



Golfrandvoorwaarden langs de Nederlandse kust op relatief diep water

Rapport RIKZ - 95.024

Auteurs : J.G. de Ronde
J.G.A. van Marle
A.P. Roskam
J.H. Andorka Gal

December 1995

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
1. Inleiding	3
2. Het fenomeen golven	7
3. Aanpak van het onderzoek	11
3.1 De methode Bruinsma	11
3.2 De huidige aanpak	12
4. Golfmetingen, golfbestanden en bewerkingen	15
4.1 Inleiding en doel	15
4.2 Golfmetingen	15
4.3 Keuze meetperiode, meetstations en parameters	16
4.4 Inventarisatie golfgegevens	17
4.5 Bewerking golfgegevens	19
4.6 Aanvullende gegevens	20
4.7 Aanvullingen van golfgegevens	21
4.8 Klimaatstudie NESS	25
5. Selectie van maxima van de golfhoogte	27
5.1 Inleiding	27
5.2 Selectieprocedures	27
5.3 Bepaling van de maxima van stormen	28
5.4 Aanvullingen en correcties op de maxima	29
5.5 NESS-maxima	31
6. Keuze statistische extreme-waardenverdeling	33
6.1 Inleiding	33
6.2 GPV-verdeling	33
6.3 Weibull-verdeling	36
7. H_{m_0}-max	39
7.1 Inleiding	39
7.2 Doelstelling	39
7.3 Model	39
7.4 Resultaten	39
7.5 Conclusies	42
8. Resultaten	43
8.1 Inleiding	43
8.2 Statistiek uit metingen	45
8.3 Statistiek uit metingen + NESS	47
8.4 Klimaatcorrecties	50
8.5 Samenvatting resultaten	54
9. Extreme golfhoogten per richtingsector	63
9.1 Inleiding	63
9.2 Keuze richting en methode	63
9.3 Werkwijze	64
9.4 Resultaten	65
10. Golfperiodes bij extreme golfhoogten	67
10.1 Inleiding	67
10.2 Gemiddelde golfperiodes	67

10.3 Piekperioden	69
11. Conclusies en aanbevelingen	73
11.1 Conclusies	73
11.2 Aanbevelingen	74
Referenties	75

Samenvatting

Als de aanstaande nieuwe "Wet op de waterkeringen" van kracht wordt, moet om de vijf jaar een toetsing van de primaire waterkeringen op veiligheid plaatsvinden. Deze toetsing dient op uniforme wijze te gebeuren, zowel wat betreft de ontwerpregels alsook de toepassing van randvoorwaarden, waaronder de hydraulische randvoorwaarden. Hiertoe worden door de TAW (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen) leidraden opgesteld. De hydraulische randvoorwaarden worden in het project HYDRA (HYDraulische RAndvoorwaarden) onderzocht en berekend.

In de toekomst zal steeds meer probabilistisch ontworpen worden. Dit vereist een simultane statistiek van hydraulische parameters. Thans wordt echter nog de enkelvoudige statistiek van waterstanden (ontwerppeilen) met de daarbij behorende waarden voor golven toegepast. Voor waterstanden zijn deze beschikbaar ("De basispeilen langs de Nederlandse kust"), voor golven nog niet.

Het doel van dit rapport is om te komen tot een uniforme bepaling van de enkelvoudige statistiek van significante golfhoogten langs de Nederlandse kust op relatief diep water (ongeveer op de NAP -20m lijn).

Voor het verkrijgen van de golfrandvoorwaarde bij de waterkeringen zelf moet vervolgens nog een vertaalslag uitgevoerd worden van relatief diep water naar de kust met golfvoortplantingsmodellen, zoals HISWA.

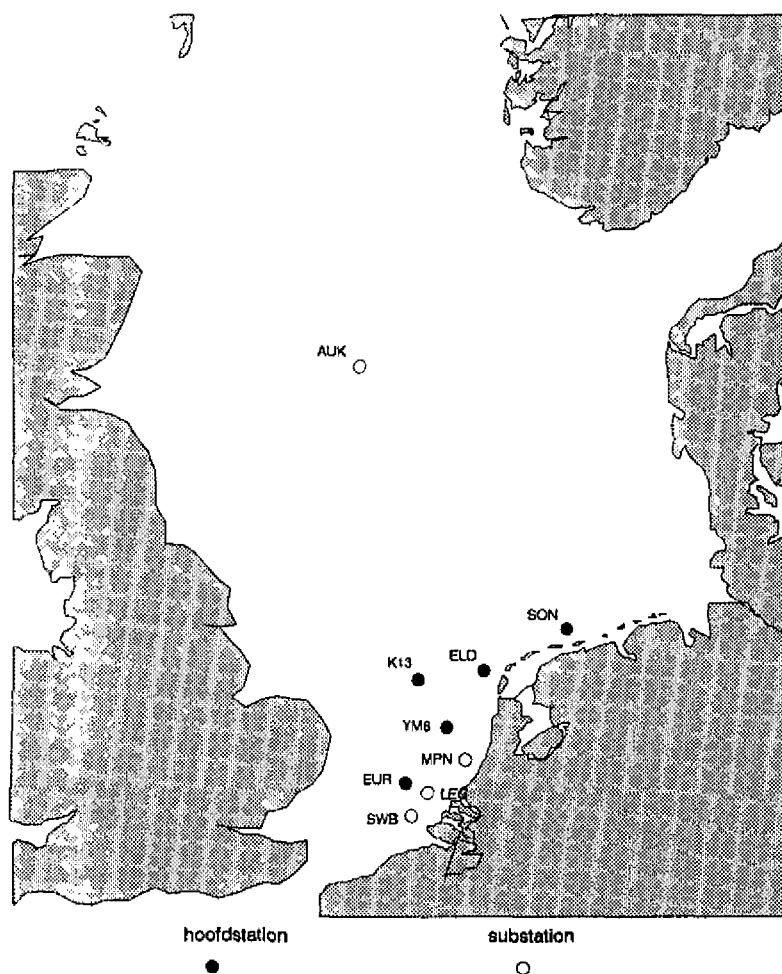
De enkelvoudige extreme-waardenstatistiek is vanwege het robuuste karakter uitgevoerd met de conditionele 2-parameter Weibull-verdeling en gefit met de maximum likelihood methode. De statistiek is toegepast op meetreeksen van ongeveer 15 jaar, ingewonnen op de lokaties SON, ELD, K13, YM6 en EUR (fig 1.1) en op dezelfde meetreeksen aangevuld met NESS-gegevens tot reeksen van ongeveer 30 jaar. Deze laatste zijn hindcastgegevens, uitgevoerd in het kader van de North European Storm Study.

Omdat 30 jaar nog steeds een korte periode is voor de benodigde extrapolatie naar overschrijdingskans van gemiddeld 10^{-4} per jaar, is ook onderzocht in hoeverre klimaatcorrecties toegepast kunnen en moeten worden. Dit is gedaan met waterstandsgegevens vanwege het redelijke verband tussen golven en waterstanden onder extreme omstandigheden en omdat hiervan betrouwbare reeksen van circa 110 jaar beschikbaar zijn.

Om meer inzicht te verkrijgen in de betrouwbaarheid van de extreme-waardenstatistiek zijn de verkregen resultaten vergeleken met die van fysisch-numerieke modellen. Hierbij is gebruik gemaakt van verkregen verbanden tussen de maximale significante golfhoogten en de waterdiepten. Bij de uiteindelijke keuze tussen de verschillende varianten binnen de bovengenoemde toegepaste statistische aanpak heeft fysisch inzicht op basis van kennis en ervaring een belangrijke rol gespeeld.

De belangrijkste resultaten zijn gepresenteerd in hoofdstuk 8. Deze zijn verkregen via toepassing van een voor het gehele gebied gelijke waarde van de krommingsparameter van de Weibull-verdeling op de meetreeksen uitgebreid met NESS gegevens. Vanwege de geringe verkregen betrouwbaarheid van de klimaatcorrecties zijn ze niet toegepast. Ze hebben in de bovengenoemde uiteindelijke keuze binnen de statistiek echter wel een rol gespeeld.

.....
figuur 1.1
Golfmeetstations voor de Nederlandse kust en in de Noordzee



1. Inleiding

Als straks de nieuwe "Wet op de waterkering" in werking zal treden moet er iedere vijf jaar een toetsing uitgevoerd worden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Deze toetsing dient op een uniforme wijze te geschieden. Hiertoe zijn en worden in opdracht van het Rijk door de TAW leidraden opgesteld voor de manier waarop de diverse primaire waterkeringen minimaal moeten worden gedimensioneerd. Om dit te kunnen uitvoeren zijn er hydraulische randvoorwaarden nodig. Volgens de nieuwe "Wet op de waterkering" moeten ook deze om de vijf jaar door het Rijk geverifieerd en zondig opnieuw vastgesteld worden.

