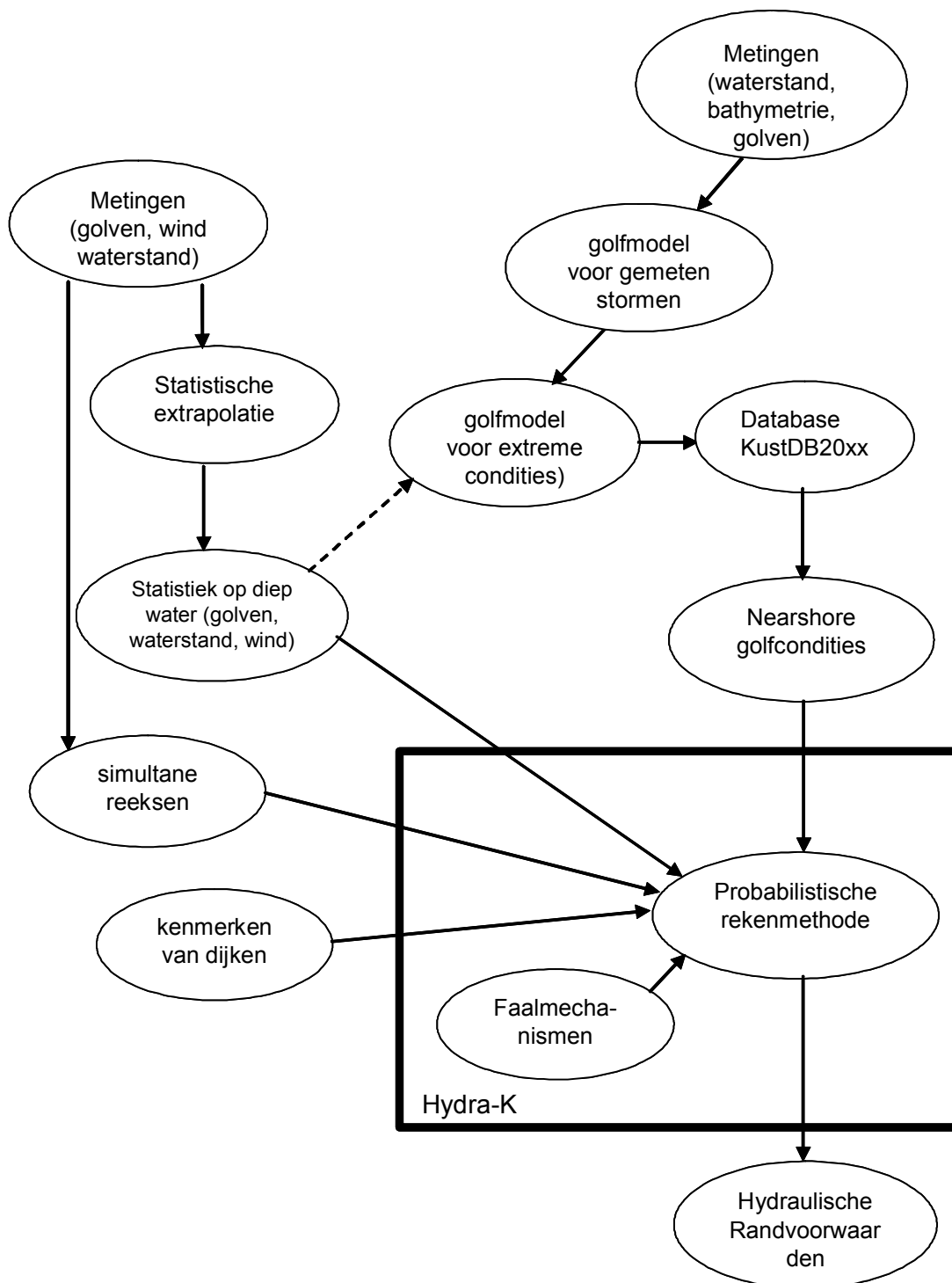
3.3.1 Beschrijving van de modelketen

De hydraulische randvoorwaarden worden vastgesteld op basis van een keten van modellen en analyses. RIKZ [2006] geeft hiervan een uitgebreide beschrijving. In deze sectie geven we een beknopte beschrijving, o.a. gebaseerd op RIKZ [2006] en WL [2006].

Figuur 3.2 geeft een schematische weergave van de modelketen. Centraal in deze keten staat het rekenmodel Hydra-K (open vierkant in Figuur 3.2). De voornaamste uitvoer van Hydra-K bestaat uit de Hydraulische randvoorwaarden voor de primaire waterkeringen langs de zoute wateren. Deze randvoorwaarden worden bepaald op basis van de probabilistische rekenmethode “De Haan”. Behalve het probabilistische rekenhart is Hydra-K opgebouwd uit de volgende onderdelen:

- statistiek van de waterstand en windsnelheid in enkele kuststations en de golfperiode in offshore meetstations;
- simultane waarnemingen van waterstand en windsnelheid in kuststations en golfperiode op relatief diep water;
- een relatie tussen de waterstand in de kuststations enerzijds en de waterstand op aan de teen van de dijk voor alle dijklocaties anderzijds (triangulaire interpolatie);
- een relatie tussen offshore wind-, waterstand- en golfcondities enerzijds en nearshore golfcondities anderzijds (SWAN-berekeningen);

- schematisaties van dijkprofielen;



Figuur 3.2 Modelketen ter bepaling van hydraulische randvoorwaarden.

3.3.2 Inzichten van experts over onzekerheden

In WL [2006] zijn enkele experts ondervraagd over onzekerheden in de diverse onderdelen van de modelketen van Hydra-K. Uit deze gespreken zijn de volgende schattingen naar voren gekomen:

- Op diep water is de geschatte onzekerheid in golfparameters ongeveer 5% (standaarddeviatie). Op ondiep water is dat naar verwachting zo'n 10-15%.
- De standaarddeviatie van de waterstand voor de kust van Hoek van Holland met een herhalingstijd van 100 jaar is naar schatting zo'n 70 cm. Voor Petten zal dat ongeveer 60 cm zijn.
- De standaarddeviatie in de gemeten bathymetry is ongeveer 10 tot 30%. Helaas vermeldt de bron niet ten opzichte van welke waarde die 10-30% geldt.
- De standaarddeviatie in extreme windsnelheden is ongeveer 10-25%.
- De golfhoogte langs de kust die met SWAN berekend wordt komt doorgaans goed overeen met de metingen. Er wordt gesproken over een betrouwbaarheidsinterval van plus of min 5% van de voorspelde waarde. Voor extreme, onbemeten, condities zijn deze onzekerheden mogelijk groter.
- Voor golfperiodes nearshore is de onzekerheid groter: 10-20%. Ook hiervoor geldt dat deze onzekerheid mogelijk nog groter is voor extreme, onbemeten, condities.

Merk op dat de gevolgen van onzekerheden in de bathymetrie gedeeltelijk gecompenseerd worden door calibratie van het SWAN model. Dit geldt echter vooral voor bemeten condities en het is niet in te schatten of dat ook geldt voor extreme condities. In deze analyse zijn we echter niet specifiek geïnteresseerd in extreme condities omdat Hydra-K hier vergeleken wordt met gemeten condities (Figuur 3.1) voor herhalingstijden tot 20 jaar.

Volgend op de laatste opmerking is het relevant om te weten dat Hydra-K berekeningen op het onderdeel van de ingevoerde statistiek van wind, waterstand en golven minder betrouwbaar zijn voor herhalingstijden tussen de 1 en 10 à 20 jaar (HKV [2006]) dan voor hogere herhalingstijden. Dit komt doordat de statistiek van deze variabelen beschreven wordt met conditionele Weibullverdelingen die in principe alleen geldig zijn boven bepaalde drempelwaarden. Bij berekeningen van Hydra-K met herhalingstijden onder de 20 jaar komt het voor dat deze verdelingen moeten worden toegepast onder de drempelwaarden, ofwel het bereik waarvoor de verdelingsfunctie eigenlijk niet geldig is. Voor hogere herhalingstijden speelt dit probleem niet, maar daar is de kennisonzekerheid weer groter vanwege een gebrek aan waarnemingen in het extreme bereik.

3.4 Onzekerheden in de mate van golfoploop

3.4.1 Technisch rapport golfoploop en golfoverslag

Hydra-K maakt gebruik van het rekenprogramma PC-Overslag om de mate van golfoploop tegen een dijk te bepalen. PC-Overslag is gebaseerd op de vergelijkingen uit het 'Technische rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken' (TAW, 2002).

De algemene formule voor golfoploop is daarin als volgt geformuleerd:

$$\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} = \begin{cases} 1.75\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta\xi_0 & ; \gamma_\beta\xi_0 \leq 1.8 \\ 1.75\gamma_b\gamma_f \left(4.3 - 1.6/\sqrt{\xi_0}\right) & ; \gamma_\beta\xi_0 > 1.8 \end{cases} \quad (3.1)$$

waarin:

$z_{2\%}$	= 2%-golfoploophoogte boven de stilwaterlijn	[m]
H_{m0}	= significante golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
γ_b	= invloedsfactor voor een berm	[-]
γ_f	= invloedsfactor voor ruwheid op het talud	[-]
γ_β	= invloedsfactor voor scheve golfaanval	[-]
ξ_0	= brekerparameter	[-]

De term links van het gelijkteken in vergelijking (3.1) is de zogenaamde “relatieve golfoploop”. De brekerparameter, ξ_0 , kan als volgt uitgeschreven worden:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}} \quad (3.2)$$

waarin:

α	= de hoek van het talud	[°]
s_0	= de golfsteilheid	[-]

Deze laatste term is gelijk aan:

$$s_0 = \frac{2\pi H_{m0}}{gT_{m-1,0}^2} \quad (3.3)$$

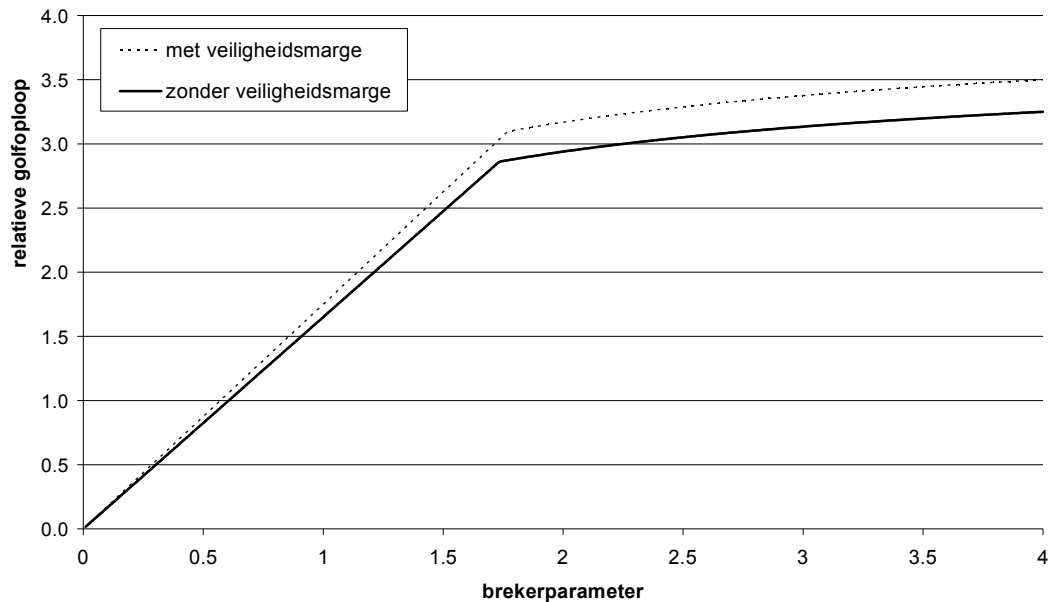
met

$T_{m-1,0}$	= spectrale periodemaat	[s]
g	= zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]

Voor ontwerp- en toetsregels wordt vaak een extra veiligheidsmarge ingebouwd. De mate van golfoverslag wordt daardoor iets hoger ingeschat. Deze veiligheidsmarge maakt reeds onderdeel uit van vergelijking (3.1). Bij probabilistische berekeningen kan deze marge weggelaten worden. In dat geval verandert vergelijking (3.1) in:

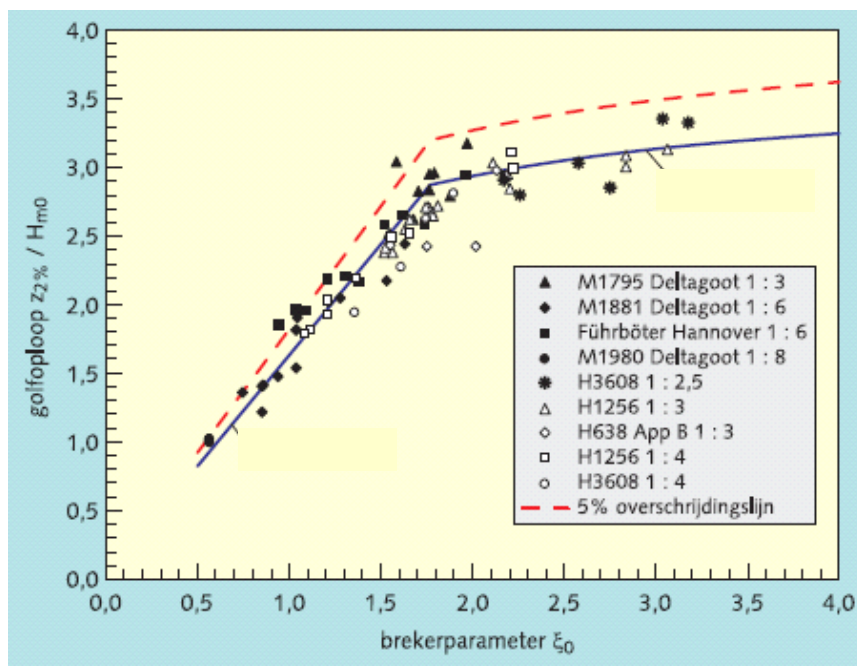
$$\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} = \begin{cases} 1.65\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta\xi_0 & ; \gamma_\beta\xi_0 \leq 1.8 \\ 1.65\gamma_b\gamma_f \left(4.0 - 1.5/\sqrt{\xi_0}\right) & ; \gamma_\beta\xi_0 > 1.8 \end{cases} \quad (3.4)$$

Voor de volledigheid: formule (3.4) voorspelt onder gelijke condities een lagere golfploop dan formule (3.1). Formule (3.4) kan gezien worden als de “verwachtingswaarde”, terwijl formule (3.1) gezien kan worden als verwachtingswaarde plus één keer de standaarddeviatie. Figuur 3.3 vergelijkt de twee formules voor de situatie dat de drie invloedsfactoren (γ_b , γ_f , en γ_β) gelijk zijn aan 1.

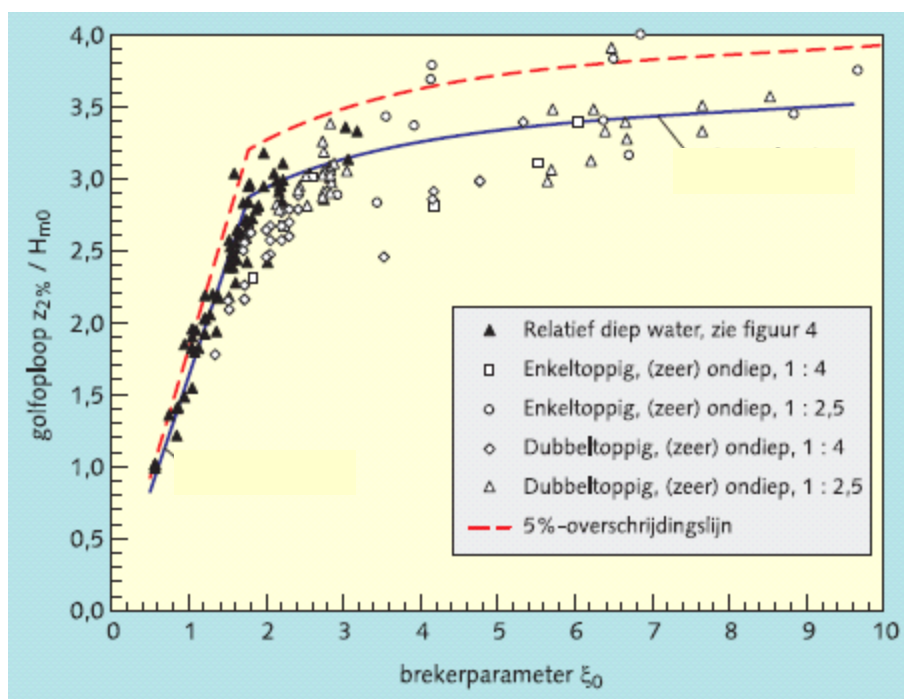


Figuur 3.3 Vergelijking tussen formule (3.1) en formule (3.4) voor de situatie dat de drie invloedsfactoren (γ_b , γ_f , en γ_β) gelijk zijn aan 1.