In het project HYDRA (HYDraulische RAndvoorwaarden) worden de hydraulische randvoorwaarden onderzocht en berekend. Tevens houdt dit project zich bezig met de "vertaling" van de randvoorwaarden op relatief diep water naar de waterkering c.q. constructie. In dit rapport wordt alleen op de randvoorwaarden op relatief diep water ingegaan.

Waterstanden en wind zijn vrij uniform verdeeld langs de kust. Als in een beperkt aantal punten de statistiek bepaald is kan deze vrij simpel naar tussengelegen punten "vertaald" worden. Voor golven gaat dit helaas niet op. Op ondiep water kunnen golven op korte afstand behoorlijk verschillen. De lokale golven worden namelijk sterk bepaald door de lokale geometrie. Aangezien er geen meetgegevens beschikbaar zijn op al deze verschillende lokaties is het ondoenlijk om voor al deze lokaties golfstatistiek te bepalen. Over "voldoende" metingen beschikken we slechts op een beperkt aantal lokaties zoals platform Euro-O (EUR), Licht Eiland Goeree (LEG), Meetpost Noordwijk (MPN), IJmuiden-06 (YM6), Eierlandse Gat (ELD), Schiermonnikoog Noord (SON) en platform K13A (K13), zie figuur 1.1. Op deze, op relatief diep water gelegen, punten is het mogelijk om golfstatistiek te bepalen en zodoende een beschrijving te geven van de statistiek rond de NAP - 20m lijn.

De vertaling van deze statistiek naar de lokatie van de waterkering gebeurt vervolgens met behulp van golfvoortplantingsmodellen, zoals bijvoorbeeld HISWA.

In de toekomst zal voor het probabilistische ontwerp de volledige simultane statistiek van de gecombineerde parameters vereist zijn. Op dit moment is deze volledige simultane statistiek nog niet te leveren. Nu wordt nog gewerkt met de enkelvoudige statistiek van waterstanden (zoals basispeilen en ontwerppeilen) en de daarbij "behorende" waarden zoals golfhoogte, golfperiode, golfrichting, windsnelheid en windrichting.

Om tot simultane statistiek te komen is het eerst nodig om de enkelvoudige statistiek van de diverse parameters te hebben. Voor waterstanden (lit. 1, 2 en 3) en wind (lit. 4) zijn deze beschikbaar, voor golven echter nog niet.

Het doel van dit rapport is dan ook om op uniforme wijze de enkelvoudige statistiek van golven (golfhoogte) te bepalen op diep water (ongeveer op de NAP -20m lijn). Deze statistiek geldt voor golfhoogten onafhankelijk van de richting. In de huidige ontwerppraktijk (zie leidraad Benedenrivieren) wordt de onderverdeling naar (wind)richtingsector gehanteerd en komen in de ontwerpformules tevens golfperiodes voor.

Het tweede doel van dit rapport is dan ook om de golfhoogte statistiek onder te verdelen naar windrichtingsectoren en om golfperiodes te bepalen, die bij de met de golfhoogte statistiek bepaalde golfhoogten behoren.

De volgende fase binnen het project HYDRA zal bestaan uit de bepaling simultane statistiek van waterstanden, golfhoogten en golfperiodes voor alle windrichtingen bij elkaar en onderverdeeld naar richtingen.

In nauwe samenwerking met de TAW zal worden gewerkt aan de afleiding van een "simpele" set van simultane ontwerpwaarden voor waterstanden, golfhoogten en golfperiodes, onderverdeeld naar richtingen, waarmee op eenvoudige wijze waterkeringen gedimensioneerd kunnen worden.

Opzet van het onderzoek en van dit rapport

In 1979 is door Bruinsma (lit. 5) voor het eerst golfstatistiek afgeleid voor de Nederlandse kust. Dit was zogenaamde conditionele statistiek, dat wil in dit geval zeggen de statistiek van golven gegeven het feit (de conditie) van een extreme hoogwaterstand. De situatie met een hoge golfhoogte terwijl de waterstand niet zo hoog is wordt dan niet meegenomen. In de hier beschreven studie is de meer fundamentele aanpak gevolgd om eerst de enkelvoudige statistiek af te leiden (dit rapport) en vervolgens de simultane statistiek (volgende fase).

Ook bleek de door Bruinsma gehanteerde methode slecht bruikbaar voor de onderverdeling naar richtingen. Het onderzoek naar de mogelijkheden van de door Bruinsma gehanteerde methode staat beschreven in hoofdstuk 3. Daaraan voorafgaand wordt in hoofdstuk 2 eerst een algemene beschrijving gegeven van het fenomeen golven.

De aanpak van het onderzoek is uiteengezet in het tweede gedeelte van hoofdstuk 3. De gebruikte gegevens zijn op een rijtje gezet in hoofdstuk 4 en 5, waarna in hoofdstuk 6 de gehanteerde statistische extreme-waardenverdeling bepaald wordt.

De overschrijdingskansen waarvoor uitspraken gevraagd worden liggen erg ver weg van het kansengebied dat door metingen bestreken wordt. We beschikken bijvoorbeeld over slechts 15 jaar (1979-1993) meetgegevens van golven, terwijl de golfhoogte met een gemiddelde overschrijdingskans van 10^{-4} per jaar gevraagd wordt. Een dergelijke extrapolatie kan niet anders dan met een grote onnauwkeurigheid behept zijn. Getracht is dan ook om op een andere wijze de gevraagde golfstatistiek onder extreme stormvloed-situaties af te leiden voor de 20 m diepte lijn. Hiertoe is fysisch-numeriek modelonderzoek verricht voor zeer extreme omstandigheden om een "fysische" bovenmaat af te leiden voor de golven op de NAP -20m lijn. De uitkomsten hiervan staan in hoofdstuk 7.

De op diverse wijzen verkregen resultaten staan gegeven en samengevat in hoofdstuk 8. Ook de uiteindelijke keuze staat hierin beargumenteerd.

De onderverdeling naar de diverse richtingen staat vermeld in hoofdstuk 9, de bijbehorende golfperiodes in hoofdstuk 10, waarna hoofdstuk 11 afsluit met conclusies en aanbevelingen.

Het onderzoek is regelmatig gerapporteerd en besproken in de klankbordgroep HYDRA, bestaande uit :

J.H. Andorka Gal, W.T.J.N.P. Bakker, D.Dillingh, J. van de Graaff,
J.P.F.M. Janssen, H. Keijser, A.W. Kraak, J.G.A. van Marle, J.G. de Ronde,
A.P. Roskam, A. van Urk en C.F. de Valk.

Het in dit document gerapporteerde onderzoek is verricht bij de hieronder genoemde instituten :

Waterloopkundig Laboratorium
(statistisch onderzoek)
A.K. Otta, H.A.H. Petit, C.F. de Valk en T.J. Zitman

Technische Universiteit Delft
(onderzoek maximaal mogelijke golfhoogte Hs-max)
L.H. Holthuijsen, Y. Eldeberky, N. Booij en P.Ferier

KNMI (advisering t.a.v. Hs-max)
E. Bouws

NOAA USA (advisering t.a.v. Hs-max)
H.L. Tolman

Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee\RIKZ
(bewerking en validatie golfdata)
(statistisch onderzoek)
(coördinatie en eindverantwoording)
J.H. Andorka Gal, J. Hoekema, H. Keijser, J.G.A. van Marle, J.G. de Ronde
en A.P. Roskam)

Het eindrapport is opgesteld door J.H. Andorka Gal, J.G.A. van Marle, J.G. de Ronde en A.P. Roskam.

2. Het fenomeen golven

De golven die we op zee met het oog kunnen waarnemen worden opgewekt door de wind. Heel algemeen kan gesteld worden dat hoe hoger de windsnelheden, des te hoger de golven. In feite vindt er op het grensvlak van lucht en water overdracht van energie plaats van lucht naar water. Hoge golven bezitten dan ook veel energie.

Het is onder meer vanuit de scheepvaart een gezegde dat er om de ongeveer zeven golven weer een hoge golf aankomt. De golven zijn dan ook niet allemaal even hoog, maar variëren volgens een bepaalde verdeling (Rayleigh verdeling) van laag tot hoog. Om de golven qua hoogte te karakteriseren wordt meestal de gemiddelde golfhoogte van het 1/3 hoogste deel van de golven genomen, de zogenaamde significante golfhoogte (H_s), dikwijls kortweg de golfhoogte genoemd. Indien de golfhoogte via het golfenergiespectrum bepaald is, wordt ook wel de notatie H_{m_0} gebruikt. Daarnaast worden de golven gekarakteriseerd door een golfperiode (de gemiddelde periode van de golven T_m of, indien spectraal bepaald, T_{m02} , of door de periode van de golven met de meeste energie T_p), een golflengte (de gemiddelde golflengte, L_m , of een golflengte die overeenkomt met een meer maatgevende golf), een golfvoortplantingsnelheid (meestal een snelheid overeenkomend met die van een meer maatgevende golf) en een golfvoortplantingsrichting.

Golven hebben een variërende voortplantingsrichting. Hierbij is een hoofdrichting te onderscheiden met daar omheen een golfrichtingspreiding tot ongeveer 30 graden. Bij een meer variërende windrichting neemt de spreiding toe, bij een snelle verandering van de windrichting kunnen zelfs twee hoofdrichtingen optreden. Vanwege de variaties in golfhoogte, golfperiode, golflengte en golfvoortplantingsrichting spreken we over onregelmatige golven.

Niet alleen de windsnelheid is bepalend voor de golfhoogte, de golven moeten ook als het ware de gelegenheid hebben om te kunnen volgroeien. Daarvoor is het enerzijds nodig dat de tijd dat een bepaalde windsnelheid optreedt (duur) voldoende lang is en anderzijds dat de afstand waarover de wind over het water strijkt (strijklengte) voldoende lang is.

In het bovenstaande is uitgegaan van zogenaamd diep water. Hiervan is sprake als de waterdiepte groter is dan de helft van de golflengte. De waterdiepte heeft dan geen invloed op de golven. Wanneer de golven zich van diep naar ondiep water voortplanten wordt de invloed van de bodem wel belangrijk. De voortplantingsnelheid van de golven neemt af. De golven worden daardoor hoger en steiler. Dit fenomeen staat bekend als shoaling.

Als de golven schuin op de kust aankomen heeft de afname van de golfvoortplanting het effect dat de golfvoortplantingsrichting steeds meer loodrecht op de kust komt te staan, dit staat bekend als refractie. Door het bijbuigen van de golven treedt er een golfhoogte-verlagend effect op. Dit valt te verklaren doordat de "golfbreedte" (afstand tussen twee denkbeeldige punten op de golfkam loodrecht op de golfvoortplantingsrichting) ten gevolge van het bijbuigen toeneemt en daarmee de golfenergieflux per eenheid van "golfbreedte" afneemt.

Bij verdergaande afname van de waterdiepte worden de golfbewegingen aan de bodem (orbitaalsnelheden) zo groot dat energieafname door

bodemwrijving een rol gaat spelen. Dit wordt veroorzaakt door wrijvingsverliezen tussen waterbeweging en bodemoppervlak. De golfhoogte neemt daardoor af.

Indien de waterdiepte echter zeer snel afneemt door een steile bodemhelling, zoals meestal vlak onder de kust voorkomt (zandbanken), ontstaat er een instabiele situatie waardoor golven overslaan en breken (branding). De golfenergie wordt dan grotendeels omgezet in een lokale waterstandshoging (wave set-up) en een brandingsstroom (longshore current).

Uit het bovenstaande kan opgemaakt worden dat er langs de Nederlandse kust een verloop van de golfhoogte is zowel in de tijd alsook in de ruimte. Het verloop in de tijd wordt uiteraard voornamelijk veroorzaakt door het toe- en weer afnemen van de wind en door het veranderen van windrichting, vooral bij het overgaan van zeewind in landwind en omgekeerd. Ruimtelijk gezien wordt de hoogte van de golven die vanuit zee op de kust afkomen steeds kleiner door energiedissipatie, veroorzaakt door de bodemwrijving en het breken van de golven.

De sterke afname van de golfhoogten vindt nagenoeg geheel plaats in de kuststrook tussen de NAP -20m lijn en het land en is zeer sterk afhankelijk van de lokale bodemgeometrie. Het is daarom goed mogelijk om enerzijds de golfstatistiek van een lokatie op de NAP -20m representatief te stellen voor directe omgeving op NAP -20 m en anderzijds om te interpoleren tussen lokaties om randvoorwaarden op de NAP -20m lijn te verkrijgen voor tussenliggende kustgedeelten. Maar voor lokale randvoorwaarden aan de kust voor het dimensioneren van dijken en duinen is het noodzakelijk om een vertaalslag uit te voeren vanaf de NAP -20m lijn tot aan de kust (bijvoorbeeld met behulp van golfmodellen).

Omdat de hoogten van de golven die de kust bereiken zo sterk afhankelijk zijn van de lokale bodemgeometrie vanaf de NAP -20m lijn zullen onnauwkeurigheden in de randvoorwaarden voor NAP -20m lijn sterk gereduceerd in de lokale randvoorwaarden terug te vinden zijn. Deze onnauwkeurigheden zijn dan ook mogelijk minder kritisch dan de onnauwkeurigheden in de golfmodellen.

Voor het doel van dit onderzoek is het van belang om op voorhand reeds enig inzicht te hebben in het ruimtelijk verloop van de golfhoogten langs de kust op relatief diep water (NAP -20m lijn). Hiermee kan namelijk de samenhang in het golfklimaat tussen de verschillende golfmeetlokaties inzichtelijk gemaakt worden en verklaard worden waarom de golfhoogte bij de ene lokatie hoger is dan bij de andere lokatie.

Het golfklimaat (NAP -20m lijn) voor een bepaald kustgedeelte wordt sterk bepaald door de oriëntatie van de kust ter plaatse ten opzichte van de maatgevende windrichtingen, de (effectieve) strijklengten en het diepteverloop over het traject vanwaar de golven komen. Beschouwen we het windklimaat langs de Nederlandse kust dan blijkt dat de sector van zuidwest (over west) tot noord qua windsnelheden maatgevend is. In combinatie met de oriëntatie van de kust is er voor de Zeeuwse en Hollandse kust van de gehele sector een maatgevende bijdrage te verwachten in het golfklimaat. Voor de noordelijke Waddeneilanden is er echter alleen een maatgevende bijdrage te verwachten uit de sector west tot noord. Nemen we vervolgens de strijklengten in beschouwing dan kan opgemerkt worden dat door de ligging van Engeland bij extreme stormen uit zuidwest tot west de golfhoogten voor de Zeeuwse kust lager zijn dan voor de Hollandse kust.

Tenslotte neemt naarmate de golven hoger zijn, de invloed van de waterdiepte in het voortraject (tot aan de NAP -20m lijn) toe. Door bodemwrijving kunnen golven die een langer traject afgelegd hebben over een minder diepe zeebodem in hoogte meer gereduceerd zijn. Vooral bij extreme stormen uit noordelijke richtingen kunnen daardoor de golven in de noordelijke kustgedeelten hoger zijn dan de kustgedeelten in het zuidelijk deel van ons land.

3. Aanpak van het onderzoek

3.1 De methode Bruinsma

In 1979 en 1982 heeft Bruinsma (lit. 5 en 6) de waterstands-golfhoogte relatie ter plaatse van de NAP -20m lijn bepaald. Zijn aanpak, bekend als de methode Bruinsma, is sterk bepaald door de ontwerpregel dat de hoogte van de dijken en de sterkte van de duinen langs de Nederlandse kust zodanig moet zijn dat ze niet mogen bezwijken bij een waterstand met een bepaalde gemiddelde overschrijdingsfrequentie en de daarbij heersende omstandigheden. De waterstand is dus de maatgevende conditie! Bij de methode Bruinsma wordt er vervolgens vanuit gegaan dat de maatgevende hoogwaterstand veroorzaakt wordt door stormen uit noordwestelijke richtingen (sector 285° - 360°), waarbij deze stormen worden gekarakteriseerd door de windsnelheid die gedurende 9 aaneengesloten uren overschreden wordt. Bij stormen uit deze richtingen treden tevens de maatgevende golven op.

Verder gaat de methode Bruinsma ervan uit dat er bij extreme omstandigheden een goed verband bestaat tussen hoogwaterstanden en de golven op de NAP -20m lijn omdat beide veroorzaakt worden door de wind en omdat de tijdsduur om te volgroeien van beide in dezelfde orde van grootte ligt.

De door Bruinsma toegepaste methode is een combinatie van statistische technieken en empirische relaties.

De methode Bruinsma is onder te verdelen in een tweetal stappen. De eerste stap bestaat uit het verkrijgen van de conditionele kansverdeling (gegeven een hoge hoogwaterstand) van bijbehorende hoge windsnelheden. De tweede stap bestaat uit het bepalen van de golfhoogte verdelingen gegeven de hoogwaterstanden en de bijbehorende windsnelheden verkregen uit de eerste stap.

In de eerste stap wordt uitgegaan van het feit dat de hoogwaterstand samengesteld is uit een astronomisch deel en een meteorologisch deel (de door de wind veroorzaakte waterstandsverhoging of opzet). Daar de opzet veroorzaakt wordt door de wind kan ook de hoogwaterstand op statistische wijze als functie van de wind en het astronomisch getij beschreven worden. De methode Bruinsma bepaalt omgekeerd de kansverdeling van mogelijke windsnelheden die optreden bij een bepaalde hoogwaterstand. Voor de relatie tussen wind en opzet past de methode Bruinsma het model van Weenink toe, waarbij de opzet evenredig is aan de windsnelheid in het kwadraat.