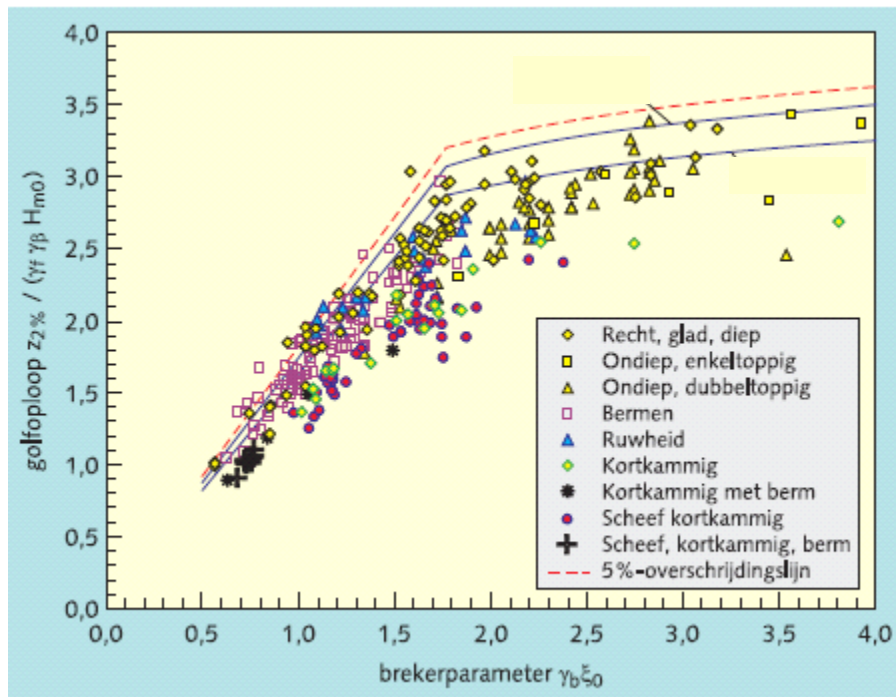
Figuur 3.4 t/m Figuur 3.6 maken een vergelijking tussen formule (3.4) enerzijds en metingen (van laboratoriumproeven) anderzijds. Figuur 3.4 toont alleen metingen op gladde, rechte taluds op relatief diep water. Het betreft de metingen waarbij de invloedsfactoren γ_b , γ_f , en γ_β gelijk zijn aan 1 en derhalve geen invloed hebben op de uitkomst. Datzelfde geldt voor Figuur 3.5, maar deze bevat ook metingen van taluds bij relatief ondiepe voorlanden. Figuur 3.6, ten slotte, toont de hele diversiteit aan meetcondities, dus ook met bermen, scheve golfval en extra ruwheid (γ_b , γ_f , en γ_β zijn dus niet meer per definitie gelijk aan 1).



Figuur 3.4 Golfoploop voor een glad recht talud op relatief diep water; metingen in combinatie met formule (3.4) (uit: TAW, 2002).



Figuur 3.5 Golfoploop bij rechte gladde taluds, inclusief (zeer) ondiepe voorlanden en dubbeltoppige spectra; metingen in combinatie met formule (3.4) (uit: TAW, 2002)

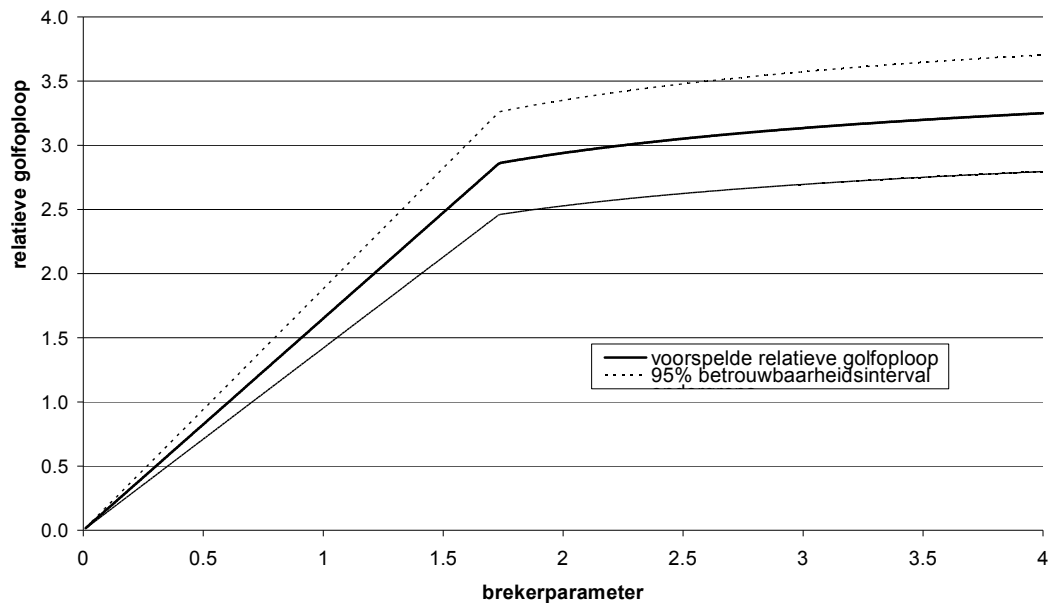


Figuur 3.6 Golfloop bij diverse omstandigheden; metingen in combinatie met formule (3.4) - onderste doorgetrokken lijn - en formule (3.1) - bovenste doorgetrokken lijn (uit: TAW, 2002)

Vanwege de grotere diversiteit aan meetcondities is de bandbreedte in Figuur 3.6 het grootst. Volgens het Technische rapport (TAW, 2002) is de variatiecoëfficiënt in Figuur 3.6 gelijk aan 0,07.

Met andere woorden: de standaarddeviatie van de “voorspelfout” van formule (3.4) is ongeveer 7% van de voorspelde waarde. Dit betekent dat de grenzen van het 95% betrouwbaarheidsinterval ongeveer 14% verwijderd zijn van de voorspelde waarden. Dit is weergegeven in Figuur 3.7. Let wel: deze onzekerheid is gebaseerd op vergelijkingen met metingen van laboratoriumproeven. Daar komt nog een onzekerheid bij voor verschillen tussen laboratoriumproeven en werkelijke dijken. Hierover later meer.

Overigens is niet helemaal duidelijk waar de waarde van 0.07 voor de variatiecoëfficiënt vandaan komt. TAW [2002] maakt hier geen melding van. In Van der Meer and Janssen [1992] staat voor vergelijkbare analyses aangegeven dat het de variatie betreft in de richtingscoëfficiënt van het steile deel van de grafiek per individuele meting. Dit behoeft wellicht enige toelichting: voor elke meting kan een lijn getrokken worden vanuit de oorsprong tot aan deze meting en voor deze lijn kan dan eenvoudig een richtingscoëfficiënt bepaald worden. Door nu voor elke meting deze richtingscoëfficiënt af te leiden kan een variatie in de richtingscoëfficiënt afgeleid worden. Deze variatie is, mits uitgedrukt als variatiecoëfficiënt, representatief voor de absolute afwijking van een meting tot de lijn die met vgl (3.4) wordt beschreven. Echter, deze afwijking is dus alleen gebaseerd op het steile deel van de grafiek, ofwel voor kleine waarden van brekerparameter, ξ_0 .



Figuur 3.7 Relatieve golfoploop volgens vergelijking (3.4) en 95% betrouwbaarheidsinterval, uitgaande van een variatiecoëfficiënt van 0,07.

3.4.2 Additionele wetenswaardigheden

Andere formules voor golfoploop

Vergelijking (3.4) is eigenlijk een soort van compromis tussen de vergelijkingen uit De Waal en Van der Meer [1992] resp. Van Gent [2001]. De Waal en Van der Meer [1992] kwamen tot de volgende vergelijking (in generieke vorm opgeschreven):

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma H_{m0}} = \begin{cases} c_0 \xi_0 & ; \xi_0 \leq p \\ c_1 & ; \xi_0 > p \end{cases} \quad (3.5)$$

waarin:

- γ = verzamelterm voor γ_b , γ_f , en γ_β
- p = grenswaarde tussen twee delen van de vergelijking
- c_0, c_1 = fitconstanten

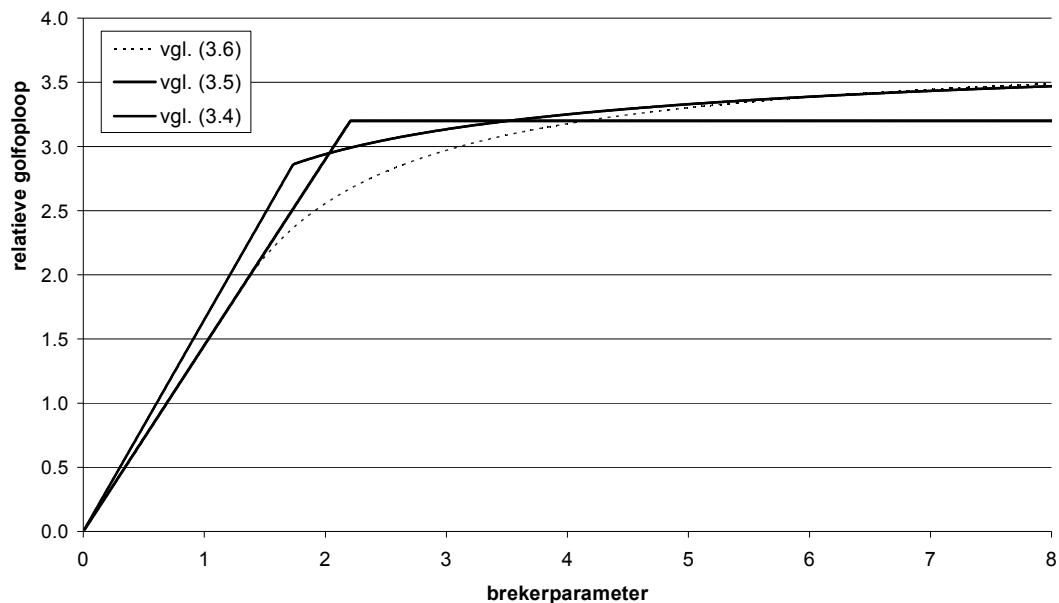
Van Gent [2001] kwam met de volgende vergelijking:

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma H_{m0}} = \begin{cases} c_0 \xi_0 & ; \xi_0 \leq p \\ c_1 - c_2 / \xi_0 & ; \xi_0 > p \end{cases} \quad (3.6)$$

waarin:

- c_0, c_1, c_2 = fitconstanten

In (3.5) worden c_0 en c_1 zodanig gekozen dat de vergelijking continu is in p . In (3.6) worden c_0 , c_1 en c_2 zodanig gekozen dat de vergelijking én diens afgeleide continu zijn in p . Vergelijking (3.5) bestaat uit een steil deel ($\xi_0 < p$) en een horizontaal deel ($\xi_0 > p$). Vergelijking (3.6) bestaat uit een steil deel en een minder steil deel. Dat laatste geldt ook voor vergelijking (3.4), maar het belangrijkste verschil is dat in vergelijking (3.4) de afgeleide niet continu is. In die zin is vergelijking (3.4) dus een soort compromis tussen de vergelijkingen (3.5) en (3.6). Figuur 3.8 illustreert dit aan de hand van voorbeelden.



Figuur 3.8 Relatieve golfoploop volgens vergelijkingen (3.4) t/m (3.6).

In Van Gent [2001] is aangetoond dat met vergelijking (3.6) een betere fit van de data verkregen kan worden dan met vergelijking (3.5). Dat betekent dat de onzekerheid gereduceerd kan worden. Mogelijk kan dus ook PC-Overslag verbeterd worden door toepassing van vergelijking (3.6) in plaats van vergelijking (3.4).

Laboratorium versus werkelijke dijken

De eerder besproken onzekerheden zijn gebaseerd op vergelijkingen van het model voor golfoploop met metingen in laboratoriumproeven. Dat geeft geen volledig beeld van de onzekerheid, omdat er ook verschillen zijn tussen laboratoriumproeven en “de werkelijkheid”. In Van Gent [2001] en Van Gent et al [2001] is de vergelijking gemaakt tussen laboratoriumproeven enerzijds en metingen bij de Pettemer zeewering anderzijds. Voor de 2% golfoploop geldt dat de absolute verschillen gemiddeld 4% zijn en dus relatief klein. Daar moet bij vermeld worden dat in deze vergelijking de zogenaamde “dunne waterlagen” (waterlagen < 10 cm) zoals bemeten in de laboratoriumproeven niet meegenomen zijn in de vergelijking. Als die lagen wel worden meegenomen dan zijn de verschillen beduidend groter. Deze dunne waterlagen zijn echter niet relevant voor het falen van een kering.

3.5 Gevoeligheidsanalyse

3.5.1 Inleiding

De vorige secties beschrijven de onzekerheden die een rol spelen bij het bepalen van hydraulische randvoorwaarden aan de teen van de dijk (§3.3) en bij golfploopberekeningen (§3.4). Bij de golfploopberekeningen (§3.4) is direct de invloed zichtbaar van de onzekerheden op de benodigde kruinhoogte. Bij de hydraulische randvoorwaarden is dat niet het geval, omdat deze “indirect” van invloed zijn op de benodigde kruinhoogte. Met behulp van Hydra-K kan deze invloed echter redelijk eenvoudig gekwantificeerd worden. Daartoe worden windsnelheid, waterstand en golfparameters gevarieerd op basis van de in sectie §3.3 genoemde onzekerheden.

3.5.2 Aanpak

De toegepaste procedure is dezelfde als in WL [2006]: voor waterstand, windsnelheid, golfhoogte en golfperiode maken we een schatting van de standaarddeviatie (als maat voor onzekerheid) op basis van de informatie uit sectie 3.3. Vervolgens wordt elke parameter één voor één gevarieerd op basis van deze standaarddeviatie, terwijl de overige parameters gelijk worden gekozen aan de oorspronkelijk waarde. Deze variatie wordt toegepast voor alle N de stormgebeurtenissen waarmee Hydra-K de faalkans berekent.

Stel dat de standaard deviation van parameter X gelijk is aan $p\%$, dan worden de volgende twee Hydra-K runs uitgevoerd:

1. Alle N waarden van parameter $X + p\%$;
2. Alle N waarden van parameter $X - p\%$.

De resultaten van deze twee berekeningen geven een maat voor de gevoeligheid van de berekende kruinhoogte als gevolg van de onzekerheid in parameter X . In totaal worden 5 parameters aan deze onzekerheidsanalyse onderworpen:

Offshore: waterstand (H), windsnelheid (U) en spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$);

Nearshore: significante golfhoogte (H_{m0}) en spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$).

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de 5 parameters en de standaarddeviatie die in deze analyse is toegepast. Deze waarden zijn overgenomen uit WL [2006].

Tabel 3.1 Parameters en hun geschatte standaarddeviatie.

offshore			nearshore		
variabele	symbool	standaarddeviatie	variabele	symbool	standaarddeviatie
waterstand	H	0.6 m	golfhoogte	H_{m0}	10%
windsnelheid	U	15%	golfperiode	$T_{m-1,0}$	20%
golfperiode	$T_{m-1,0}$	20%			

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor locatie Petten, om meer precies te zijn de locatie met coördinaten $X=105662$; $Y=531747$; (dezelfde locatie als in RIKZ [2007]). De berekeningen zijn uitgevoerd met een onderzoeksversie van Hydra-K, waarmee eenvoudig parameterwaarden aangepast kunnen worden. Deze onderzoeksversie is gebaseerd op versie 3.2i van Hydra-K.

3.5.3 Keuze van het aantal stochastische variabelen in Hydra-K

Voor de Hollandse kust, waar Petten onderdeel van uitmaakt, biedt Hydra-K twee rekenopties ten aanzien van het te gebruiken aantal stochastische variabelen:

- Rekenoptie 1: drie variabelen: windrichting, windsnelheid en waterstand; of
Rekenoptie 2: vier variabelen: windrichting, windsnelheid, waterstand en spectrale golfperiode;

Al deze stochastische variabelen zijn in Hydra-K gekoppeld aan offshore locaties. Voor de berekening van de randvoorwaarden in het kader van HR2006 is voor de Hollandse kust optie 2 toegepast, dus met vier stochastische variabelen. Desondanks prefereren we in deze analyse het gebruik van de eerste optie (drie stochastische variabelen) omdat de tweede optie niet geschikt wordt geacht voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse. De reden hiervoor is reeds toegelicht in WL [2006] en wordt onderstaand kort herhaald.

Hydra-K gebruikt rekenresultaten van het golfmodel SWAN voor de vertaling van offshore meteorologische en hydraulische condities naar nearshore golfcondities.

Deze modelberekeningen zijn uitgevoerd voor verscheidene combinaties van (offshore) waterstand, windrichting, windsnelheid en (optioneel) spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$. Deze berekeningen zijn uitgevoerd over een relatief groot bereik, althans voor de eerste drie variabelen. Voor de golfperiode, daarentegen, is een relatief smal bereik doorgerekend: voor elke combinatie van waterstand, windsnelheid en windrichting zijn de volgende twee mogelijke realisaties van $T_{m-1,0}$ gesimuleerd met SWAN:

- (i) de verwachtingswaarde van $T_{m-1,0}$, gegeven de realisaties van windrichting en –snelheid;
- (ii) de verwachtingswaarde van $T_{m-1,0}$ minus 10%.

In de gevoeligheidsanalyse worden de waarden van diverse parameters gevarieerd, zoals beschreven in de vorige paragraaf. In het geval van reken-optie 2 (vier stochasten) van Hydra-K leidt dit tot het ongewenste effect dat de waarde van $T_{m-1,0}$ soms tot ver buiten de hierboven beschreven grenzen kan komen. Dit heeft tot gevolg dat Hydra-K zich moet baseren op *extrapolatie* van SWAN-resultaten in plaats van *interpolatie*. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse kunnen daardoor onbetrouwbaar worden. Eén van de gevolgen is bijvoorbeeld dat een toename van de windsnelheid leidt tot een afname van de benodigde kruinhoogte, hetgeen in strijd is met datgene wat “in werkelijkheid” verwacht mag worden.

Voor de volledigheid bespreken we in het vervolg wel de resultaten van beide rekenopties.