Voor de tweede stap maakt de methode Bruinsma gebruik van de bekende empirische golfgroeiformule van Bretschneider. Voor de effectieve strijklengte wordt een range van 200 à 800 kilometer aangehouden. Daarnaast gaat de methode Bruinsma ervan uit dat behalve de, met Bretschneider berekende, windgolven er ook nog golven uit andere richtingen aanwezig kunnen zijn als restanten van eerdere windvelden, zogenaamde deining. Hiervoor gaat de methode Bruinsma uit van uniform verdeelde golfhoogten tussen 0 tot 3 m. De uiteindelijke golfhoogten worden bepaald door de wortel uit de som van de kwadraten van de golfhoogten van de windgolven en de deining.

3.2 De huidige aanpak

De huidige doelstelling is een meer probabilistische aanpak bij het ontwerpen van dijken en het bepalen van de sterkte van de duinen. Bij deze aanpak worden ook bijdragen van waterstanden en golven uit andere richtingen dan de smalle sector van de methode Bruinsma meegenomen. Om de huidige doelstelling te kunnen verwezenlijken is het noodzakelijk om te komen tot meerdimensionale kansdichtheidsverdelingen van waterstanden, golfhoogten, golfperioden en golfvoortplantingsrichtingen.

De aanpak van Bruinsma om tot een meerdimensionale kansverdeling te komen is *minder goed toepasbaar*. De methode gaat uit van een relatief smalle windrichtingsector waarbinnen de opzet en de golven veroorzaakt worden. Opzet en golven veroorzaakt door stormen met andere windrichtingen kunnen daardoor niet meegenomen worden, terwijl deze stormen in de probabilistische aanpak wel degelijk een bijdrage in het geheel leveren.

Er is daarom gezocht naar een methode waarin andere en variërende windrichtingen wel meegenomen kunnen worden: uit statistiek van metingen. Het nadeel van statistiek is dat de fysica van golven moeilijk meegenomen kan worden. Vooral fysische begrenzingen, zoals bijvoorbeeld een maximale significante golfhoogte bij een bepaalde waterdiepte (lit. 7), kunnen bij extrapolatie naar extreme omstandigheden tot onnauwkeurige resultaten leiden.

Hoewel gesproken wordt van diep water ter plaatse van de lokaties waar de golven gemeten zijn (circa NAP -20m) is dit niet geheel juist, aangezien de orbitaalbeweging van gemeten extreme golven tot de bodem reiken en de golven dus beïnvloed worden door de bodem. Van diep water is sprake indien het quotiënt van de waterdiepte en de golflengte (d/L) groter is dan $1/2$. Bij de hoogste golven die gemeten zijn ligt dit echter in de orde van grootte van $1/10$.

Om tot een meerdimensionale kansdichtheid onder extreme omstandigheden te komen is eerst de extreme-waardenstatistiek nodig van de afzonderlijke parameters. In het tweede deel van dit hoofdstuk wordt de aanpak van deze enkelvoudige statistiek beschreven, en dan alleen van de significante golfhoogte.

Voor de extreme-waardenstatistiek is gekozen voor de toepassing van de 2-parameter Weibull-verdeling, vanwege het robuuste karakter van deze verdeling. De motivatie voor deze keuze en de formulering van de Weibull-verdeling worden in hoofdstuk 6 behandeld.

De metingen op de in hoofdstuk 1 aangegeven lokaties, bestaan uit reeksen van 15 jaar (1979 t/m 1993). Toepassing hiervan voor extrapolatie naar overschrijdingsfrequenties van gemiddeld 10^{-4} keer per jaar leidt, gezien het relatief geringe aantal jaren, tot een vrij hoge mate van onbetrouwbaarheid. Daarom zijn de meetreeksen op kunstmatige wijze uitgebreid door gebruikmaking van hindcasts met golfmodellen. Dit is gedaan in het kader van NESS (North European Storm Study), met gebruikmaking van alle stormen over de jaren 1964 t/m 1989. Met behulp van de overlappende periode van 1979 t/m 1989 zijn systematische verschillen tussen NESS-golfhoogten en gemeten golfhoogten gekwantificeerd en zijn correcties berekend. Met deze resultaten zijn de NESS-golfhoogten gecorrigeerd voor systematische fouten en is een "meetreeks" van 30 jaar beschikbaar gekomen.

Ook 30 jaar is nog steeds een korte periode om betrouwbare statistiek uit af te leiden. Het is mogelijk dat deze 30 jaar klimatologisch gezien een rustige of juist geen rustige periode vormt. Er is daarom met behulp van opzeten gekeken hoe deze 30 jarige periode ligt ten opzichte van de periode van circa 110 jaar waarover waterstandsgegevens beschikbaar zijn. Er is dus mogelijk een klimaatcorrectie noodzakelijk. Dit wordt gedaan door gebruikmaking van het relatief goede verband dat er bestaat tussen opzet en significante golfhoogte. Hiervoor zijn van een aantal lokaties langs de Nederlandse kust meetreeksen van de waterstand beschikbaar van circa 110 jaar en meer in het noorden van circa 60 jaar. De lokaties, de meetreeksen en de selectiewijze daarvan staan beschreven in "De basispeilen langs de Nederlandse kust." (lit. 2).

Met behulp van deze waterstandsreeksen zijn "klimaatcorrecties" berekend en toegepast volgens het principe zoals weergegeven in bijlage 3.1. Dit is uitgevoerd zowel op de meetreeks van 15 jaar als op de meetreeks uitgebreid met de NESS-gegevens tot totaal 30 jaar.

Om meer inzicht te verkrijgen in de betrouwbaarheid van de extreme-waardenstatistiek bij overschrijdingsfrequenties van gemiddeld 10^{-4} per jaar worden zowel de waarden als de richtingen van de overschrijdingskrommen vergeleken met resultaten van fysisch-numerieke modelberekeningen. Hierbij is gebruik gemaakt van het verkregen lineaire verband tussen de significante golfhoogte en de waterdiepte.

De bovenstaande nieuwe aanpak is uitgevoerd zonder onderscheid aan te brengen in windrichtingen of golfvoortplantingsrichtingen, zogenaamd omnidirectioneel. Omdat richtingen voor de vertaalslag van diep water naar de kust zeker voor een lokatie als ELD ook van belang zijn, is als volgende stap in de aanpak ook onderscheid gemaakt naar windrichting. Hiervoor zijn windsectoren geselecteerd die karakteristiek gesteld zijn voor de in deze sectoren gemeten golfhoogten. Uiteindelijk is de sommatie van de afzonderlijke overschrijdingskrommen sluitend gemaakt met de omnidirectionele kromme.

4. Golfmetingen, golfbestanden en bewerkingen

4.1 Inleiding en doel

In dit onderdeel worden de golfmetingen geïnventariseerd en geselecteerd en worden van de bestanden met gevalideerde en aangevulde reeksen waarden van relevante golfparameters beschreven. Deze bestanden zijn ingericht met als hoofddoel een optimale schatting van extreme waarden mogelijk te maken.

Behalve aan het 'gemeten' golfklimaat, wordt in dit hoofdstuk ook aandacht besteed aan een 'hindcast' golfklimaat, namelijk het klimaat dat voor de gehele Noordzee is geschat binnen NESS. In deze North European Storm Study zijn op basis van gereconstrueerde windvelden met een golfvoortplantingsmodel golfgegevens berekend over een periode van 25 jaar.

Het doel van het onderdeel golfklimatologie is om uit alle bestaande golfmetingen een basisbestand op te bouwen van golfgegevens, dat geschikt is om golfstatistiek op te baseren. De eisen voor zo'n bestand zijn :

- de metingen dienen een zo lang mogelijke periode te beslaan (vele jaren)
- de metingen dienen zo compleet mogelijk te zijn (weinig uitval)
- de meet- en verwerkingsmethoden dienen uniform te zijn

Uit dit bestand worden via statistische procedures extremen geschat. Deze methoden richten zich meestal alleen op omstandigheden waarbij een zekere drempel voor de golfhoogte wordt overschreden.

De opgebouwde bestanden zijn echter ook bruikbaar voor golfklimatologie in bredere zin (duurstatistiek; normale conditie statistiek).

4.2 Golfmetingen

Al heel lang wordt getracht de staat van de zeeoppervlakte onder allerlei omstandigheden te beschrijven of te karakteriseren. De bekende Beaufort schaal voor de windkracht op zee kan ook beschouwd worden als een schaal voor de golfhoogte van het zeeoppervlak.

Het systematisch 'meten' van golfhoogten gebeurt in Nederland sinds 1926. Op lichtschepen voor de kust werd vanaf dat jaar de toestand van de zee beschreven met kencijfers (0-9) voor de hoogte/lengte van zeegang en deining en met de golfrichting, dit alles in sterke samenhang met het meten van windsnelheid en -richting. Vanaf 1949 zijn visuele schattingen gemaakt van golfhoogte, golfperiode en golfrichting.