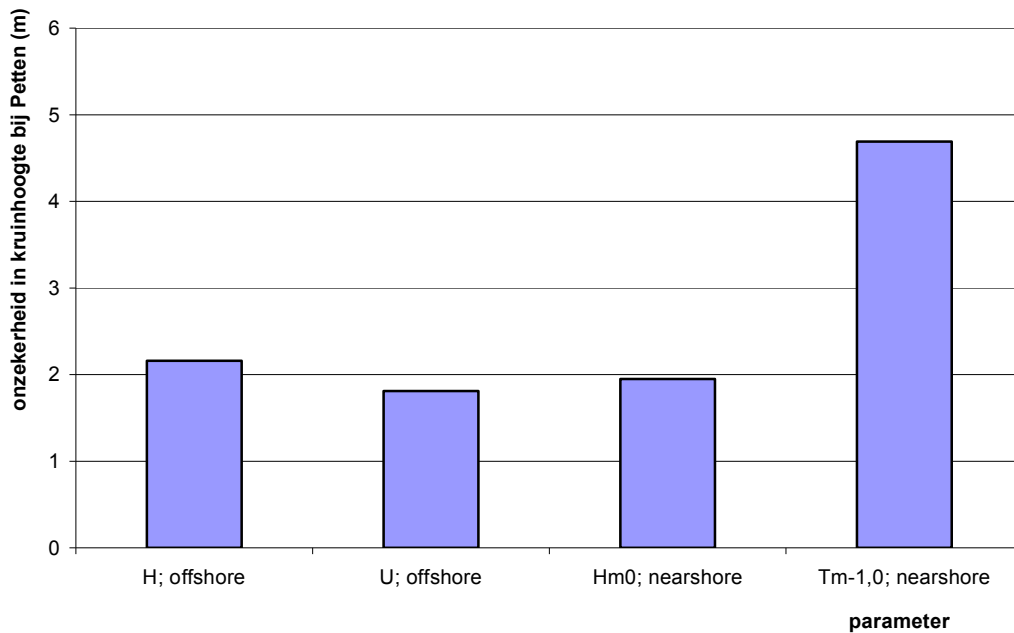
3.5.4 Gevoeligheidsanalyse op basis van drie stochastische variabelen

Tabel 3.2 toont de berekende kruinhoogtes bij de normfrequentie waar bij de waarde van de in de eerste kolom genoemde parameter telkens 1 keer de standaarddeviatie is opgeteld (eerste run) of juist afgetrokken (tweede run). De laatste kolom van deze Tabel toont bovendien het verschil in uitkomsten van de twee runs en Figuur 3.9 geeft de schematische weergave van dit verschil. Hieruit blijkt dat de geschatte onzekerheid in de nearshore golfperiode, $T_{m-1,0}$, het grootste effect heeft op de onzekerheid in de kruinhoogte: zelfs ruim twee keer zo groot als voor de andere parameters, H , U en H_{m0} . De onderlinge verschillen tussen de laatstgenoemde drie parameters zijn relatief klein.

De reden waarom de kruinhoogte met name gevoelig is voor $T_{m-1,0}$ is in de eerste plaats uiteraard dat de mate van golfoploop tegen een dijk erg gevoelig is voor de waarde van de golfperiode. Verder is de onzekerheid in de waarde van deze parameter groter dan de onzekerheid in de nearshore golfhoogte. De onzekerheid in de *offshore* parameters (wind en waterstand) is weliswaar vergelijkbaar met die van de nearshore golfperiode, maar hun invloed op de golfoploop is “slechts” indirect merkbaar. Een toename in deze parameters leidt tot een toename in de nearshore golfhoogte en golfperiode, maar deze toename is procentueel een stuk kleiner dan de 20% die voor de nearshore golfperiode is aangenomen.

Tabel 3.2 Berekende dijkhoogte [m+NAP] voor de normfrequentie van 1/10.000 per jaar voor twee runs net Hydra-K waar bij de waarde van de in de eerste kolom genoemde parameter telkens 1 keer de standaarddeviatie is opgeteld (eerste run) of juist afgetrokken (tweede run). Rekenoptie: golfperiode niet als extra stochast.

parameter	off/nearshore	Run		
		+ standaarddeviatie	- standaarddeviatie	verschil
H	offshore	16.85	14.69	2.16
U	offshore	16.37	14.56	1.81
H_{m0}	nearshore	16.74	14.79	1.95
$T_{m-1,0}$	nearshore	18.10	13.41	4.69



Figuur 3.9 Verschil in berekende kruinhoogte (m) tussen de twee runs (laatste kolom van Tabel 3.2).

3.5.5 Gevoeligheidsanalyse op basis van vier stochastische variabelen

In de vorige sectie is de invloed van de offshore golfperiode op de berekende kruinhoogte niet aan bod gekomen. Deze invloed kan alleen gekwantificeerd worden als in Hydra-K de rekenoptie gebruikt wordt met vier stochastische variabelen in plaats van drie, waarbij de offshore golfperiode de “toegevoegde” stochastische variabele is. Echter, zoals aangegeven in sectie 3.5.3 is deze optie minder geschikt voor het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse.

Tabel 3.3 toont de berekende kruinhoogtes bij de normfrequentie waar bij de waarde van de in de eerste kolom genoemde parameter telkens 1 keer de standaarddeviatie is opgeteld (eerste run) of juist afgetrokken (tweede run). Deze Tabel is vergelijkbaar met Tabel 3.2 (rekenoptie 1: drie stochastische variabelen) en in Tabel 3.4 is de vergelijking met Tabel 3.2 uitgewerkt. Daaruit blijkt dat voor windsnelheid, U , de verschillen tussen de resultaten van beide rekenopties groot zijn. Bij rekenoptie 2 geldt namelijk dat een toename in de windsnelheid tot een lagere kruinhoogte leidt dan een afname in de windsnelheid.

Dit tegenstrijdige resultaat heeft te maken met het in sectie 3.5.3 beschreven negatieve effect van extrapolatie. Bij rekenoptie 1 speelt dit probleem niet.

De resultaten van Tabel 3.2 en Tabel 3.3 geven echter wel aan dat dit probleem mogelijk alleen geldt voor de windsnelheid, want voor de overige parameters komen de resultaten van de twee rekenopties goed overeen (zie Tabel 3.4). Er is dus goede hoop dat de resultaten van de gevoeligheidsanalyse van de offshore waarde van $T_{m-1,0}$, zoals bepaald met rekenoptie 2, betrouwbaar zijn. In dat geval is dit een parameter die voor een belangrijke mate bijdraagt aan de onzekerheid in de golfloop bij Petten.

Tabel 3.3 Berekende dijkhoogte [m+NAP] voor de normfrequentie van 1/10.000 per jaar voor twee runs net Hydra-K waar bij de waarde van de in de eerste kolom genoemde parameter telkens 1 keer de

standaarddeviatie is opgeteld (eerste run) of juist afgetrokken (tweede run). Rekenoptie: golfperiode als extra stochast.

parameter	off/nearshore	Run		
		+ standaarddeviatie	- standaarddeviatie	verschil
H	offshore	17.52	15.28	2.24
U	offshore	15.78	16.66	-0.88
$T_{m-1,0}$	nearshore	18.83	13.67	5.16
H_{m0}	nearshore	17.42	15.35	2.07
$T_{m-1,0}$	nearshore	18.28	13.86	4.42

Tabel 3.4 Vergelijking van de laatste kolommen van Tabel 3.2 (rekenoptie 1) en Tabel 3.3 (rekenoptie 2)

parameter	off/nearshore	rekenoptie 1	rekenoptie 2	% verschil
H	offshore	2.16	2.24	4%
U	offshore	1.81	-0.88	149%
$T_{m-1,0}$	offshore	-	5.16	-
H_{m0}	nearshore	1.95	2.07	-6%
$T_{m-1,0}$	nearshore	4.69	4.42	6%

3.5.6 Conclusies

De belangrijkste conclusies uit de gevoeligheidsanalyse zijn:

1. Het effect van de onzekerheden in de offshore windsnelheid, waterstand en golfperiode en in de nearshore golfhoogte en golfperiode op de met Hydra-K berekende kruinhoogte in Petten is zeer significant.
2. Van deze parameters is de kruinhoogte het meest gevoelig voor de golfperiode (offshore en nearshore).

4 Methode “Vrijling” als alternatief voor methode “De Haan”

4.1 Inleiding

Stormomstandigheden langs de Nederlandse kust karakteriseren zich vaak door hoge waterstanden die gelijktijdig optreden met hoge golven. Onder invloed van wind wordt het water in het Noordzeebekken tijdens stormcondities omhoog gestuwd en worden windgolven opgewekt. De waterstandsopzet door wind en de windgedreven golven geven beide een belangrijke bijdrage aan de hydraulische belasting op waterkeringen langs de kust. Doordat de waterstanden en de golfcondities tijdens stormomstandigheden door dezelfde drijvende meteorologische condities worden bepaald, kunnen ze bij het bepalen van de hydraulische belasting op waterkeringen niet als onafhankelijke stochasten worden beschouwd.

In een situatie zonder afhankelijkheid tussen stochasten kan de gezamenlijke statistiek van hydraulische condities eenvoudig worden afgeleid uit de marginale kansverdelingen. De situatie met afhankelijkheid maakt dat een stuk lastiger. Vaak is het nog wel mogelijk om de marginale kansverdelingen en de onderlinge correlaties te bepalen, maar is het niet eenvoudig deze te combineren tot één gezamenlijke kansverdeling. Met name indien de stochastische variabelen niet normaal of lognormaal verdeeld zijn is dit een ingewikkeld verhaal. Dit is het geval voor de Nederlandse kust, waar de stochastische variabelen wind, golfcondities en waterstand met een conditionele Weibull kansverdelingen kan worden beschreven [RIKZ, 1995].

Om de gezamenlijke statistiek van hydraulische condities op diep water te beschrijven dient dus met de afhankelijkheid tussen waterstand en golfcondities rekening te worden gehouden. Dat kan op twee manieren:

- een methode die volledig gebaseerd is op statistische methoden
- een methode die gebaseerd is op de combinatie van statistische methoden en op fysica gebaseerde modellen

Methode “De Haan” valt onder de eerste categorie². In Methode “De Haan” wordt de gecombineerde statistiek van de stochastische variabelen wind, golfcondities en waterstanden met behulp van een niet-parametrische methode meegenomen. Er wordt gebruik gemaakt van een reeks simultane waarnemingen om de onderlinge samenhang tussen de stochasten te modelleren. Dit heeft als voordeel dat er geen functiebeschrijving nodig is van de gezamenlijke kansverdeling van de betrokken stochasten. De belangrijkste aanname van methode “De Haan” is dat de beschikbare waarnemingen van waterstanden en golfcondities representatief zijn voor het fysische proces langs de Nederlandse kust.

² N.b. voor de statistiek bij de kering wordt wel fysica gebruikt

Het doel van voorliggende studie is de prestatie van methode “De Haan” te evalueren. In de werkgroep ENW³-kust is de vraag gesteld of de methode van Vrijling & Bruinsma [1980] en Mulder & Vrijling [1980], kortweg de methode “Vrijling”, een goed alternatief is voor methode “De Haan”. Methode “Vrijling” is een voorbeeld van de tweede type methode voor het afleiden van de gezamenlijke statistiek van hydraulische condities op diep water waarbij niet alleen gebruik wordt gemaakt van extreme waarde statistiek, maar deze statistiek gecombineerd wordt met fysische modellen. Vrijling beschrijft de sterke afhankelijkheid tussen waterstanden en golfcondities met een parametrisch fysisch model. Er wordt regelmatig gesuggereerd dat de combinatie van statistische extrapolatie en wiskundige, op de fysica gebaseerde, modellen tot realistischere uitkomsten leidt dan methoden die puur op statistische extrapolatie zijn gebaseerd. In het kader van dit project wordt een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar de methode “Vrijling”. In de haalbaarheidsstudie gaan we na of het mogelijk is om de methode te reproduceren en welke gegevens daarvoor nodig zijn. De implementatie en toepassing van de methode komt dan mogelijk in een vervolgproject aan bod. Wel wordt een voorzet gegeven om een vergelijking tussen methode “De Haan” en methode “Vrijling” mogelijk te maken.

In de haalbaarheidsstudie bestuderen we de methode op basis van de artikelen Vrijling & Bruinsma [1980] en Mulder & Vrijling [1980]. De methode is recent ook toegepast op andere kustlocaties dan de Oosterscheldekering. Voortman et al. [2002] en Webbers et al. [2004] hebben de methode toegepast op de kust bij Groningen en de tweede Maasvlakte. Deze recente onderzoeken hebben samen met het overleg met professor Vrijling op 29 oktober 2007 bijgedragen aan een beter begrip van de methode “Vrijling”.

4.2 Beschrijving van de methode “Vrijling”

4.2.1 Algemeen

De methode “Vrijling” is eind jaren 70'/begin jaren '80 ontwikkeld en toegepast voor het ontwerp van de Oosterscheldekering. In een tweetal artikelen is de methode “Vrijling” uiteengezet. In het eerste artikel, Vrijling & Bruinsma [1980], is de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van het stormvloedpeil, de golfenergie en de waterstand van het Oosterschelde bekken afgeleid door middel van statistische extrapolatie in combinatie met wiskundige, op de fysica gebaseerde, modellen. Vrijling & Bruinsma noemen de volgende redenen om naast statistische extrapolatie gebruik te maken van fysische modellen:

- beschikbare meetreeksen van stormgebeurtenissen zijn te kort voor marginale statistiek
- beschikbare meetreeksen zijn niet altijd representatief voor het fysische proces over het gehele frequentiebereik
- bij een beperkte beschikbaarheid van data is het moeilijk om een geschikte extreme waarde verdeling te kiezen en de parameters van de verdeling af te leiden
- kennis van de fysische behoudswetten kan niet alleen gebruikt worden om na te gaan of de voorspellingen ten aanzien van extreme waarden realistisch zijn, maar kunnen ook gebruikt worden om de statistische extrapolatie te ondersteunen

³ Expertise Netwerk Waterkeren

De transformatie van de gezamenlijke statistiek op diep naar ondiep water, ter plaatse van de teen van de waterkering, komt in het tweede artikel, Mulder & Vrijling [1980], aan bod. Dit resulteerde in een kansverdeling van de totale hydraulische belasting op de Oosterschelde stormvloedkering.

De essentie van methode “Vrijling” ligt bij het feit dat de statistische extrapolatie naar extreme waarden niet ondersteund wordt door fysische modellen. De focus van de haalbaarheidstudie ligt daarom op het verkennen van de meerwaarde voor de beschrijving van de statistiek van de hydraulische condities op diep water en de generieke toepasbaarheid van de methode “Vrijling” te verkennen. De vertaling van diep water naar ondiep water wordt buiten beschouwing gelaten. Voor de vertaling van de hydraulische condities van diep water naar de teen van de waterkering kan in vervolgstudies gemaakt worden van een vertaalslag als in Mulder & Vrijling [1980] of van numerieke rekenmodellen zoals SWAN.

In Voortman et al. [2002] en Webbers et al. [2004] zijn de hydraulische condities op diep water op vergelijkbare wijze als in Vrijling & Bruinsma [1980] beschreven voor respectievelijk de kust bij Groningen en de tweede Maasvlakte. Hoewel het concept van Vrijling in deze recente onderzoeken verder is uitgewerkt, blijft het conceptuele model gehandhaafd. Er wordt onderscheid gemaakt tussen afhankelijke en onafhankelijke variabelen. De relaties tussen deze variabelen zijn gebaseerd op kennis over de fysica.

In de toepassingen Vrijling & Bruinsma [1980], Voortman et al. [2002] en Webbers et al. [2004] zijn verschillende keuzes gemaakt ten aanzien van de onafhankelijke variabelen. In Voortman et al. [2002] is gebruik gemaakt van de onafhankelijke variabelen waterstand en windsnelheid. In Vrijling & Bruinsma [1980] en Webbers et al. [2004] is de windsnelheid met behulp van de verschillende fysische relaties uit de gezamenlijke kansverdelingsfunctie geëlimineerd, waardoor alleen de waterstand als onafhankelijke variabele overblijft.

4.2.2 Illustratie van het concept van de methode “Vrijling”

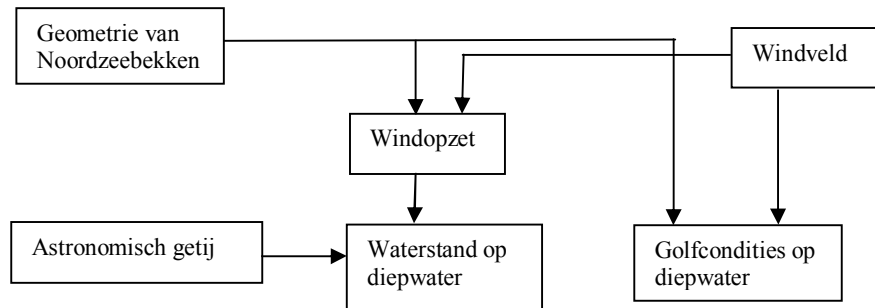
Het concept van methode “Vrijling” bestaat uit de volgende stappen:

1. het opstellen van een conceptueel model dat de onderlinge relatie tussen de verschillende processen weergeeft
2. het opzetten van de parameterische fysische modellen die de relatie tussen de afhankelijke hydraulische variabelen en de onafhankelijke variabelen beschrijven.
3. het kalibreren en valideren van deze fysische modellen en het afleiden van de marginale kansverdelingen van de afhankelijke variabelen op basis van metingen
4. het combineren van bovenstaande fysische modellen en de marginale kansverdelingen tot één gezamenlijke kansverdeling van de hydraulische condities

Conceptueel model met fysische relaties van tussen hydraulisch processen

De hydraulische condities op diep water bestaan uit de combinatie van waterstand, wind- en golfcondities.

De waterstand is opgebouwd uit twee stochastische onafhankelijke variabelen: de windopzet en het astronomisch getij. De windopzet en golfcondities zijn beide gerelateerd aan wind. Naast wind en astronomisch getij beïnvloedt ook de geometrie van het Noordzeebekken (strijklengte en diepte) de waterstand en golfcondities. Figuur 4.1 geeft het conceptuele model van de hydraulische randvoorwaarden langs de Nederlandse kust weer.



Figuur 4.1 Het conceptuele model van de hydraulische randvoorwaarden langs de Nederlandse kust.

Vanuit de natuur gezien is de waterstand een afhankelijke variabele van de wind. Vanuit de wiskunde gezien kan dat ook omgedraaid zijn en kan de wind als functie van de waterstand gespecificeerd. In het concept Van Vrijling moet een keuze worden gemaakt welke variabelen de afhankelijke en welke de onafhankelijke variabelen zijn.

Indien in de wiskundige relatie wordt aangenomen dat de windsnelheid en het astronomisch getij de onafhankelijke variabelen zijn, kan de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van de hydraulische condities als volgt als het product van een set conditionele en marginale kansverdelingen worden beschreven:

$$f_{u, h_a, h_w, H_s, T_p}(v, \xi, \eta, \zeta, \tau) = f_{h_w|u, h_a}(\eta) \cdot f_{H_s|u}(\zeta) \cdot f_{T_p|u}(\tau) \cdot f_u(v) \cdot f_{h_a}(\xi) \quad (4-1)$$

Met:

- u windsnelheid [m/s]
- h_a astronomisch getij [m]
- h_w windopzet [m]
- H_s significante golfhoogte [m]
- T_p piekperiode van het golfveld [s]

De conditionele kansdichtheidsfuncties van de windopzet en de golfcondities worden verkregen door middel van fysische relaties met de onafhankelijke stochasten windsnelheid en astronomisch getij. De onafhankelijke variabelen zijn met behulp van marginale kansverdelingsfuncties beschreven.

Parametrische fysische modellen

Door zowel de windopzet als de golfcondities middels parametrische modellen als functie van de windsnelheid te beschrijven, kan een relatie worden opgesteld tussen de golfcondities en de waterstand.

In Vrijling & Bruinsma [1980] is een model opgezet dat de golfhoogte als functie van de waterstand beschrijft. Webbers et al. [2004] hebben dit concept uitgebreid door een relatie tussen de golfperiode en de golfhoogte toe te voegen. Op deze wijze worden de afhankelijke variabelen in dezelfde onafhankelijke variabelen uitgedrukt. We illustreren het gebruik van de parameterische modellen hieronder voor de golfhoogte en de waterstand. Eenzelfde analogie kan gevolgd worden voor de golfperiode en de waterstand.

De basis van het model dat de golfhoogte als functie van de waterstand beschrijft is het model voor windopzet van Weenink (1958) en het model voor de golfhoogte van Sverdrupp & Munk (1947) dat verder is ontwikkeld door Bretschneider (1952, 1958). De windopzet wordt als beschreven met de kwadratische functie van de windsnelheid:

$$h(u_9) = \alpha \cdot \frac{u_9^2}{g} \quad (4-2)$$

met

u_9 de windsnelheid die gedurende 9-uur onafgebroken wordt overschreden

α empirische parameter

g versnelling van de zwaartekracht

Uitgaande van onafhankelijkheid tussen het astronomisch getij en de windopzet, kan de waterstand h_w worden beschreven als functie van twee stochasten:

$$h_w(u_9, h_a) = h(u_9) + h_a \quad (4-3)$$

De golfhoogte kan voor een bepaalde windsnelheid en geometrie van het bekken (strijklengte F en waterdiepte d) met Bretschneider worden beschreven:

$$H_s(u, d, F) = \frac{u^2}{g} \tilde{H}_\infty \tanh\left(k_3 \left(\frac{dg}{u^2}\right)^{m_3}\right) \tanh\left(\frac{k_1 \left(\frac{Fg}{u^2}\right)^{m_1}}{\tanh\left(k_3 \left(\frac{dg}{u^2}\right)^{m_3}\right)}\right) \quad (4-4)$$

De empirische parameters k_1 , k_3 , m_1 , m_3 en $\tilde{H}_\infty$ zijn door CERC (1973) afgeleid met behulp van een groot aantal datasets afkomstig van locaties over de hele wereld.

Door met behulp van Vgl. 4-2 en Vgl. 4-3 de windsnelheid te schrijven als functie van de waterstand en deze te substitueren in Vgl. 4-4, de relatie van de golfhoogte, kan de relatie tussen de waterstand en de golfhoogte worden beschreven. Op deze manier kan het aantal onafhankelijke stochasten naar één worden teruggebracht, namelijk de waterstand.

Kalibratie parametrische fysische modellen en opstellen marginale kansverdelingen

Met behulp van waterstands-, golf- en windmetingen kunnen de fysische modellen worden afgeregeld en de marginale kansverdelingen van de onafhankelijke stochasten worden bepaald.

Voortman et al. [2002] hebben dit voor de kust bij Schiermonnikoog gedaan. Voor de analyse van hydraulische condities op diep water is gebruik gemaakt van een dataset van simultane waarnemingen van windsnelheid, waterstand, golfcondities en windopzet. Er is een selectie gemaakt van onafhankelijke stormgebeurtenissen door uit de dataset stormen met een windsnelheid boven een bepaalde drempelwaarde te selecteren.

Na het afregelen van de empirische parameters in de fysische modellen zijn de onzekerheden rond de deterministische parametrische relaties met behulp van kansverdelingen beschreven. Tot slot zijn de marginale kansverdelingen van de onafhankelijke stochasten windsnelheid en astronomisch getij bepaald.

Resultaat: het samenstellen van één gezamenlijke kansverdeling van de hydraulische condities

De gezamenlijke kansverdeling kan vervolgens worden bepaald uit de afgeregelde fysische relaties, de modelonzekerheden en de marginale kansverdelingen van de onafhankelijke stochasten. Uit deze gezamenlijke kansverdeling kunnen de marginale kansverdelingen voor de afzonderlijke hydraulische parameters worden bepaald door te integreren over het bereik de overige parameters.

4.3 Vergelijkingsmogelijkheden methode “De Haan” met methode “Vrijling”

De publicaties van Vrijling en de recente publicaties van Voortman et al. [2002] en Webbers et al. [2004] laten de potentie van de methode Vrijling zien. We adviseren de mogelijkheden van de methode in een vervolgstudie verder te onderzoeken.

Voor een vergelijking van methode “Vrijling” met methode “De Haan” bevelen we het volgende aan:

1. een vergelijking van de extreme waarde statistiek op diepwater
2. een vergelijking van de statistiek op ondiep water aan de teen van de waterkering

Voor de eerste vergelijking kan uit deze gezamenlijke kansverdeling van de hydraulische condities die met methode “Vrijling” op diep water kan worden afgeleid, de marginale kansverdelingen voor de afzonderlijke hydraulische parameters worden bepaald door te integreren over het bereik de overige parameters.

Deze marginale verdelingen kunnen worden vergeleken met de Weibull verdelingen die met klassieke extreme waarde statistiek puur op basis metingen zijn afgeleid én als extreme waarde statistiek in de Hydra-K zijn terug te vinden. Deze vergelijking kan voor alle meetlocaties op diepwater langs de Nederlands kust worden uitgevoerd.

In Hoofdstuk 2 zijn de overschrijdingskrommen van golfcondities op verschillende meetlocaties langs de Hollandse kust en in de Oosterschelde en Westerschelde vergeleken met de overschrijdingskrommen die met Hydra-K zijn afgeleid. De meetlocaties zijn geen diep water locaties, maar bevinden zich dicht bij de kust. In principe betrof de validatie in Hoofdstuk 2 daarom niet zozeer de validatie van methode “De Haan”, maar is de combinatie van methode “De Haan” en de SWAN transformatie, waarmee de condities op diepwater vertaald worden in de richting van de kust, gevalideerd. Indien we de prestatie van methode “Vrijling” op deze meetlocaties willen onderzoeken is een vertaalslag van de hydraulische condities op diep water in de richting van de kust nodig. Hiervoor zou onder andere gebruik kunnen worden gemaakt van de SWAN database in Hydra-K.

5 Conclusies en aanbevelingen

De conclusies van voorliggende rapportage worden hieronder samengevat.

Presentatie Hydra-K met betrekking tot de golfcondities

In het algemeen wordt geconcludeerd dat Hydra-K redelijk goed presteert met betrekking tot het berekenen van spectrale golfhoogte bij de normfrequentie. Voor beoordeling van de resultaten is het belangrijk onderscheid te maken in de diepte ter plaatse van de meetlocatie. De meetlocaties op ondiepwater ondervinden relatief veel invloed van de omgeving. Onder zeer extreme omstandigheden met hoge waterstanden kan deining daar beter doordringen dan tijdens de stormomstandigheden waaronder de metingen zijn uitgevoerd. Op ondiepe locaties zullen de golfcondities bij storm- en extreme omstandigheden daardoor verder uit elkaar liggen dan bij dieper gelegen meetlocaties. Voor dieper gelegen locaties treedt dit effect niet op en is het verschil tijdens storm- en extreme omstandigheden klein. Daarom heeft een onderschatting bij deze locaties veel meer impact op betrouwbaarheid van Hydra-K dan voor de locaties op ondiepwater.

Hydra-K presteert matig tot slecht met betrekking tot het berekenen van golfperiode bij de normfrequentie. De golfperiode is structureel aan de lage kant. Ondanks de correctie van de golfperiode van de SWAN uitvoer van de Westerschelde & Oosterschelde naar boven (SWAN geeft onderschatting van orde 9 %) en dankzij de Hollandse Kust naar onder (SWAN geeft overschatting van orde 9 %) geeft Hydra-K een onderschatting van golfperiode bij de normfrequentie. Onderzoek naar de structurele onderschatting van de golfperiode door Hydra-K wordt aanbevolen.

Oorzaken van de verschillen tussen metingen en Hydra-K kunnen worden gezocht in de gehele keten en kunnen gerelateerd worden aan, zowel de statistiek als de onderliggende golfberekeningen in Hydra-K. Aangezien de golfberekeningen gemakkelijk te isoleren zijn, raden we aan in eerste instantie te kijken naar de prestatie van het golfmodel SWAN. Deze aanpak bracht in voorliggend onderzoek de onbetrouwbare metingen in de golfdata van Hansweert aan het licht. Er wordt aanbevolen ook de datasets van alle andere meetlocaties op fouten te controleren.

De analyse van dit hoofdstuk is beperkt tot een vergelijking van Hydra-K resultaten op de meetlocaties. Echter in principe zijn we geïnteresseerd in de prestatie van Hydra-K aan de teen van de dijk. Hansweert HAN1 is meetlocatie die het dichtste bij de teen van de dijk ligt. Voor deze locatie presteert Hydra-K goed. Het heeft geen zin om in de toekomst metingen nog dichterbij de dijk uit te voeren. Vanwege morfologische activiteit leidt een dergelijke meetsessie tot een niet homogene dataset, waarmee moeilijk statistische analyses kunnen worden uitgevoerd.

Presentatie Hydra-K met betrekking tot golfoploop

In RIKZ [2007] is de overschrijdingskromme van de golfoploop afgeleid uit metingen en met Hydra-K voor de locatie Petten. Er is geconcludeerd dat de statistiek op basis van metingen en op basis van berekeningen goed met elkaar overeenkomen.

In voorliggende studie is de onzekerheid in de met Hydra-K berekende golfoploop bij de normfrequentie onderzocht. Onzekerheid in de golfoploop wordt onder andere veroorzaakt door de onzekerheid in de golfoploopformulering en onzekerheid in diverse onderdelen van de modelketen van Hydra-K, zoals offshore en nearshore randvoorwaarden.

De onzekerheid als gevolg van de golfoploopformulering is afhankelijk van de formule die gebruikt wordt. De onzekerheid in de golfoploop die door de huidige golfoploopformule in Hydra-K wordt veroorzaakt is ongeveer 14%.

Het effect van de onzekerheden in de offshore windsnelheid, waterstand en golfperiode, en in de nearshore golfhoogte en golfperiode op de met Hydra-K berekende golfhoogte in Petten blijkt zeer significant. Van deze parameters is de kruinhoogte het meest gevoelig voor de offshore en nearshore golfperiode.

Haalbaarheid van methode Vrijling

De methode “Vrijling” kan als aanvulling worden gezien naast de methode “De Haan”. De publicaties van Vrijling en de recente publicaties van Voortman et al. [2002] en Webbers et al. [2004] laten de potentie van de methode Vrijling zien. We adviseren de mogelijkheden van de methode in een vervolgstudie verder te onderzoeken.

Voor een vergelijking van methode “Vrijling” met methode “De Haan” bevelen we het volgende aan:

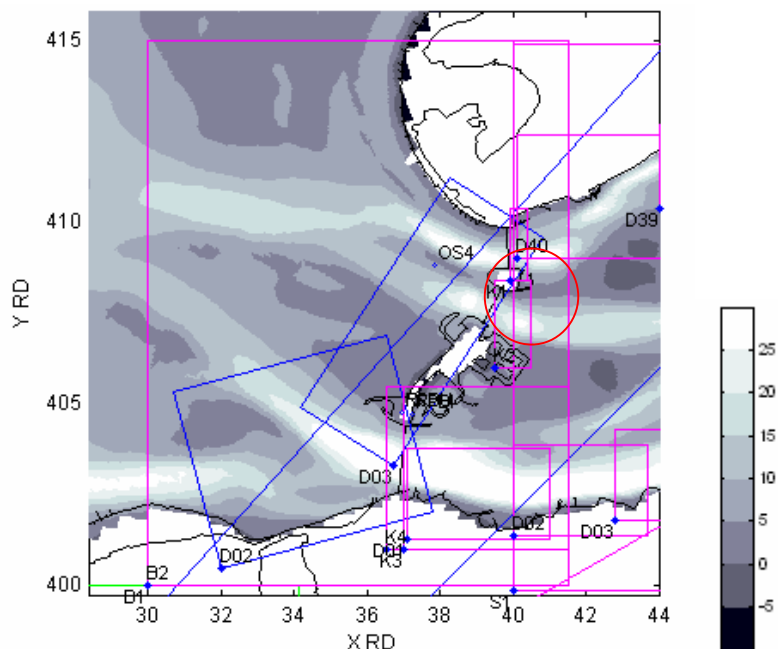
1. een vergelijking van de extreme waarde statistiek op diepwater;
2. een vergelijking van de statistiek op ondiep water aan de teen van de waterkering .

6 Referenties

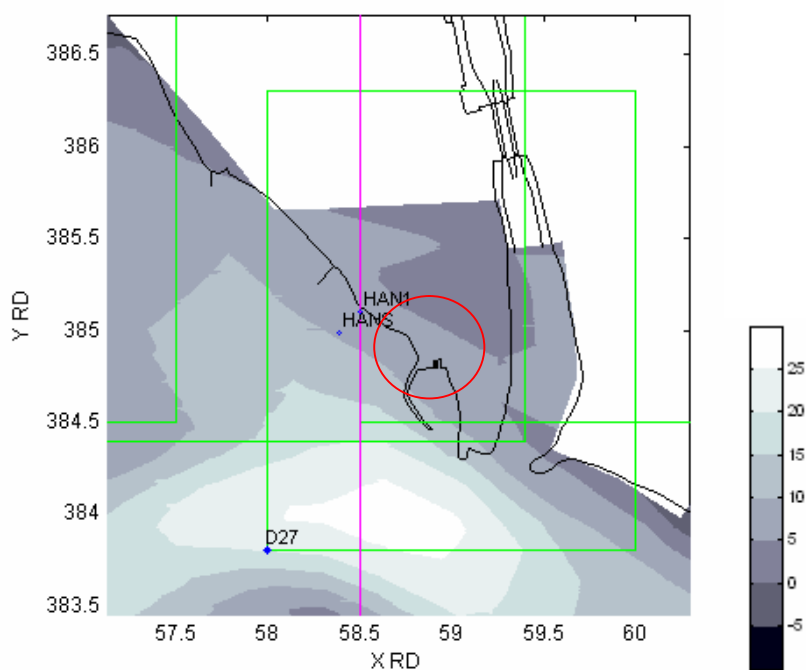
- Alkyon (2005). Herstructurering CD Rom's Westerschelde, Oosterschelde, Waddenzee, Hollandse Kust. Alkyon rapport A1479. Emmeloord.
- Bretschneider, C.L. (1952). Revised wave forecasting relationship. Proceedings of the second conference on Coastal Engineering, ASCE
- Bretschneider, C.L. (1958). Revisions in wave forecasting: deep and shallow water. Proceedings of the sixth conference on Coastal Engineering, ASCE
- De Waal, J.P. & Van der Meer, J.W. (1992). Wave run-up and overtopping on coastal structures, Proc. ICCE'92, ASCE, Vol. 2, pp. 1758-1771, Venice.
- Den Heijer, F., Vos, R. J., Diermanse, F.L.M., Groeneweg, J. & Tönis, R. (2006). Achtergrondrapport HR2006 voor de zee en estuaria. Rijkswaterstaat RIKZ.
- Den Heijer, F., et al. (2007). Extreme wave statistics using Regional Frequency Analyses. ISSH-Stochastic Hydraulics 2005, 23-24 May 2005.
- Efron, B. (1982). The Jackknife, the Bootstrap, and other resampling plans. ISBN 0-89871-179-7. Philadelphia publisher, 92 pp.
- Forristall, G.Z., Heideman, J.C., Legget, I.M., Roskam, B. & Vanderschuren, L. (1996). Effect of sampling variability on hindcast and measured wave height., Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering/September/October 1996.
- Groeneweg, J. & Doorn, N. (2005). Correctiewaarden Zeeland. Fase 3: bepaling correctiewaarden voor toetsing. WL rapport H4576.
- HKV (2006). Verbetering belastingmodellen. rapportage fase II. HKV rapport PR1161.
- HKV (2006). Vergelijking WindWater met Hydra-K, HKV rapport PR032.10, december 2006.
- HKV/WL (2005). Testrapport HYDRA-K oktober 2005, HKV lijn in water en WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, oktober 2005.
- Les, B. (2007). Additionele analyses naar aanleiding van rapportage "Validatie methode de Haan". RIKZ, 2007.
- Mulder, Th. & Vrijling, J.K. (1980). Probabilistic load determination. Proceedings international symposium on hydraulic aspects of coastal structures.
- RIKZ (1995). Golfvandvoorwaarden langs de Nederlandse kust op relatief diep water, Rapport RIKZ -95.024, 76p.
- RIKZ (2006). Achtergrondrapport HR2006 voor de zee en estuaria, hydraulische randvoorwaarden 2006, Rapport RIKZ/2006.029, december 2006.
- RIKZ (2007a). Vergelijking metingen en Hydra-K uitkomsten op de Oosterschelde. Memo Rijkswaterstaat RIKZ, 2007.
- RIKZ (2007b). Golfoploop Petten. Memo Rijkswaterstaat RIKZ, 2007.
- RIKZ (2007c). Vergelijking metingen en Hydra-K uitkomsten bij IJmuiden. 2007.
- Roskam, A. P. (1997). Piekperioden van brede of meertoppige golfspectra. Werkdocument RIKZ/OS-97.130x. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Svašek (2001). Omzetten data naar Petten 2000 format, 15 aug 2001 en update 25 oktober 2001, ref 01361/1196
- Sverdrupp, H.U & Munk, W.H. (1947) . Wind, Sea and Swell: Theory of relations for forecasting. Publication no. 601, U.S. Navy Hydrographic Office, Washington D.C.
- TAW (2002). Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft, mei 2002.
- Van der Meer, J.W. & Janssen, J.P.F.M. (1994). Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments, report WL | Delft Hydraulics, august 1994.
- Van Gent, M.R.A. (2001). Wave run-up on dikes with shallow foreshores, Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering, vol 127, no 5, sept/okt 2001, pp 254-262
- Van Gent, M.R.A., De Kruijf, A.C. & Murphy, J. (2001). Field measurements and laboratory investigations on wave propagation and wave-runup, Proceedings of waves 2001.