Vanaf de jaren '50 werden golfmetingen verricht met behulp van registrerende apparatuur, eerst met de fameuze golfamplitudeschrijver van Wemelsfelder, die in situ op een meetpaal of vanaf een steiger registreerde. Kort daarna werden stappenbaken (TPD) en golfmeetboeien (Datawell) ontwikkeld, waarmee via radiografie registratie aan land kon plaatsvinden. Vanaf 1985 worden systematisch golfrichtingen gemeten met wavec-boeien.

In de zeventiger jaren werd een meetnet voor golfklimatologie in de Noordzee opgezet, bedoeld om zeer lange tijd systematisch te blijven meten om, naar analogie van de meteorologie, een golf'klimaat' te kunnen bepalen.

Tegelijk met de meetmethoden evolueerden ook de verwerkingsmethoden. Na de handmatige verwerking van bijvoorbeeld de 'wasrollen' van de golfamplitudeschrijver ontstond de registratie op ponsbanden, geschikt voor computermatige verwerking. Aanvankelijk was de computer nog zo schaars en duur dat slechts incidenteel golfponsbanden verwerkt konden worden, bijvoorbeeld alleen van uitzonderlijke stormen.

Met de komst van de computer ontstond naast de traditionele verwerking in het tijddomein (golfhoogte-, golfperiode verdelingen e.d.) ook de verwerking in het frequentiedomein en deed het spectrum zijn intrede. In de tweede helft van de jaren '70 werd routinematige verwerking van golfponsbanden volgens gestandaardiseerde programmatuur mogelijk. Dit, gevoegd bij het ontstaan van een destijds geavanceerd opslagsysteem (DTBEST), maakte de studie 'golfklimatologie' mogelijk. De komst van golfrichtingsgegevens maakte een herziening van de opslagmethode noodzakelijk. Deze is in 1989 doorgevoerd.

Vanaf 1976 zijn van de eerste meetstations met enige regelmaat golfgegevens beschikbaar in DTBEST, verwerkt volgens voorlopers van de huidige golf-verwerkingsystemen. Eind 1979 werden twee noordelijke stations in het meetnet opgenomen en eind 1982 werd het meetnet golfklimatologie voltooid met het voor de scheepvaartbegeleiding naar Rotterdamse havens gebouwde platform Euro-0. Omstreeks 1990 is het meetnet golfklimatologie gereorganiseerd. Het bestaat nu uit 6 meetstations (SON, ELD, K13, YM6, EUR en AUK). Het laatste station, in de noordelijke Noordzee, wordt in dit onderzoek niet gebruikt. Tenslotte worden nog golfgegevens verzameld bij twee sub-stations dicht onder de kust, namelijk LEG en MPN.

4.3 Keuze meetperiode, meetstations en parameters

Voor de golfklimatologie in het project HYDRA is in 1992 besloten om uit te gaan van de in DTBEST opgeslagen golfgegevens van de meetperiode 1979-1991 van 8 meetstations op 'diep' water voor de Nederlandse kust. Als begin werd 1979 gekozen omdat vanaf dat jaar bijna alle gekozen meetstations aanwezig waren en de systematische, continue verwerking goed op gang was gekomen en omdat de vanaf toen gebruikte verwerkingsprogrammatuur niet al te veel meer verschilde van de huidige. In een veel later stadium van dit project (zie hoofdstuk 5) zijn golfgegevens van de periode 1992-1993 toegevoegd. Deze worden in dit hoofdstuk nog buiten beschouwing gelaten!

Onderstaand een overzicht van de gekozen meetstations. Achtereenvolgens wordt de stationsomschrijving gegeven, de stationsafkorting die in het vervolg zal worden gebruikt, de begindatum van opslag van golfgegevens in DTBEST en de waterdiepte ter plaatse, in m tov NAP. Eerst worden de vijf hoofdstations gegeven, daarna de drie substations. De positie van de meetstations is weergegeven in figuur 1.1.

- Schiermonnikoog Noord	SON	24 nov 1979	19 m
- Eierland	ELD	13 sep 1979	26 m
- produktie platform K13A	K13	1 okt 1978	30 m
- IJmuiden-06 (munitie stortplaats)	YM6	20 jan 1976	21 m
- platform Euro-0	EUR	19 nov 1982	32 m
- meetpost Noordwijk	MPN	25 jan 1977	18 m
- Lichteiland Goeree	LEG	2 feb 1976	21 m
- Schouwenbank	SWB	12 nov 1978	25 m

Het bestand bevat golfhoogten, golfperiodes en golfrichtingen. Als parameters zijn gekozen :

- de spectrale schatter van de significante golfhoogte : Hm_0
- de spectrale schatter van de gemiddelde golfperiode : Tm_{02}
- de over het gehele spectrum gemiddelde golfrichting : Th_0

Naast golfgegevens worden ook wind- en waterstandsgegevens in het bestand opgenomen.

4.4 Inventarisatie golfgegevens

De beschikbare golfgegevens hebben in de onderzoeksperiode van 13 jaar een gemiddelde registratiedichtheid van ca. 75% en zijn afkomstig van 8 meetstations, 3 verschillende sensoren (stappenbaak, waverider en wavec) en zijn volgens 7 verschillende methoden verwerkt.

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de registratiedichtheid per meetjaar, voor elk meetstation en voor elke sensor.

De term registratiedichtheid wordt gebruikt voor de verhouding tussen het aantal werkelijk verkregen drie-uurlijkse registraties en het aantal dat zonder uitval in dezelfde periode verkregen zou zijn, uitgedrukt in een percentage.

In tabel 4.1 wordt tevens een overzicht gegeven van de gebruikte verwerkingsmethoden. Deze worden in die tabel aangeduid met een zeer summiere omschrijving. Een meer gedetailleerde beschrijving van deze methoden valt buiten het kader van deze nota. Deze wordt gegeven in de meer uitgebreide project rapportage, zie (lit. 8). In de overzichtstabel worden ze alleen gegeven als indicatie van één van de facetten, waarmee rekening moet worden gehouden bij het opbouwen van een uniform bestand.

De in DTBEST opgeslagen gegevens bestaan uit drie-uurlijks een reeks van :

- 172 parameters bij methode 1 en 2
- 128 parameters bij methode 3 en 4
- 50 parameters bij methode 5
- 148 parameters bij methode 6 en 7

Dit zijn bij de methoden 1 t/m 4 golfhoogte- en golfperiode parameters, golfhoogte en golfperiode verdelingen en het energiedichtheidspectrum (101 punten bij methode 1 en 2 en 51 punten bij 3 en 4).





Bij methode 5 bestaat de opslag uitsluitend uit het energiedichtheidspectrum en bij methode 6 en 7 uit hetzelfde spectrum, aangevuld met het richtingspectrum en het richtingspreidingspectrum.

De reeksen uit DTBEST zijn bij de conversie naar het nieuwe opslagsysteem DONAR alle getransformeerd naar type 5 of 7.

Naast de drie-uurlijkse opslag van uitgebreide gegevensreeksen worden de laatste jaren ook uurlijks beperkte reeksen parameters opgeslagen. Deze reeksen bestaan uit 5 parameters bij niet-richtingsverwerking en 8 bij richtingsverwerking. Dit gebeurt bij EUR, MPN en K13 vanaf 1985, bij YM6 en LEG vanaf 1987 en bij ELD en SON vanaf 1989.

Tabel 4.1
 Overzicht meetstations, meetsensoren,
 jaarlijkse registratiedichtheden en
 verwerkingsmethoden

sta- tion	sen sor	---- registratiedichtheid / verwerkingsmethode ----												reg di geheel	
		'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90		'91
SON	WR	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	83%	
SON	WA											7	7	7	86%
ELD	WR	1	1	1	1	1	1	1	1	2				58%	
ELD	WA											7	7	7	83%
K13	WR	1	1	1	1	1	3	3	3	3	4	4+5	4+5	5	83%
K13	WA							6	6	6	6	7	7	7	71%
YM6	WR	1	1	1	1	1	1	3	3	3	4	4+5	4+5	5	69%
YM6	WA											7	7	7	85%
MPN	WS	1	1	1	1	1	3	3	3	3	4	4+5	4+5	5	83%
MPN	WA							6	6	6	6	7	7	7	54%
LEG	WS	1	1	1	1	1	3	3	3	3	4	4+5	4+5	5	79%
EUR	WS														83%
EUR	WA					3	3	3	3	3	4	4+5	4+5	5	66%
SWB	WR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	71%

sensor	registr. dichtheid	verwerkingsmethode
WR : waverider	: geen reg.	1 : ponsbandverwerking ; GOLVEN20
WA : wavec	 : 1 - 50%	2 : Golfprocessor-verwerking
WS : stappenbaak (wave staff)	 : 51 - 75%	3 : CIC-verwerking ; MAREG-tapes
	 : 76 - 90%	4 : CIC-verwerking ; GLFPAR-128
	 : 91 - 100%	5 : CIC-verwerking ; GLFPAR-50
		6 : Wavec-verwerking ; stand alone
		7 : Wavec-verwerking-CIC ; GLFPAR

4.5 Bewerking golfgegevens

In het bestand DTBEST bleken voor de acht golfmeetstations over de periode 1979-1991 in totaal bijna 300.000 reeksen opgeslagen te zijn. Dit komt neer op ca. 100 jaar drie-uurlijkse registratie. Daaronder bevinden zich overlappende reeksen vanwege dubbele sensoren en/of dubbele verwerkingsmethoden.

Tijdens het inwinnen en verwerken van golfgegevens wordt de kwaliteit van de reeksen gecontroleerd aan de hand van de berekeningsuitkomsten. Zo'n kwaliteitscontrole is echter nooit waterdicht omdat strenge eisen, via automatisch controle, kunnen leiden tot het afkeuren van reeksen met een afwijkend karakter, waaronder vele interessante, kwalitatief wel goede reeksen, gemeten onder afwijkende omstandigheden.

Daarom is er een validatie uitgevoerd. In een arbeidsintensieve en vanwege het grote aantal reeksen zeer tijdrovende procedure is de kwaliteit van alle reeksen nogmaals onderzocht. De validatie is gebaseerd op eigenschappen van parameters of eigenschappen van verhoudingen tussen parameters.

Details worden gegeven in (lit. 8).

Reeksen met afwijkende waarden werden als verdacht gekarakteriseerd en nader onderzocht, zowel naar het verloop in de tijd als in de ruimte (naburige meetstations). Deze validatieslag leidde tot het afkeuren van bijna 4000 reeksen ofwel ruim 1%. Slechts een klein deel daarvan bestond uit duidelijke fouten, die indien niet afgekeurd, de verdere berekeningen merkbaar hadden kunnen beïnvloeden.

In de beschouwde meetperiode zijn enkele verschillende verwerkingsmethoden gebruikt. Daar de verschillen in die methoden van invloed kunnen zijn op de berekende waarden van de parameters, zijn deze methoden onderling vergeleken. Daarbij bleken de verschillen op parameterniveau heel klein, bij golfhoogten hooguit enkele centimeters en bij golfperioden minder dan 0,1 seconde, zie (lit. 9).

Teneinde de golfgegevens van twee verschillende sensoren bij één meetstation beide te kunnen gebruiken, moeten ook deze onderling worden vergeleken. Bij de stations K13 en YM6 was een periode simultane registratie aanwezig van een waverider- en een wavec-boei en bij EUR en MPN van een stappenbaak en een wavec-boei.

Tussen waverider en wavec bleek een klein systematisch verschil in golfhoogte aanwezig; de golfhoogten bij de wavec zijn 1 tot 2 procent hoger. Tussen stappenbaak en wavec zijn de verschillen groter en per meetstation afhankelijk van de invallende golfrichting. De plaats van de stappenbaak ten opzichte van de meetopstand beïnvloedt de golfhoogte merkbaar en bij vrij drijvende boeien is deze invloed afwezig.

De systematische verschillen in golfhoogten van stappenbaak en wavec-boei variëren bij EUR en MPN, afhankelijk van de golfrichting, van ongeveer -7% tot +7%. Bij MPN is de wavec gemiddeld over alle richtingen enkele procenten hoger dan de stappenbaak en bij EUR andersom.

Ook bij de golfperioden treden kleine systematische verschillen op. Deze zijn echter bij elk van de vier beschouwde golfmeetstations enigszins anders. De vergelijking van verwerkingsmethoden en golfmeetsensoren is beknopt beschreven in (lit. 8) en meer uitgebreid in (lit. 9).

De systematische verschillen in golfhoogte tussen wavec en stappenbaak zijn duidelijk niet verwaarloosbaar en er zal bij de verdere verwerking dan ook rekening mee dienen te worden gehouden. In dit stadium worden echter nog **geen** correcties aangebracht.

Andere systematische verschillen zijn veel kleiner maar kunnen soms toch ook van betekenis zijn. Daarom zijn gedurende de gehele verwerkingsfase herkomstcodes bijgehouden, waarin voor elke reeks is vastgelegd van welke sensor ze afkomstig is en volgens welke methode de waarden zijn berekend.

Daarnaast wordt voor elke parameter binnen de reeks een kwaliteitskenmerk bijgehouden, waarmee een indicatie van de meet- of schattingsnauwkeurigheid van de waarde voor die parameter wordt vastgelegd.

4.6 Aanvullende gegevens

Bij de statistiek voor de hydraulische randvoorwaarden spelen naast kenmerkende golfparameters ook wind- en waterstand een grote rol. De combinatie van grote golfhoogte met hoge waterstand of hoge waterstands-opzet zal vaak de maatgevende belasting voor een constructie vormen. De windrichting zal vaak fungeren als selectie criterium bij richtingsafhankelijke statistiek. Ook bij het aanvullen van de ontbrekende perioden in de golfbestanden zijn windgegevens onontbeerlijk.

Er zijn uurlijkse en drie-uurlijkse bestanden opgebouwd van de volgende aanvullende parameters :

- windsnelheid
- windrichting
- waterstand
- astronomische waterstand

Deze bestanden beslaan de gehele periode van golfopslag, namelijk 1979-1991. De gegevens zijn waar mogelijk afkomstig van hetzelfde meetstation als de golfgegevens en waar dit niet mogelijk is van een nabij meetstation. Tabel 4.2 geeft een overzicht van de gebruikte meetstations voor wind- en waterstand.

De reeksen waterstandsgegevens zijn over het algemeen van goede kwaliteit. Bij de meetstations met een vaste meetopstelling (K13, MPN, LEG en EUR) worden waterstanden ter plaatse gemeten. In de bestanden worden uiteraard deze gegevens gebruikt (behalve bij K13). Bij de stations waarbij met boeien wordt gemeten (SON, ELD, K13 en SWB) worden waterstanden van nabije meetstations gebruikt.

Bij MPN, EUR en LEG ontbreken in de reeksen gemeten waterstanden de eerste 4 tot 6 jaren. In plaats daarvan zijn geschatte waterstanden gebruikt, berekend uit het waterstandsverloop bij omliggende meetstations. Dit soort schattingen zijn, mits er voldoende stations in de (nabije) omgeving zijn, maar weinig minder nauwkeurig dan echt gemeten waterstanden.

De gemeten waterstanden bij K13 bleken te incompleet en te onnauwkeurig om te gebruiken. In plaats daarvan zijn schattingen gebruikt, gebaseerd op het astronomische getij bij K13 en de verwachte afwijking daarop. Deze laatste is geschat aan de hand van ditzelfde verschil (de 'rechte' opzet) bij Den Helder. Bij K13 is bij het astronomisch getij 70% van die rechte opzet bij Den Helder opgeteld. De gebruikte en in tabel 4.2 vermelde waterstandsreeksen zijn bij alle stations geheel compleet.

Het verzamelen van voldoende windgegevens bleek niet eenvoudig. Aanvankelijk waren er slechts van 2 meetstations (LEG en IJmuiden) over de gehele periode windreeksen aanwezig en van andere stations reeksen van enkele jaren tot 10 jaar. Later werden KNMI-reeksen van nog enkele stations verkregen. Na vrij veel complicaties (lit. 8), werden uiteindelijk gecompleteerde reeksen windsnelheden en -richtingen verkregen van zes meetstations, drie op zee (MPN, LEG en EUR) en drie aan de kust (Terschelling West, De Kooy en IJmuiden), welke gebruikt zijn bij de acht golfmeetstations.

Uit de analyse van de zes reeksen windgegevens, zoals beschreven in (lit. 8), blijkt dat er systematische verschillen tussen de stations bestaan. Zo is de over de gehele periode gemiddelde windsnelheid bij IJmuiden bijvoorbeeld ongeveer 20% hoger dan bij De Kooy. Ook zijn er systematische verschillen in windrichting bij de stations IJmuiden, MPN en EUR.

De aldus verzamelde windgegevens vormen zeker geen volledig gevalideerd bestand met gegarandeerde samenhang tussen de gebruikte stations. De windgegevens dienen dan ook met de nodige voorzichtigheid te worden gebruikt en slechts als aanvullend gegeven bij de golfreeksen en zeker niet om windstatistieken uit af te leiden.

In tabel 4.2 wordt een samenvatting gegeven van de gebruikte windmeetstations.

Tabel 4.2
Overzicht gebruikte wind- en waterstandsm Meetstations

golfmeetstation	waterstandsm Meetstation	windmeetstation
SON	Huibertgat	Terschelling West
ELD	Den Helder	De Kooy/Den Helder
K13	K13 + Den Helder*	De Kooy
YM6	IJmuiden Zee-/Buitenhaven	IJmuiden semafoor
EUR	Platform Euro-0	Platform Euro-0
MPN	MPN	MPN
LEG	LEG	LEG
SWB	meetpaal BG2	LEG

* : waterstand geschat uit astronomisch getij van K13 + 70% van de rechte opzet bij Den Helder

4.7 Aanvullingen van golfgegevens

Golfreeksen zijn incompleet. Door uitval van meetsensor, inwinsysteem, zend- en ontvangstapparatuur of verwerkingsysteem ontbreken zo nu en dan reeksen. Statistisch gezien is dit voor de meeste toepassingen geen bezwaar, tenminste als de uitval niet systematisch is.