- Voortman, H. G. , Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J. K. (2002). Probabilistic description of hydraulic loads on sea defences. Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (ESREL), Vol. 1, Eds. E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini, p.545-552.
- Vrijling, J. K. & Bruinsma (1980). Hydraulic aspects of coastal structures; part 1: developments in hydraulic engineering, related to the design of the Oosterschelde storm surge barrier in the Netherlands, Delft University press, 1980.
- Webbers, P.B., Voortman, H.G., Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J. K. (2002). Multivariate statistics of Hydraulic Boundary Conditions for the Rotterdam Harbour Extension. 28th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2002), p. 1254 - 1266, Solving Coastal Conundrums, Cardiff, 07 July 2002 - 12 July 2002.
- Weenink, M.P.H. (1958). A theory and method of calculation of wind effects on sea levels in a partly enclosed sea, with special application to the southern coast of the North-Sea, Communications of the Royal Dutch Meteorological Institute, No. 73
- WL (1993). J.W. van der Meer en J.P. de Waal. Waterbeweging op taluds. Invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve lang- en kortkammige golfaanval. WL | Delft Hydraulics, verslag modelonderzoek, H 1256, april 1993.
- WL (2004). Golfstatistiek op relatief diep water 1979-2002, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, december 2004.
- WL (2005). Analyse golfstatistiek op relatief diep water, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, september 2005.
- WL(2006). Uncertainties in the Hydraulic Boundary Conditions of the Wadden Sea, Activity 0.1 of SBW Wadden Sea, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, december 2006.

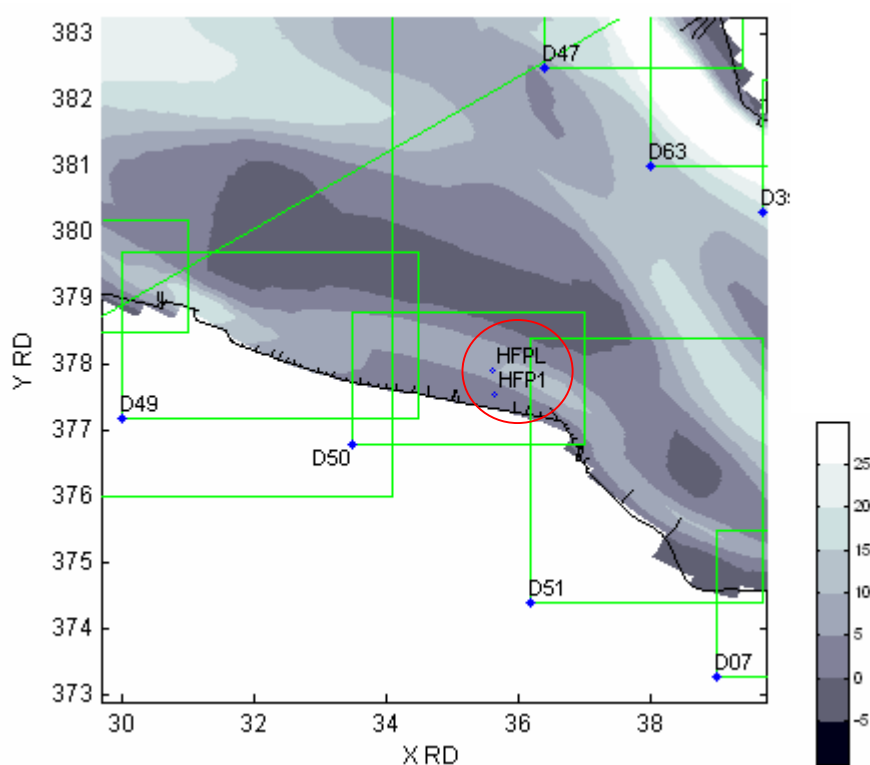
A Overzicht van rekenroosters SWAN



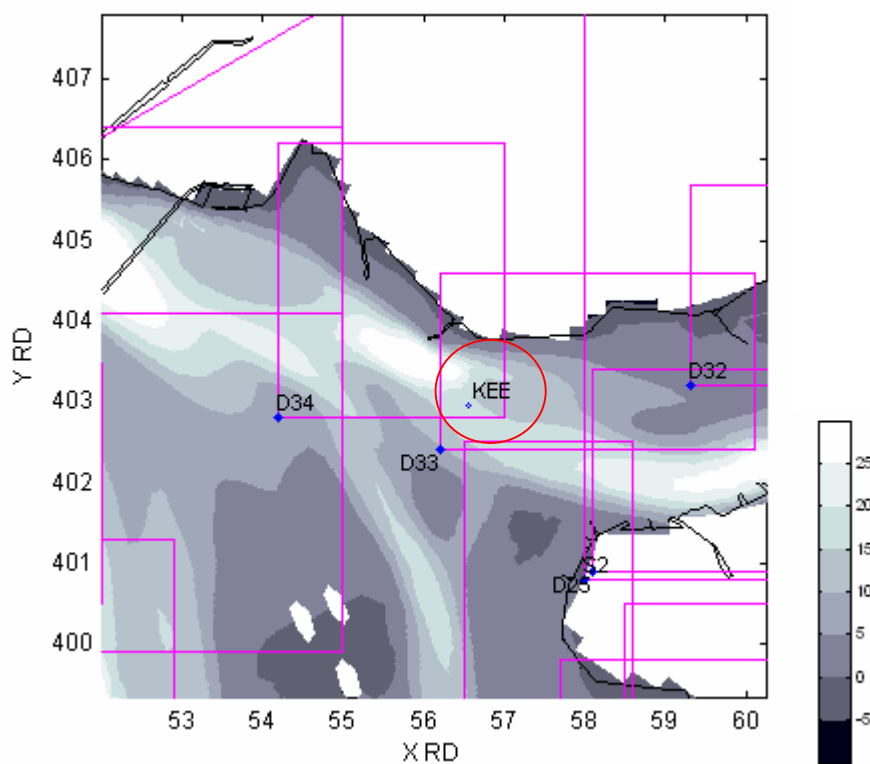
Figuur A.1 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie Oosterschelde OS4



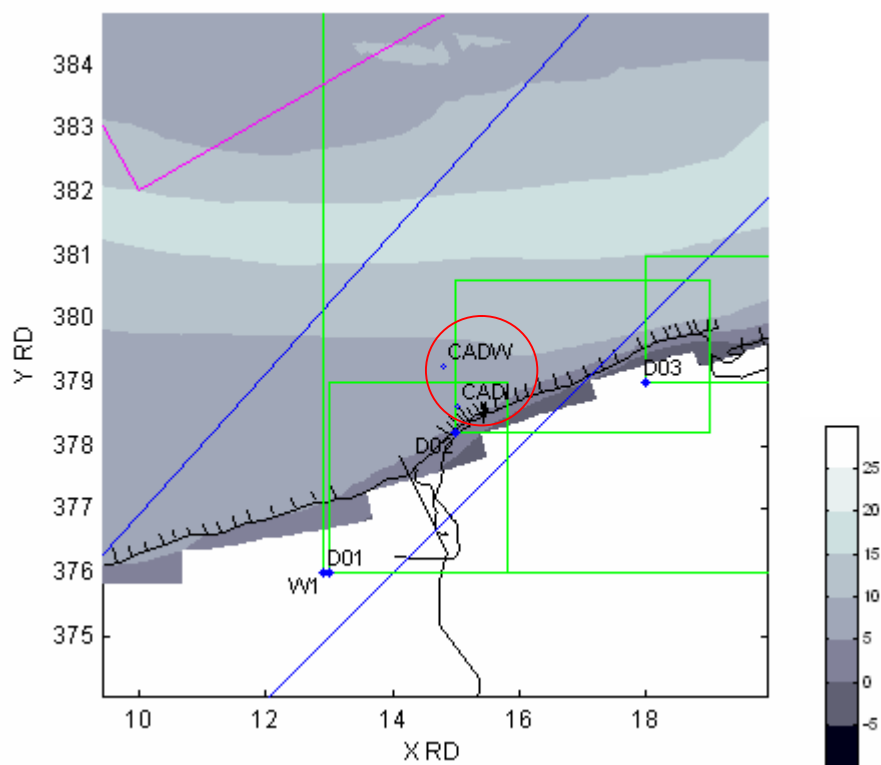
Figuur A.2 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie Hansweert



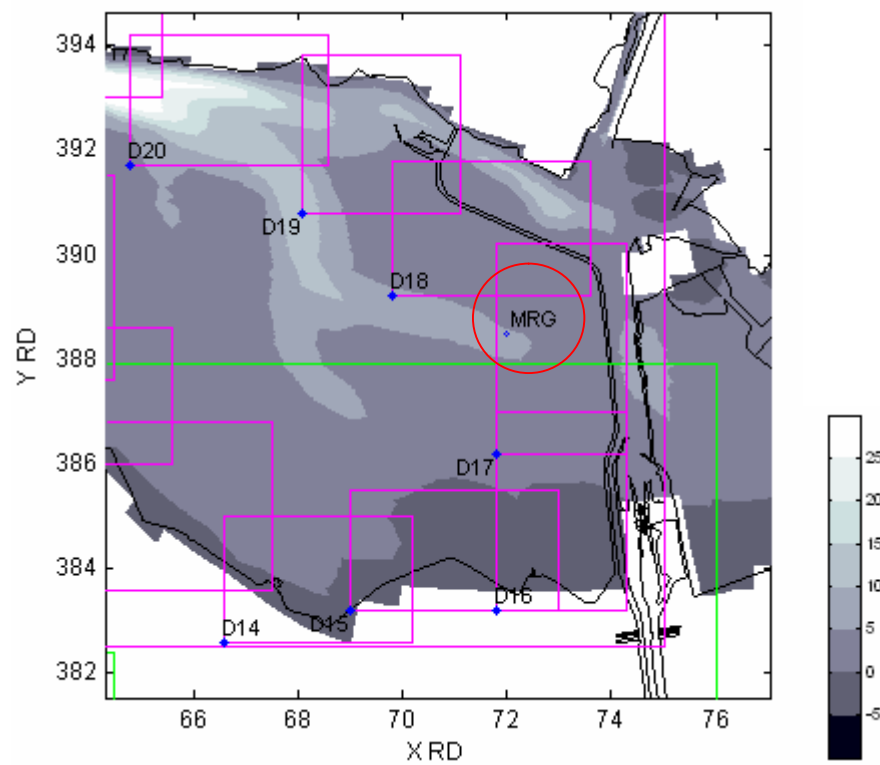
Figuur A.3 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie Hoofdplaat



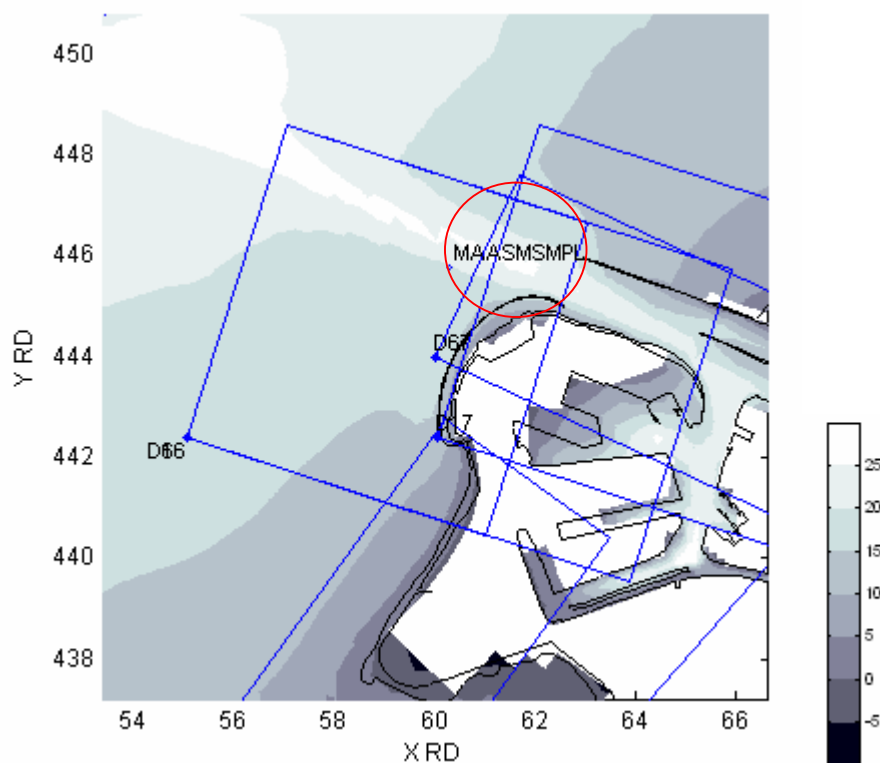
Figuur A.4 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie Keeten



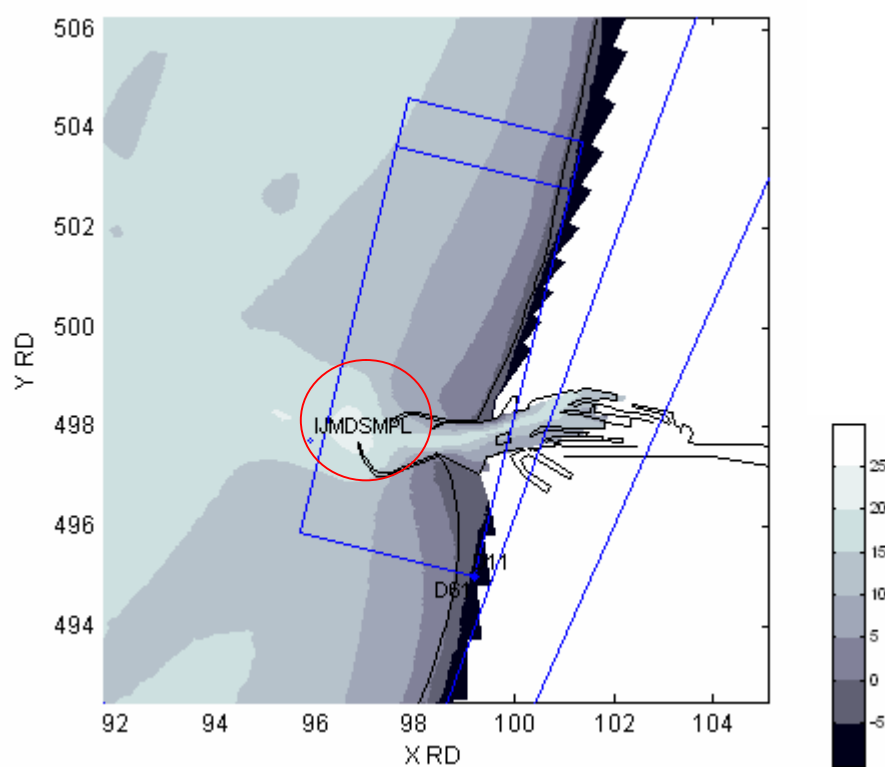
Figuur A.5 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie Cadzand