Omdat niet uit te sluiten is dat de uitval wel enigszins systematisch van aard is (bijvoorbeeld meer uitval onder stormcondities) en omdat veel statistische procedures, zoals bijvoorbeeld stormselectie veel eenvoudiger zijn voor complete reeksen, is besloten om ontbrekende perioden bij de vijf hoofdstations aan te vullen met op enigerlei wijze geschatte waarden voor de belangrijkste golfparameters.

Het aanvullen wordt alleen gedaan voor betrekkelijk korte perioden. Het ontbreken van een lange aaneengesloten periode zal in het algemeen relatief weinig systematisch verhogende of verlagende invloed hebben op het klimaat over vele jaren, zodat aanvullen met veel minder nauwkeurige schattingen geen voordeel oplevert of zelfs nadelig wordt.

Als grens voor het wel of niet aanvullen is vrij arbitrair een periode van drie maanden gekozen. Dit leidt tot in totaal 6 perioden die niet worden aangevuld, namelijk :

SON	:	1 januari 1979	t/m	20 november 1979
ELD	:	1 januari 1979	t/m	10 september 1979
"	:	1 februari 1986	t/m	15 mei 1986
"	:	20 november 1986	t/m	25 oktober 1987
"	:	25 januari 1988	t/m	19 maart 1989
YM6	:	1 juli 1981	t/m	11 januari 1982

Bij meetstation EUR begint de registratie van golfgegevens pas eind 1982. Er ontbreekt dus vier jaar. Bij dit station wordt echter wel aangevuld omdat er een aangevulde reeks nodig is bij één van de zuidelijke stations en EUR het enige station in deze regio is, waarbij golfrichtingen zijn gemeten. Bovendien zijn er in de ontbrekende jaren metingen beschikbaar bij drie stations in de nabije omgeving (vooral LEG maar ook SWB en MPN), zodat verwacht mag worden dat goede schattingen voor EUR kunnen worden berekend.

De eerste stap naar het completeren van de golfreeksen bestond uit het samenvoegen van de reeksen van verschillende sensoren bij eenzelfde meetstation. Als op hetzelfde tijdstip reeksen van twee sensoren aanwezig waren, kregen in de periode t/m 1988 de reeksen van waverider/stappenbaak voorkeur boven die van de wavec en vanaf 1989 kregen de wavec-reeksen de hoogste prioriteit. De herkomst van de reeks is daarbij vastgelegd in een code getal zodat deze bij latere toepassingen gereconstrueerd kan worden.

Vervolgens werden de golfrichtingsgegevens aangevuld. Omdat het meten van richtingen van golven bij de eerste stations pas in 1985 begon, zijn er in de reeksen slechts 20-40% van de golfrichtingen aanwezig.

De wel aanwezige golfrichtingsgegevens zijn gebruikt om relaties tussen wind- en golfrichting te berekenen, afhankelijk van de windsnelheid. Figuur 4.1 geeft een voorbeeld van zo'n relatie.

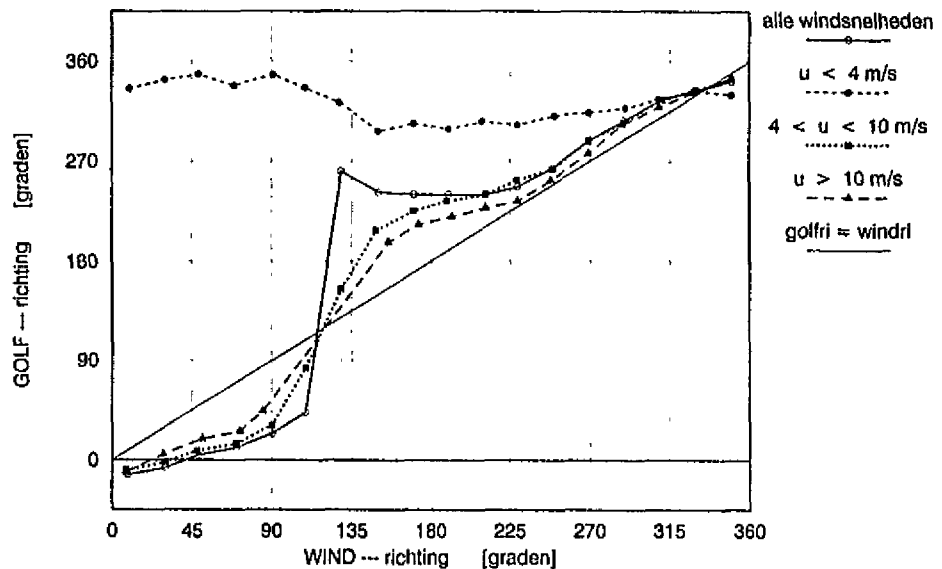
De figuur toont de gemiddelde golfrichting bij een gegeven windrichting, voor verschillende windsnelheidsklassen. Bij lage windsnelheden is de golfrichting vrijwel altijd noordelijk (deining), maar bij hoge windsnelheid zijn de verschillen tussen wind- en golfrichting niet al te groot.

Op basis van deze relaties en de gemeten windrichting en -snelheid zijn voor alle ontbrekende tijdstippen waarden voor de golfrichting geschat. Hierbij is bovendien steeds de schattingsnauwkeurigheid bepaald en weergegeven in een code getal.

De nauwkeurigheid van de geschatte golfrichtingen bedraagt onder optimale omstandigheden (hoge windsnelheid, windrichting niet landafwaarts) 5° tot 10° (meetnauwkeurigheid \approx 5°), maar kan onder ongunstige condities 50° of meer bedragen.

Bij het schatten van de golfrichting op basis van de windrichting is niet de gemeten wind op het tijdstip van de golfmeting gebruikt, maar een

figuur 4.1
 Relatie tussen wind- en golfrichting, afhankelijk van de windsnelheid
 Meetstation YM6



gewogen gemiddelde windrichting en -snelheid over enkele (3 tot 9) voorafgaande uren. Daarmee werd een betere overeenstemming bereikt met de golfrichting, die immers ook afhankelijk van het verloop van de wind en niet uitsluitend van de momentane wind.

Teneinde vervangende waarden te kunnen berekenen voor ontbrekende golfhogten en golfperioden, zijn eerst relaties geschat voor die parameters uit simultane registraties bij de verschillende meetstations. Deze relaties bleken uiteraard windafhankelijk. Uiteindelijk werden voor elke combinatie van meetstations verhoudingsgetallen berekend voor golfhogte en golfperiode voor 9 windrichtingsectoren en 4 windsnelheidklassen.

Voor een ontbrekende golfhogte/golfperiode werd nu vanuit elk ander meetstation, waarbij wel meetwaarden aanwezig waren, een vervangende waarde geschat. Van deze vervangende waarden werd een gewogen gemiddelde berekend, waarbij nabije stations een groter gewicht kregen dan verafgelegen en dit gemiddelde werd als aanvulling gebruikt.

Ook hier werd, net als bij de golfrichtingen, een schatting gemaakt van de nauwkeurigheid van de aanvullende waarden, welke weer werd vastgelegd in een code getal.

De schattingsnauwkeurigheid bleek te variëren van, onder gunstige omstandigheden (flinke windsnelheid en wel meetwaarden aanwezig bij omliggende meetstations), vrijwel gelijk aan de meetnauwkeurigheid, ongeveer 5%, tot ca. 25% onder ongunstige condities.

Een klein deel van de golfhogten kon niet op deze manier worden aangevuld, omdat er bij geen enkel station of slechts bij een verafgelegen station meetwaarden beschikbaar waren. In dat geval werd er ofwel geïnterpoleerd (bij korte onderbrekingen), ofwel aangevuld met waarden uit modelberekeningen, ofwel aangevuld met waarden die werden geschat uit windrichting en windsnelheid.

Het schatten van de aanvullende waarden voor ontbrekende golfhogten, golfperioden en golfrichtingen is uitgebreid beschreven in (lit. 8) en de bijbehorende memo's.

Bij K13, YM6 en EUR worden de overschrijdingsfrequenties van de golfhoogte H_{m_0} nauwelijks beïnvloed door het aanvullen. Dat wil zeggen dat bij deze stations de uitval niet systematisch was. Bij SON en vooral ELD zijn de overschrijdingskansen van H_{m_0} na het aanvullen in sommige frequentiegebieden significant hoger, zodat mag worden geconcludeerd dat bij deze stations wel sprake was van systematische uitval en wel meer uitval bij grotere golfhoogten. Dit wordt geïllustreerd in bijlage 4.1, waarin de overschrijdingsfrequenties worden gegeven van de golfhoogte H_{m_0} bij ELD, berekend uit wel en niet aangevulde reeksen.