Figuur A.6 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie Marollegat

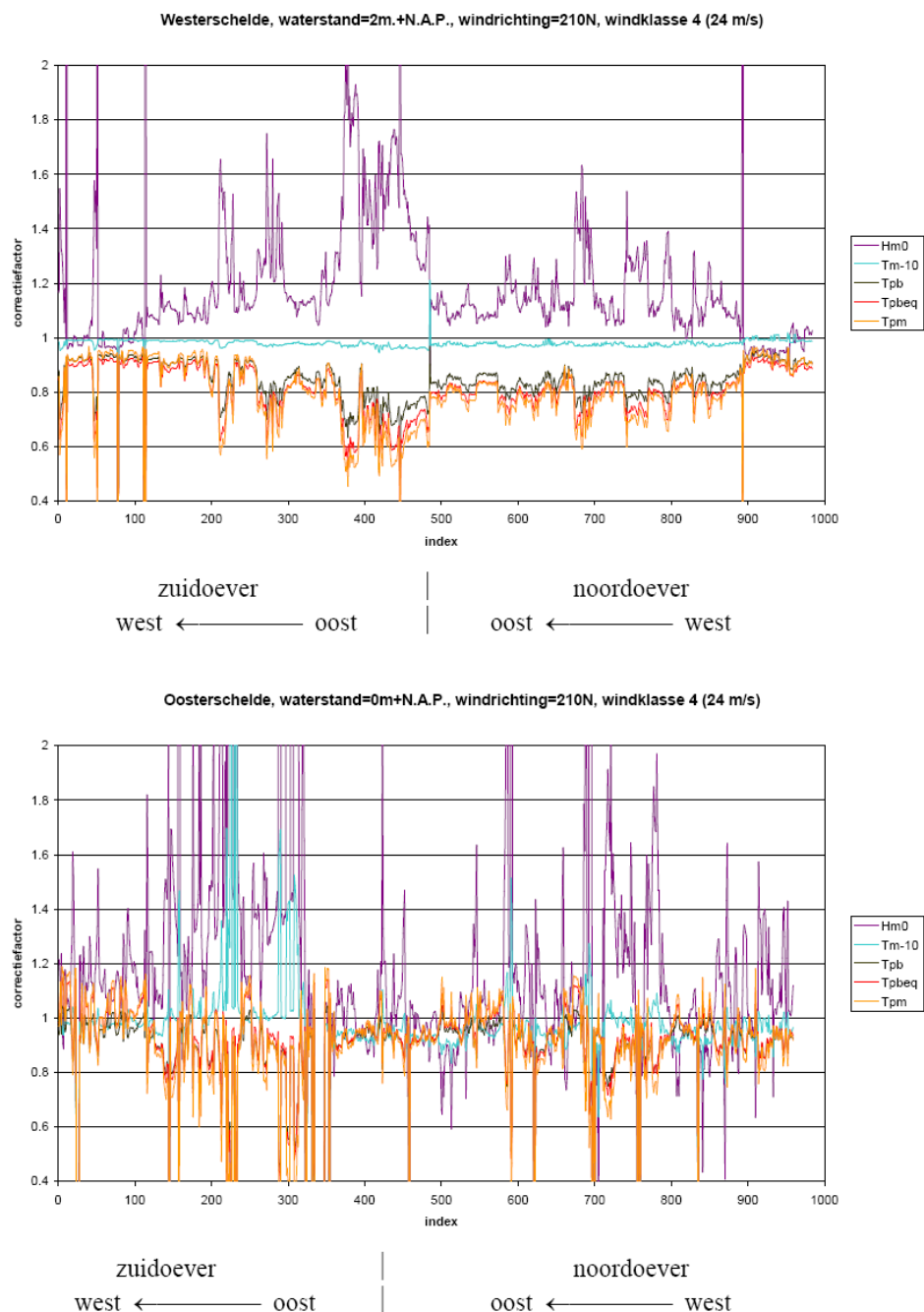


Figuur A.7 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie Maasmond

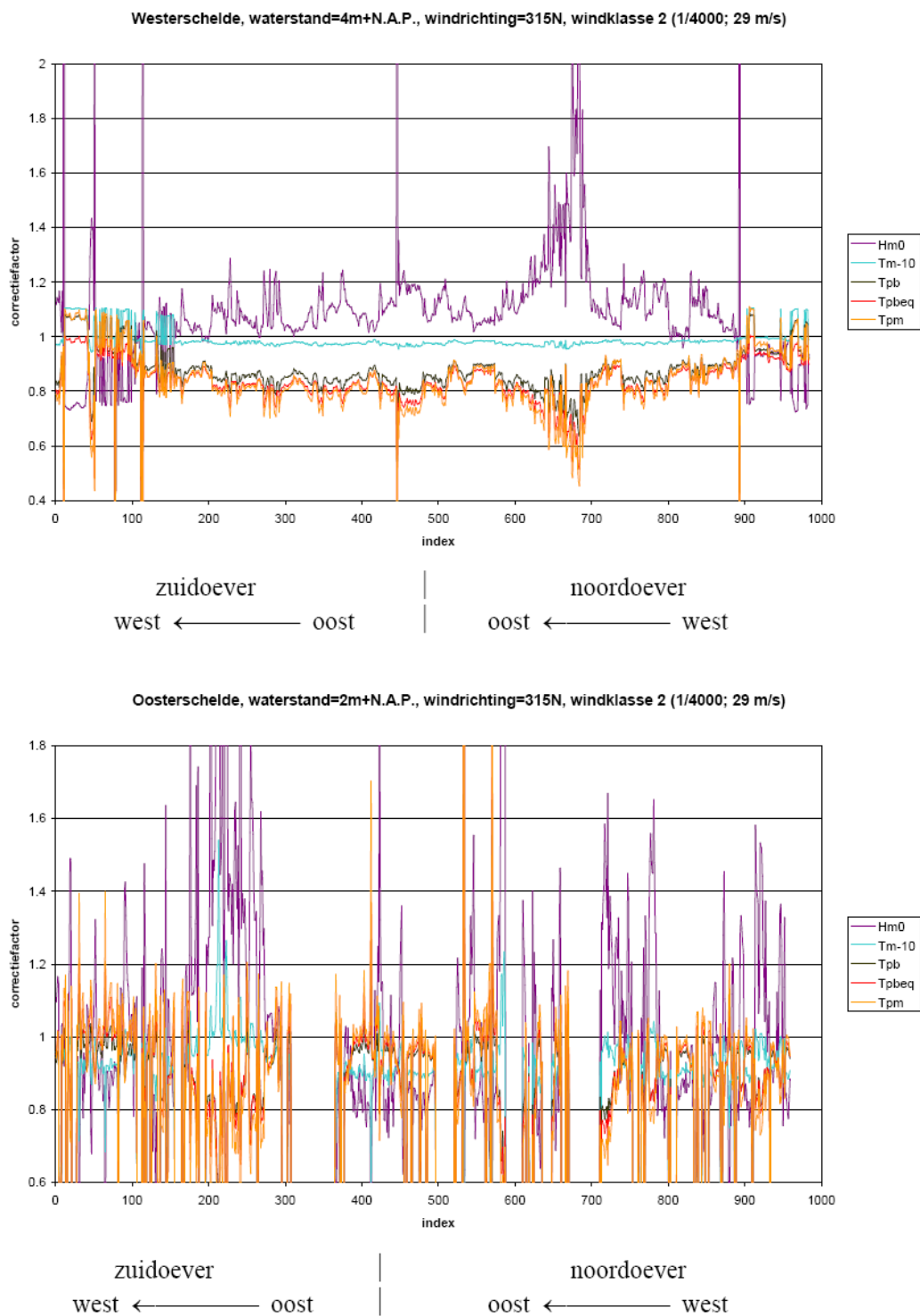


Figuur A.8 Rekenroosters in de omgeving van meetlocatie IJmuiden

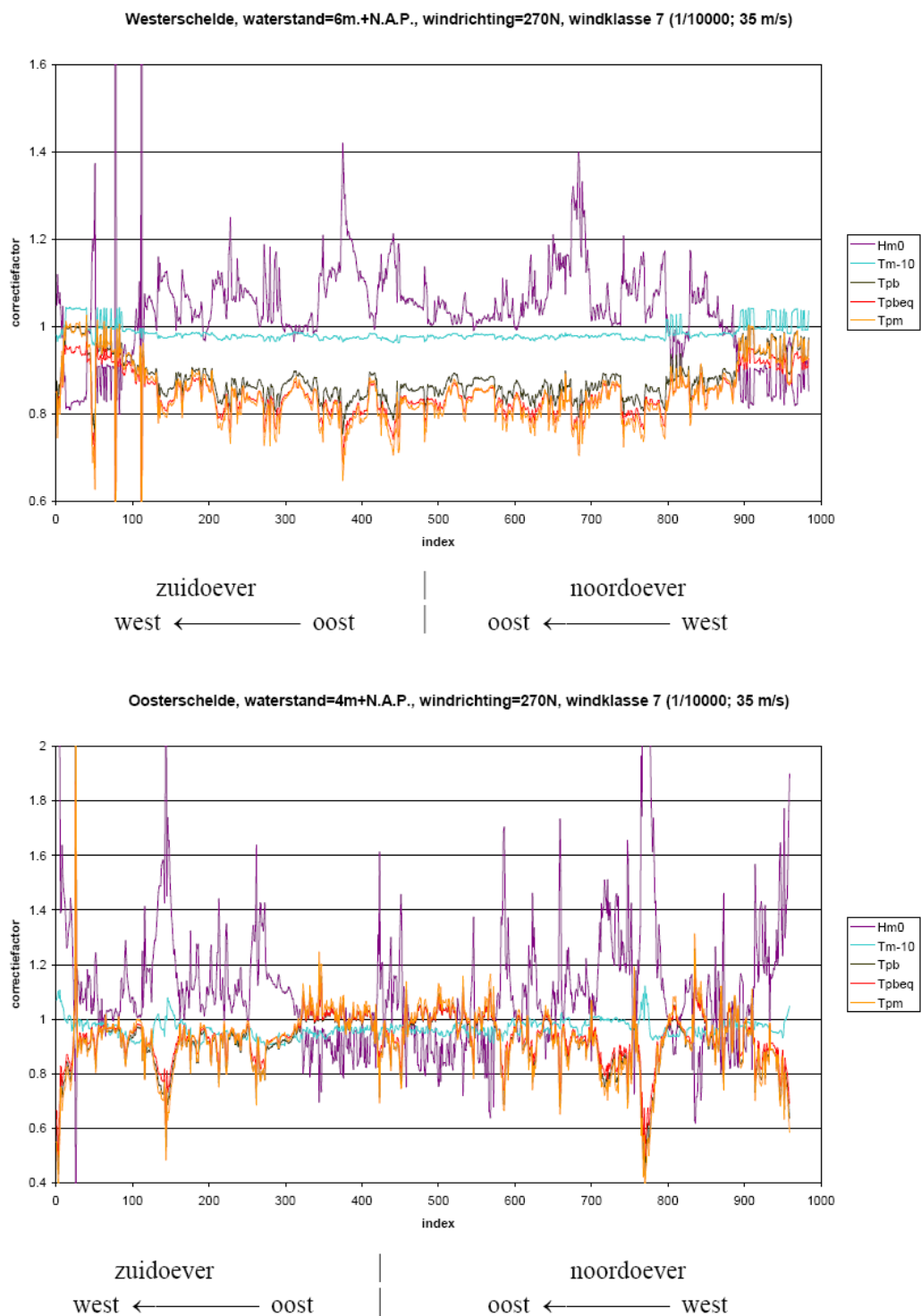
B Ruimtelijk verloop correctiewaarden SWAN bij verschillende condities (Groeneweg & Doorn, 2005)



Figuur B.1 Ruimtelijk verloop van de correctiewaarden voor de Westerschelde en Oosterschelde bij een stormconditie.



Figuur B.2 Ruimtelijk verloop van de correctiewaarden voor de Westerschelde en Oosterschelde bij een zware conditie.



Figuur B.3 Ruimtelijk verloop van de correctiewaarden voor de Westerschelde en Oosterschelde bij een extreme conditie

C Memo Les [2007] additionele quick scan analyses naar aanleiding van rapportage “Validatie methode De Haan”



Aan
Saskia van Vuren
Robert Vos

Van	Doorkiesnummer
B. Les	-
Datum	Bijlage(n)
30 oktober 2007	-
Onderwerp	
additionele quick scan analyses nav rapportage "Validatie Methode de Haan"	

1. Inleiding

In deze memo worden enkele analyses samengevat uitgevoerd in het kader van de eerste fase van het project "Validatie Methode de Haan". Voor deze fase worden overschrijdingscurven van golfhoogten en golfperiodes berekend met HYDRA-K vergeleken met overschrijdingscurven afgeleid uit golfmetingen. De meetlocaties dienen hiervoor dicht aan de kust te liggen voor een zo goed mogelijke vergelijking en kwalificatie van de berekeningsmethode van HYDRA-K.

De volgende analyses zijn uitgevoerd:

- 1) Effect van selectiecriterium op overschrijdingskrommen van de golfperiode bij Cadzand.
- 2) Controle golfrichtingen bij gekozen stormtijdstippen bij Cadzand
- 3) Gevoeligheid dijkoriëntatie bij diepwater meetlocaties (>15m)
- 4) Onzekerheidsanalyse plotpositie
- 5) Analyse van meetgegevens Hansweert (HAWI) naar aanleiding van onrealistisch hoge gemeten golven

De analyses zijn parallel aan het project uitgevoerd door RWS en vielen buiten de geoffreerde werkzaamheden. De analyses dienen als aanvulling op de gevolgde werkwijze van de opdrachtnemer.



2. Effect van stormselectie criterium op overschrijdingskrommen, Cadzand

2.1 Inleiding

Voor het maken van overschrijdingskrommen op basis van meetreeksen moet eerst een selectie gemaakt worden van stormen¹. Hierbij wordt als vuistregel aangenomen dat per jaar ongeveer 10 stormen gekozen dienen te worden. Voor selectie van golfhoogten wordt een eenvoudige “persistency” analyse toegepast waarbij een drempelwaarde en een tijdperiode als criteria gelden voor stormselectie. In deze memo is gekozen voor een tijdperiode van 48 uur wat inhoudt dat selecteerde maxima niet overschreden mogen worden binnen een tijdperiode van –24 uur tot +24 uur.

Bij het selecteren van golfperiodes op basis van dezelfde “persistency” analyse moet rekening gehouden worden met deining. Hoge golfperiodes (>8 sec) komen regelmatig voor met een kleine bijbehorende golfhoogte, zie Figuur 1 en 2.

In deze memo worden twee selectie methodes voor golfperiodes toegepast en met elkaar vergeleken. De geanalyseerde reeks is gemeten te Cadzand, CADW voor de periode 24-Nov-1997 tot 30-Apr-2007.

De volgende twee selectiemethodes van golfperiodes zijn getest:

- 1) Uitgaande van asymptotische afhankelijkheid tussen golfhoogte en golfperiode (de golfperiodes volgen direct uit de geselecteerde tijdstippen van golfhoogte)
- 2) Voer eerst een deiningcorrectie uit alvorens golfperiodes te selecteren op basis van drempelwaarde en persistency analyse (met tevens 48 uur tijdsloot)

2.2 Selectie uitgaande van asymptotische afhankelijkheid

In Figuur 2.1 zijn de tijdreeksen van golfhoogte en golfperiode geplot waarbij de tijdstippen van de golfperiodes gelijk zijn aan de geselecteerde golfhoogten.

2.3 Selectie uitgaande van deiningcorrectie en persistency analyse

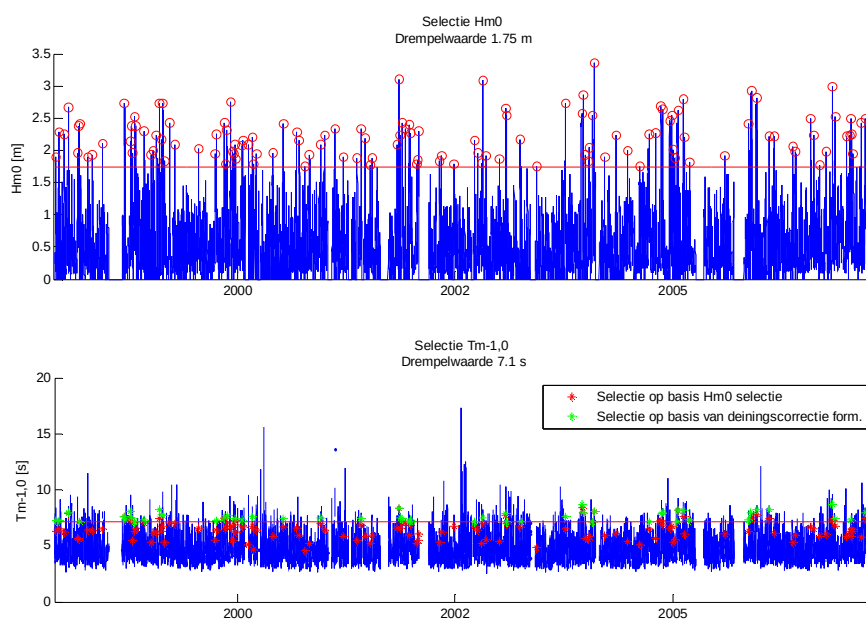
De deiningcorrectie wordt uitgevoerd op basis van een grenslijn. Hierbij worden deiningen gekarakteriseerd door hoge golfperiodes bij lage golfhoogten uitgefilterd. In Figuur 2.1 is het resultaat van de uitgevoerde selecties geplot voor golfhoogte en golfperiode $T_m-1,0$. In Figuur 2.2 laat de deiningcorrectie zien met de grenslijn gedefinieerd door

$$T_g = 1.1 * 4.5 \sqrt{H_{m0}} + 1$$

¹ Voor extreme waarden analyse moeten dagelijkse “normale” golfomstandigheden uitgefilterd worden.



De constanten zijn voor deze locatie geschat op basis van gemiddelden² uit rapportage “Golfstatistiek op relatief diep water 1979-2002, WL|Delft Hydraulics”. Op basis van visuele controle van de lijn in Figuur 2 lijken de constanten redelijk gekozen te zijn.



Figuur 2.1 Selectie stormen Cadzand Directional waverider

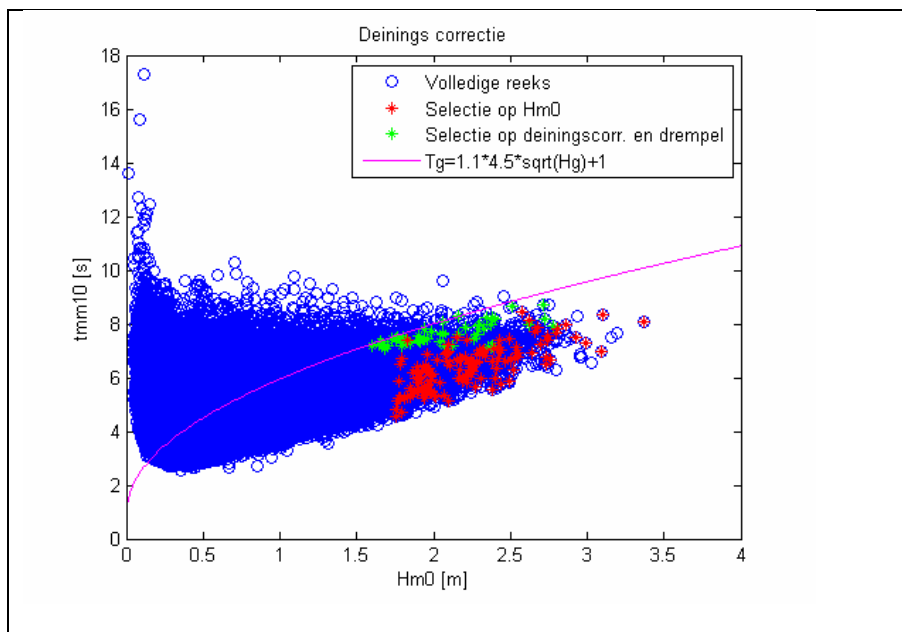
2.4 Resultaten

Uit de twee figuren blijkt dat golfperiode selectie op basis van deiningcorrectie hogere golfperiodes oplevert. De hoeveelheid geselecteerde golfhoogten en golfperiodes op basis van een drempelwaarden van 1.75 m en 7.1 s is respectievelijk 53 en 126.

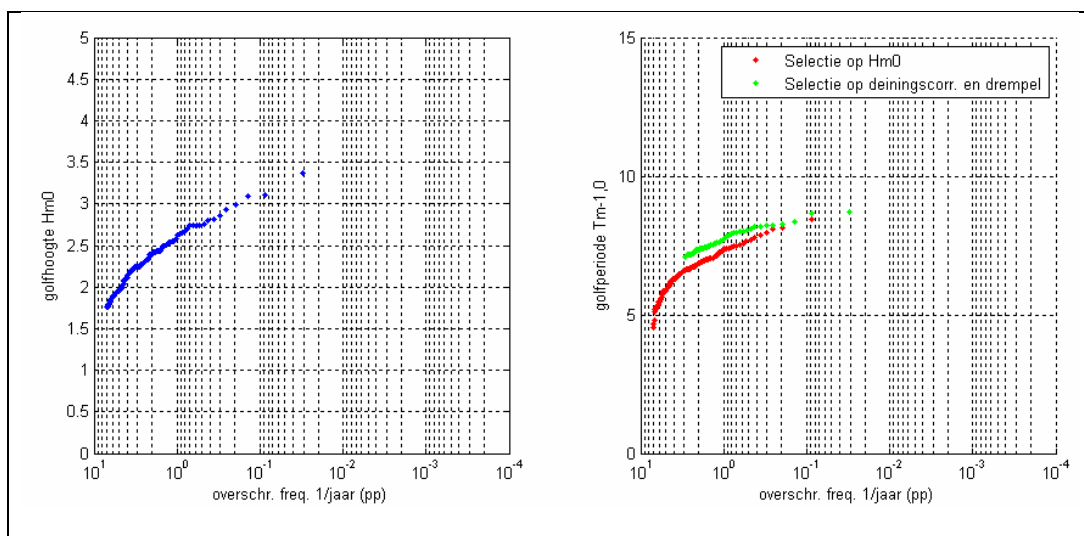
De uiteindelijke resultaten van de twee selectiemethodes worden gepresenteerd in Figuur 2.3. Hierin zijn de overschrijdingskrommen getekend van de geselecteerde stormen op basis van de twee selectie criteria.

De twee overschrijdingskrommen lopen niet veel van elkaar uiteen en naarmate de overschrijdingskans kleiner wordt komen ze dicht bij elkaar. De overschrijdingscurve op basis van deiningcorrectie loopt iets flauwer op zodat lagere extremen verwacht worden bij extrapolatie.

² Weerts, A, Diermanse, F Golfstatistiek op relatief diep water 1979-2002, WL|Delft Hydraulics, December 2004 zie tabel 3.2 voor constanten



Figuur 2.2 Deiningscorrectie Tm-1,0

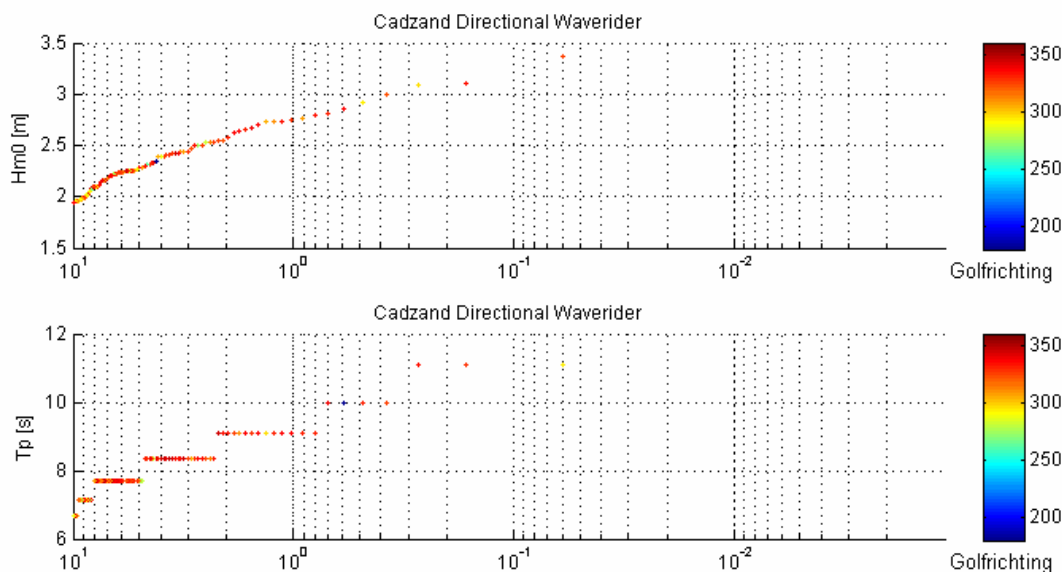


Figuur 2.3 Overschrijdingscurves Hm0 en Tm-1,0



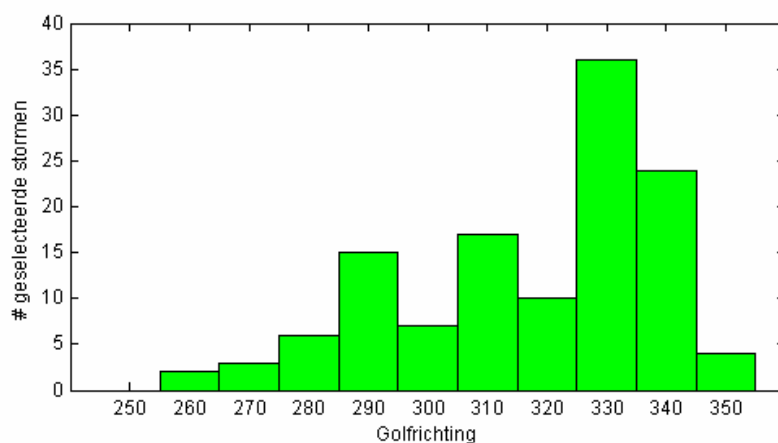
3. Controle golfrichtingen bij geselecteerde stormtijdstippen bij Cadzand

De overschrijdingskrommen van de meetlocaties in de rapportage gaven aanleiding om de golfrichtingen te bekijken van de geselecteerde stormen. Omdat bij Cadzand (CADW) de richtingen worden gemeten is deze meetlocatie gekozen voor het plotten van de overschijdingkromme inclusief golfrichtingen per selecteerde storm event, zie Figuur 3.1 geplot.



Figuur 3.1 Golfrichtingen bij geselecteerde stormtijdstippen Cadzand

In Figuur 3.2 zijn van de 126 geselecteerde storm events geplot in een histogram. Het blijkt dat golfrichtingen vanuit 330-340 het meest geselecteerd worden.



Figuur 3.2 Cadzand, golfrichting van geselecteerde stormen



4. Gevoeligheid dijkoriëntatie bij diepwater meetlocaties (>15m)

Voor het berekenen van overschrijdingskrommen met HYDR-K voor de meetlocaties moeten dijkoriëntaties opgegeven worden. Door het opgeven van een dijkoriëntatie wordt ruimtelijke informatie aan het meetpunt toegevoegd, dwz dat golven dwars op de dijkoriëntatie meestal niet waarschijnlijk zijn in verband de ruimtelijke geometrie (refractie). Daarom wordt meestal gekozen om voor deze meetlocaties de dijkoriëntatie te kiezen van de dichtst bij liggende dijk.

Voor de locaties Maasmond en IJmuiden is dit minder evident omdat deze twee locaties op veel dieper water liggen (>15 m) en veel minder beïnvloed worden door de omliggende ondiepwater geometrie.

Om de gevoeligheid van de dijkoriëntatie op de uitkomsten in te schatten zijn voor IJmuiden enkele berekeningen uitgevoerd met HYDR-K met verschillende dijkoriëntaties. De dijkoriëntatie van het dichtst bij liggende HYDR-K punt is 289°.

	1/10000			1 / 500		
Dijkoriëntatie	Hs Gecombineerde statistiek	Hs / HS ₂₈₉	Windrichting	Hs Gecombineerd e statistiek	Hs / HS ₂₈₉	Windrichting
270	6.15	1.08	300	5.75	1.03	280
289	5.69	1	320	5.57	1	300
300	5.65	0.99	320	5.24	0.94	320
330	5.56	0.97	330	5.13	0.92	330

Tabel 4.1 Gevoeligheid dijkoriëntatie HYDR-K - IJmuiden

Uit bovenstaande Tabel 4.1 blijkt dat voor 3 verschillende dijkoriëntaties, de golfhoogte orde 8% kan verschillen bij een verandering van 10% in de dijkoriëntatie (van 289 naar 270).



5. Analyse van meetgegevens Hansweert (HAWI)

5.1 Inleiding

Naar aanleiding van het project “Validatie Methode de Haan” waarbij een onderdeel van het project meetgegevens vergelekt met berekeningsresultaten HYDRA-K, blijken er onrealistische hoge golven te Hansweert voor te komen. Deze memo onderzoekt kort wat de mogelijk oorzaak hiervan zou kunnen zijn.

In HYDRA-K kunnen overschrijdingskrommen van golfparameters worden berekend op basis van offshore statistiek die getransformeerd worden naar nearshore op basis van een transformatiematrix van SWAN berekeningsresultaten.

5.2. Meetgegevens Hansweert

Voor de dijk van Hansweert zijn twee golfmeetlocaties ingericht. Op beide locaties wordt met een stappenbaak gemeten³, zie Figuur 5.1. Voor de locatie HAWI (liggend op een diepte van tussen de 5 en 10 m) worden golfhoogten van boven de 4 meter gemeten, zie overschrijdingscurve in rapportage Validatie de Haan paragraaf 2.1.2. Voor deze locatie zullen meetgegevens beter bekeken worden.

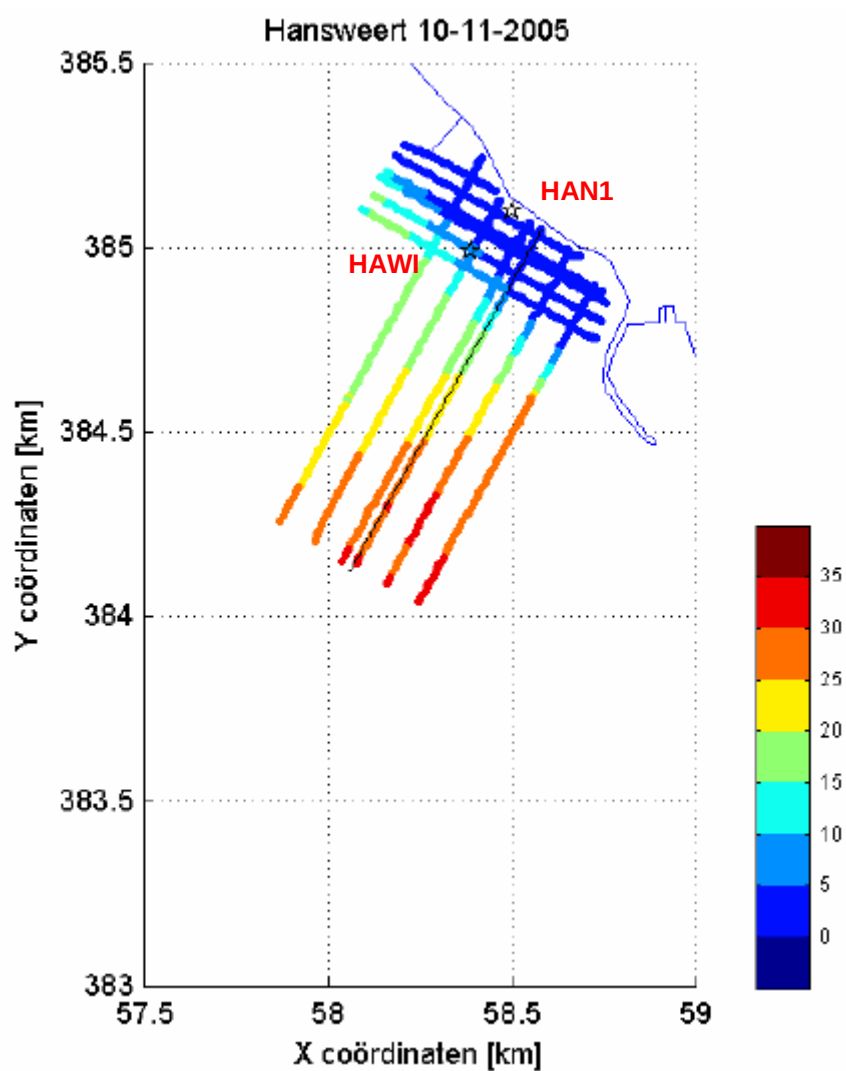
De golfmetingen van Hansweert (HAWI) zijn via het meetnet van RWS, Directie Zeeland (www.hmcz.nl) verkregen en lopen van 21/8/1998 tot 30/4/2007.

In Figuur 5.2 is de tijdreeks geplot van de golfhoogte voor de gehele meetperiode. In deze plot zijn de meetwaarden boven de 2.5 m weergegeven met een rode punt. Uit de figuur is direct te zien dat golfhoogten boven de 2.5 meter uitschieters zijn die niet in de meetreeks horen.

Bij het opzoeken van de tijdstippen van de uitschieters (Tabel 5.1) blijkt dat deze zich alleen voordoen in de jaren '99 en '00. Bij het doorzoeken van het bronbestand “HAWI_GHr2.dat” blijkt dat op deze tijdstippen de uitschieters geïsoleerde waarden zijn, zie Tabel 2. Het blijkt dat dit wordt veroorzaakt doordat de kwaliteit van de meetreeks niet voldoende is, zie kolom (AV) waarin het aantal vrijheidsgraden gegeven is⁴.

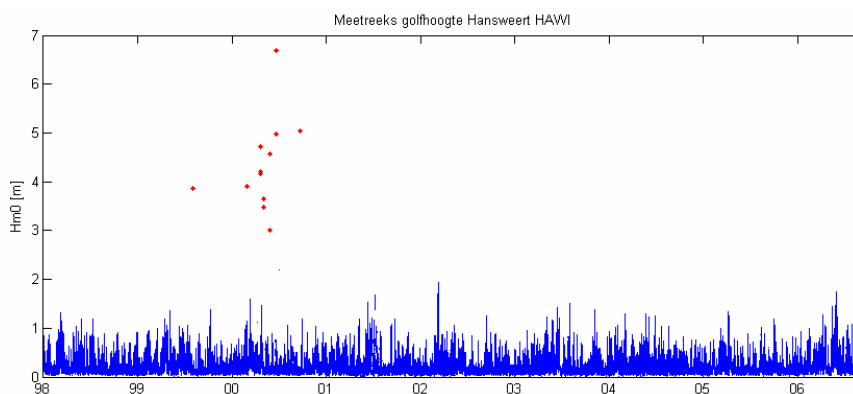
³ Boomgaard, M. Rapportage veldmetingen Westerschelde januari 2003 t/m mei 2006, Definitief Rapport, Svašek Hydraulics, 12/2006.

⁴ In het ideale geval zou de waarde van de vrijheidsgraden 24 moeten zijn. De 8 vrijheidsgraden zijn in ieder geval onbetrouwbaar (uit korte uitleg van Herman Peters, RIKZ)



Figuur 5.1 Ligging meetpalen Hansweert uit Appendix 7.1.3 rapportage "Veldmetingen Westerschelde januari 2003 t/m mei 2006"⁵,

⁵ Boomgaard, M. Rapportage veldmetingen Westerschelde januari 2003 t/m mei 2006, Definitief Rapport, Svašek Hydraulics, 12/2006.



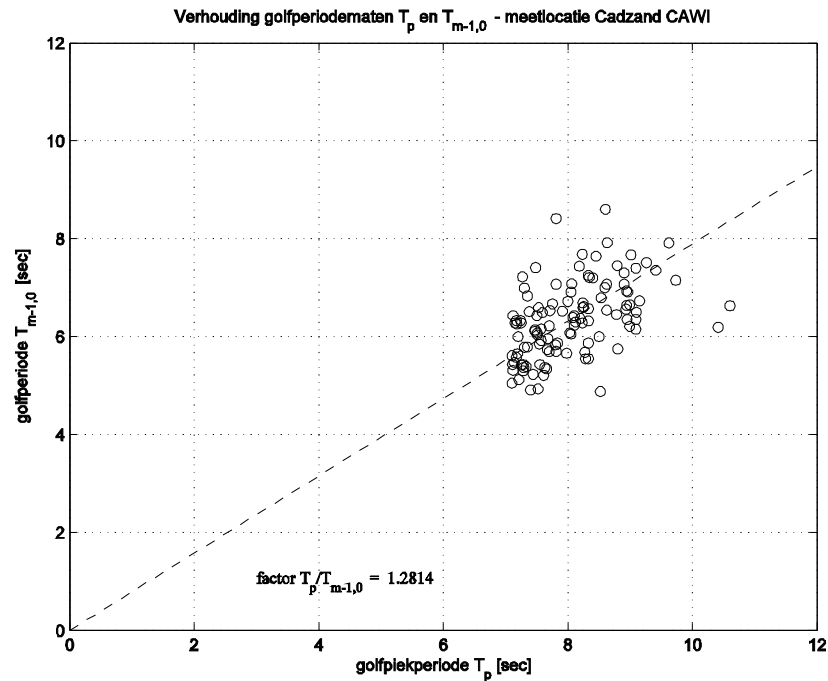
Figuur 5.2, Meetreeks Hm0 Hansweert

De rode punten in de meetreeks bevinden zich op de volgende tijdstippen:

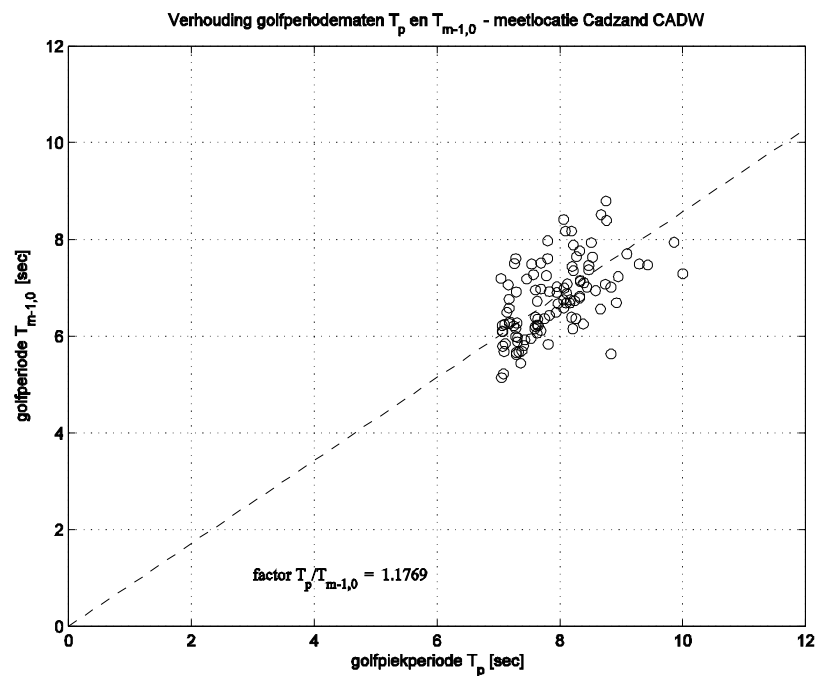
Tijdstip	Hm0
23/03/2000 12:00	387
15/10/2000 23:00	391
07/12/2000 19:00	421
08/12/2000 06:00	472
10/12/2000 08:00	416
21/12/2000 16:30	364
21/12/2000 20:00	347
13/01/2001 10:00	300
14/01/2001 01:30	456
06/02/2001 21:30	669
07/02/2001 06:30	498
10/05/2001 12:30	504

Tabel 5.1, tijdstippen rode punten

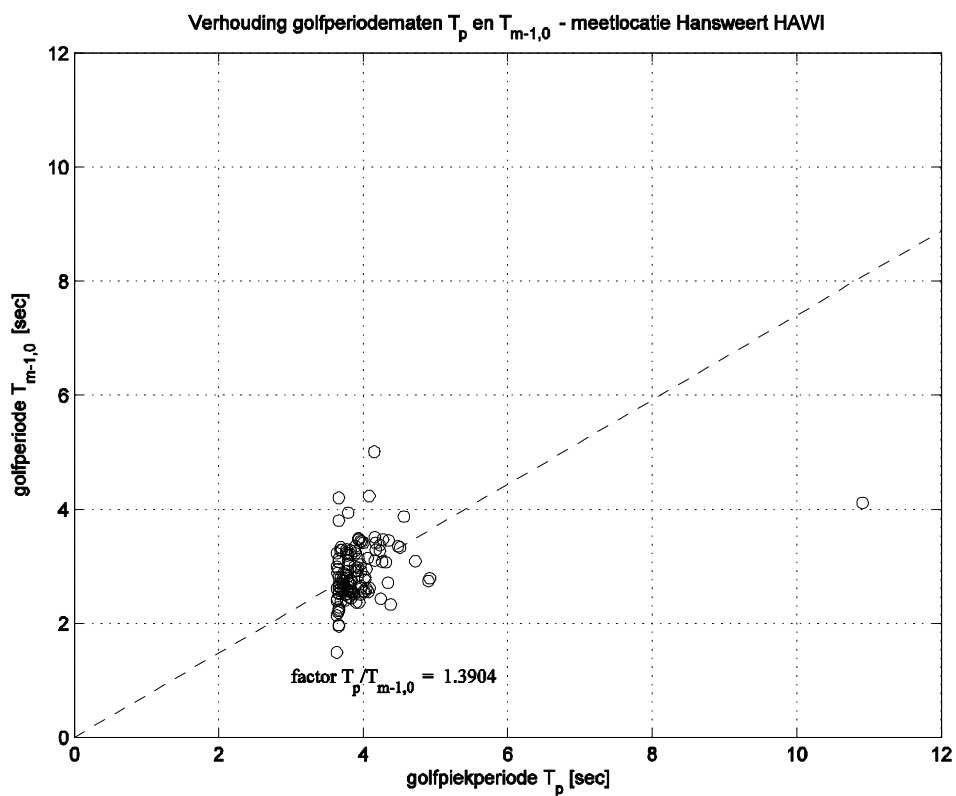
D Verhouding golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ ter plaatse van meetlocaties



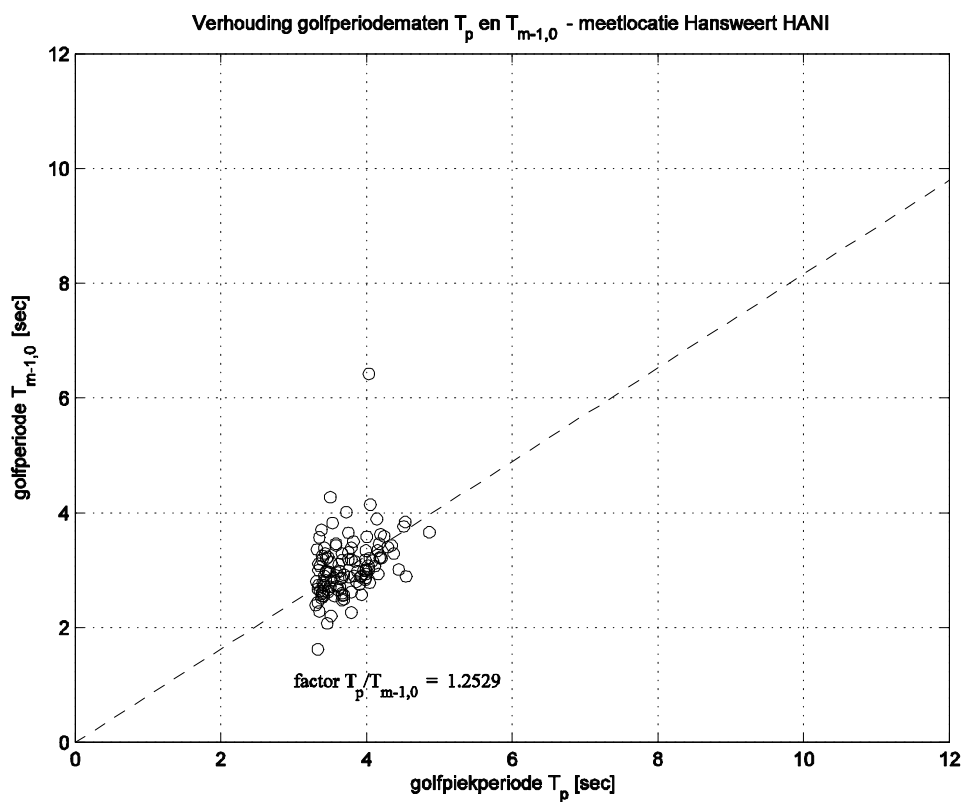
Figuur D.1 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Cadzand CAWI.



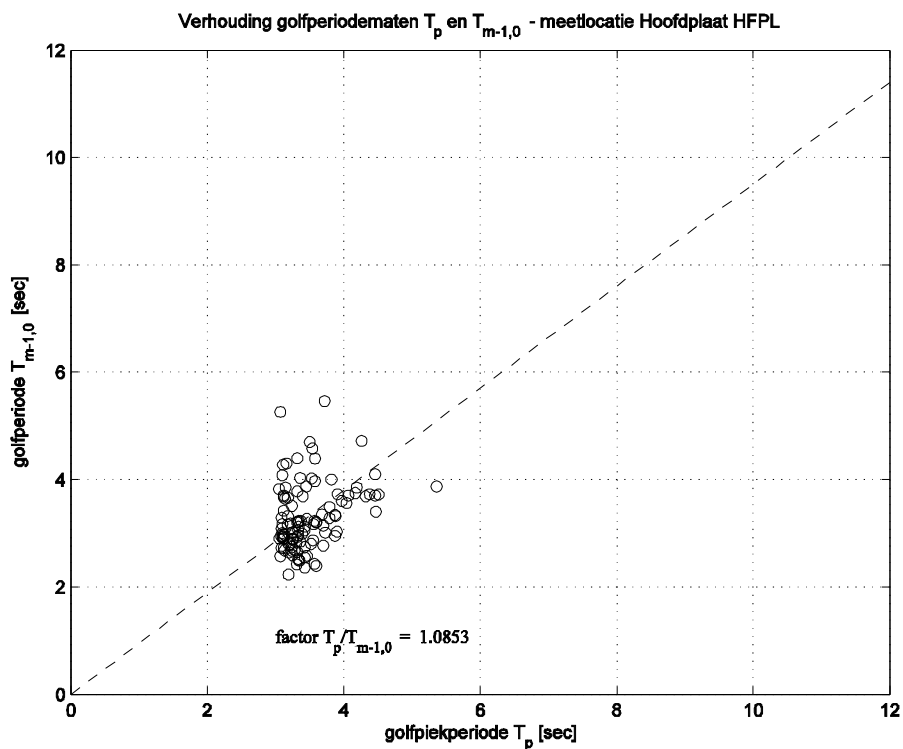
Figuur D.2 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Cadzand CADW.



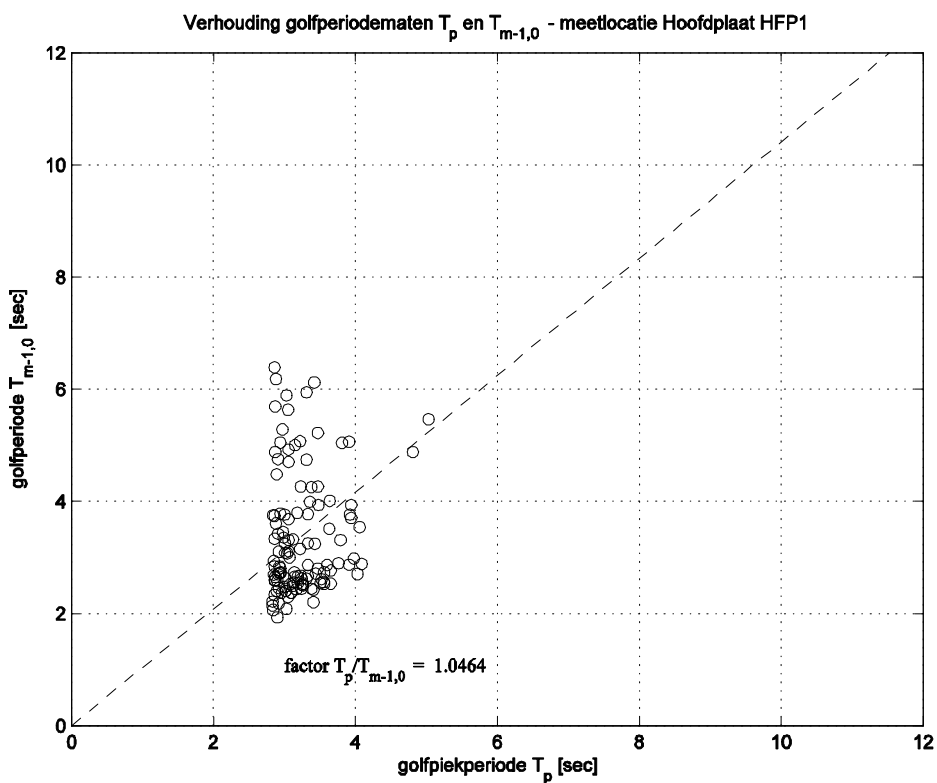
Figuur D.3 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Hansweert HAWI.



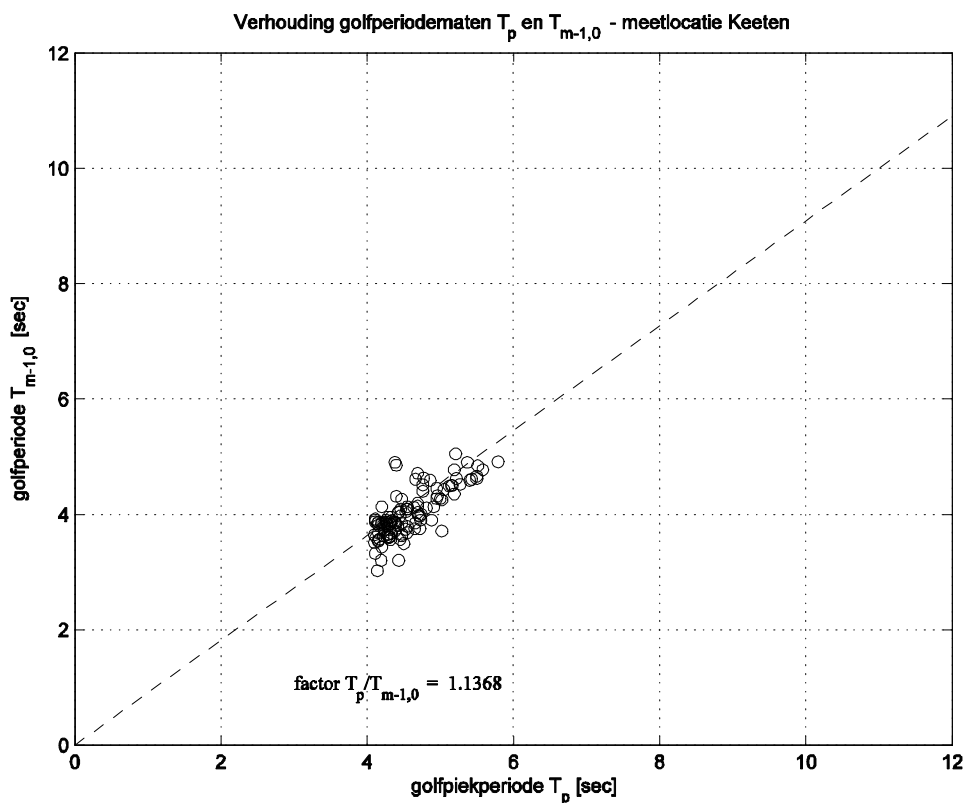
Figuur D.4 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Hansweert HANI.



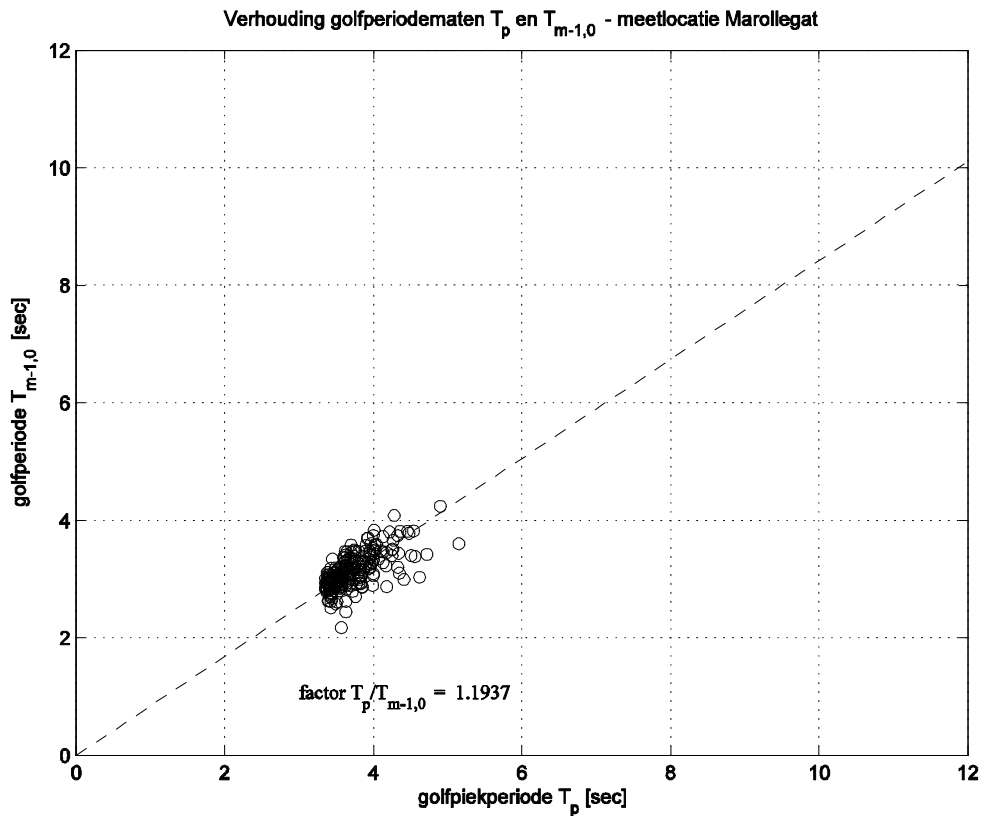
Figuur D.5 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Hoofdplaat HFPL.



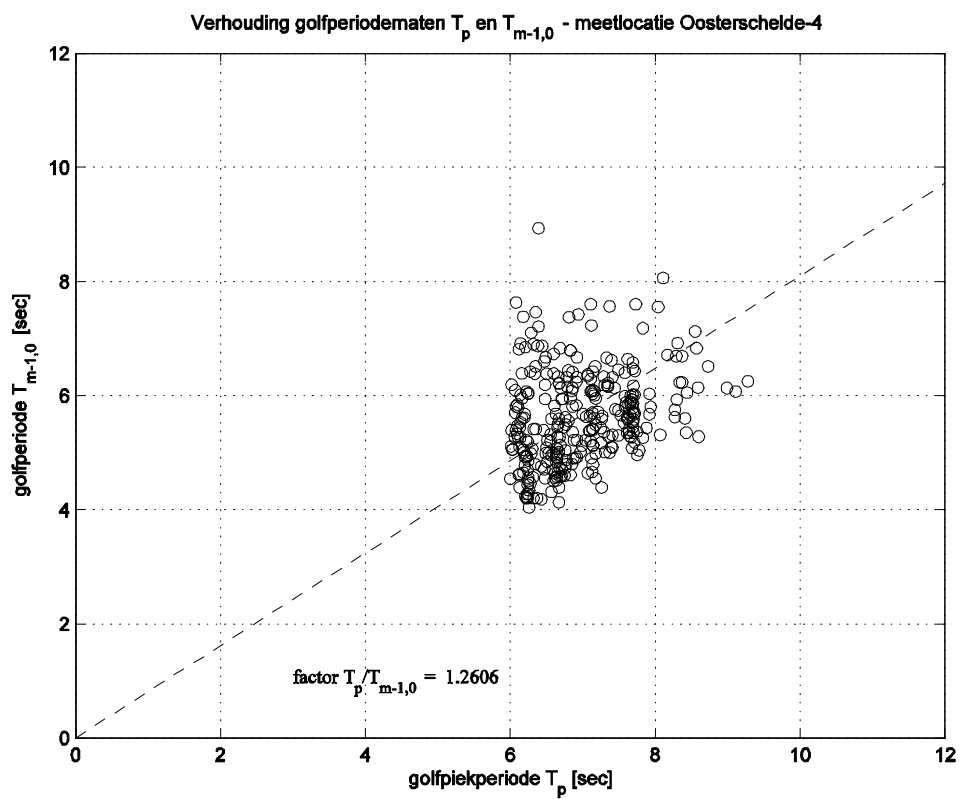
Figuur D.6 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Hoofdplaat HFP1.



Figuur D.7 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Keeten.



Figuur D.8 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Marollegat.



Figuur D.9 De verhouding tussen de golfperiodematen T_p en $T_{m-1,0}$ afgeleid uit gemeten golfspectra ter plaatse van de meetlocatie Oosterschelde.