Hiermee is voor de vijf hoofdstations (SON, ELD, K13, YM6 en EUR) een reeks ononderbroken golfgegevens verkregen over een periode van 13 jaar, die als uitgangspunt kan dienen voor de extreme-waardenstatistiek in HYDRA, maar ook voor andersoortige klimaatberekeningen, persistentieberekeningen, werkbaarheidsverwachtingen, selectie van bijzondere omstandigheden (bijvoorbeeld stormen) en dergelijke.

Voor de drie substations (MPN, LEG en SWB) zijn gevalideerde, maar niet aangevulde reeksen beschikbaar over de beschouwde periode.

Tabel 4.3 geeft per meetstation een overzicht van de verdeling van de meetreeksen over de inwinsensoren en van de globale schattingsnauwkeurigheid van de aangevulde golfhoogten en golfrichtingen.

Tabel 4.3

Verdeling van de meetreeksen over de inwinsensoren en over de meet- of schattingsnauwkeurigheid. Periode 1979-1991

golfmeetstation :	----- frequentie van voorkomen in % -----								
	SON	ELD	K13	YM6	EUR	MPN	LEG	SWB	
<i>verdeling over de inwinsensoren</i>									
- stappenbaak	-	-	-	-	41	71	77	-	
- waverider	59	36	67	53	-	-	-	43	
- wavec	18	17	22	18	21	14	-	-	
- geen registratie	23	47	11	29	38	15	23	57	
<i>verdeling schattingsnauwkeurigheden aangevulde golfhoogten</i>									
- meetwaarde ($\sigma \approx 5\%$)	77	53	89	71	62	85	77	43	
- aanvulling goed ($\sigma 5\%-15\%$)	2	14	2	18	25	-	-	-	
- aanvulling matig ($\sigma 15\%-25\%$)	4	9	7	6	12	-	-	-	
- aanvulling slecht ($\sigma 20\%-40\%$)	10	1	2	1	1	-	-	-	
- geen waarde aanwezig	7	23	0	4	0	15	23	57	
<i>verdeling schattingsnauwkeurigheden aangevulde golfrichtingen</i>									
- meetwaarde ($\sigma \approx 5^\circ$)	17	17	36	18	31	24	-	-	
- aanvulling goed ($\sigma 5^\circ-15^\circ$)	31	19	15	31	29	38	-	-	
- aanvulling matig ($\sigma 15^\circ-30^\circ$)	31	24	21	27	21	17	-	-	
- aanvulling slecht ($\sigma > 30^\circ$)	14	17	28	20	19	6	-	-	
- geen waarde aanwezig	7	23	0	4	0	15	-	-	

4.8 Klimaatstudie NESS

In 1986 besloot een consortium van oliemaatschappijen tot het uitvoeren van een studie naar het golfklimaat in de Noordzee. De beschikbare hoeveelheid metingen werd te klein bevonden voor een gebied met zulke grote variaties in golfklimaat, om betrouwbare randvoorwaarden af te leiden voor een veilig ontwerp van allerlei constructies op zee. Rijkswaterstaat besloot om ook deel te nemen aan deze studie, maar slechts voor de zuidelijke Noordzee.

Besloten werd met modellen over een periode van 25 jaar wind- en golfgegevens te genereren, uitgaande van gemeten meteorologische omstandigheden. Daarbij werd bijzondere aandacht besteed aan stormperiodes. Voor stormperiodes werden ook waterstandsopzet en dieptegemiddelde stroomsnelheden berekend.

Voor alle winterperiodes in de periode oktober 1964 t/m maart 1989 en voor de zomerperiodes van 1977 t/m 1979 en voor alle stormen die in tussenliggende zomers zijn opgetreden, zijn met behulp van het golfverwachtingsmodel HYPHA van het Duitse onderzoeksinstituut GKSS driemaal golfrichtingspectra geschat en uit die spectra is een basisset van 21 golfhoogte-, golfperiode- en golfrichtingparameters berekend. Dit is gedaan voor enkele duizenden gridpunten van een 30*30 km grid over de gehele Noordzee en enkele aangrenzende gedeeltes van de Atlantische Oceaan.

De dataset is gearchiveerd bij het British Meteorological Office en Rijkswaterstaat verkreeg uit dit archief de data van 130 punten in de zuidelijke Noordzee.

Van NESS-punten dicht bij een meetstation zijn de modeluitkomsten vergeleken met simultane meetwaarden. De schattingsnauwkeurigheid bleek ongeveer 15% te bedragen en bij grote golfhoogten bleek er gemiddeld sprake te zijn van enige systematische onderschatting.

Als vervolg op deze studie zijn later in het SNS-project (Southern North Sea) 132 stormen uit de NESS-periode opnieuw berekend, speciaal voor de zuidelijke Noordzee, met een fijner grid (10*10 km) en met een voor ondieper water afgeregeld model.

De resultaten bleken echter niet of nauwelijks beter dan die van NESS en de voorselectie van een beperkt aantal stormen maken deze resultaten slecht bruikbaar voor HYDRA.

Bij de bepaling van extreme waarden is de NESS-dataset nuttig vanwege de langere duur. De lengte van de meetperiode (1979-1991) kan met deze reeksen ongeveer verdubbeld worden (okt 1964 t/m 1991).

Daarbij moet wel rekening worden gehouden met systematische verschillen tussen met het model geschatte golfhoogten en gemeten golfhoogten en tevens met de lagere nauwkeurigheid van de modelwaarden, vergeleken met meetwaarden.

5. Selectie van maxima van de golfhoogte

5.1 Inleiding

De extreme-waardenstatistiek binnen HYDRA wordt gebaseerd op een 'peak over threshold (POT)'-methode. Dat wil zeggen dat alleen wordt gekeken naar gebeurtenissen, waarbij de golfhoogte een zekere drempelhoogte overschrijdt. Zo'n gebeurtenis ('event') komt bij een redelijk hoge drempel in het algemeen overeen met een stormperiode.

Uit de aangevulde bestanden van de periode 1979-1991 worden stormperiodes geselecteerd en van deze perioden wordt de maximale golfhoogte bepaald. Op de gevonden maxima worden nog enige correcties en aanvullingen verricht, waaronder het verlengen van de registratieperiode t/m 1993 en tenslotte ontstaat een bestand met per meetstation 250 tot 300 maxima van stormen waarmee, via het fitten van extreme-waardenverdelingen, golfhoogten met een extreem kleine kans van voorkomen kunnen worden geschat.

Met de aanduiding golfhoogte wordt in dit verband steeds de golfhoogte H_{m0} bedoeld.

5.2 Selectieprocedures

Door De Valk (lit. 10), is een voorselectie ontwikkeld, waarbij 'storm'periodes worden geselecteerd, als bij tenminste één van de vijf hoofdstations tenminste één van de drempels voor respectievelijk golfhoogte, windsnelheid of waterstandsopzet wordt overschreden. Zodoende worden alle perioden verkregen, waarbinnen zich een maximum van één of meer van de drie parameters bevindt.

Op deze voorselectie kan, afhankelijk van de uit te voeren berekeningen, een vervolgsselectie worden uitgevoerd, bijvoorbeeld reeksen waarin alleen bij één bepaald station de golfhoogtedrempel wordt overschreden. Op deze manier wordt dan een verzameling van alle maxima van golfhoogten bij een zeker meetstation verkregen.

Bij de statistische procedure voor het schatten van extreme waarden is onafhankelijkheid tussen opeenvolgende maxima vereist. Hieraan wordt voldaan als de tijdsduur tussen twee maxima voldoende groot is. Bij de selectie van de maximale golfhoogte is hiervoor, in navolging van het onderzoek naar de basispeilen, een tijdsduur van 2 dagen toegepast. Deze minimale tijdsduur tussen twee opeenvolgende maxima wordt wel de zichtduur genoemd en deze laatste selectie dus de zichtduurselectie.

Verder zal bij het schatten van extremen alleen naar winterperioden worden gekeken. Als extra eis bij de selectie moet dus worden gesteld dat de maxima moeten vallen binnen de periode 1 oktober t/m 31 maart.

Als drempel voor de golfhoogte is bij elk meetstation een zodanige waarde gekozen dat voor elk meetjaar gemiddeld 20 maxima werden geselecteerd. De drempelhoogten bij de meetstations varieerden van 2,5 m tot 3,1 m en het aantal maxima van 200 tot 260 bij de 5 meetstations.

5.3 Bepaling van de maxima van stormen

Het bepalen van de maximale golfhoogte van een stormperiode is meer dan alleen maar de hoogste waarde uit een reeks golfhoogten opzoeken. De gemeten golfhoogten hebben beperkte meetnauwkeurigheid. De standaardafwijking van gemeten golfhoogten H_{m0} is in hoofdzaak afhankelijk van golfhoogte en meetmethode en bedraagt bij onze methode (meetduur 20 minuten) en bij golfhoogten van omstreeks 6 m ongeveer 5% (lit. 11).

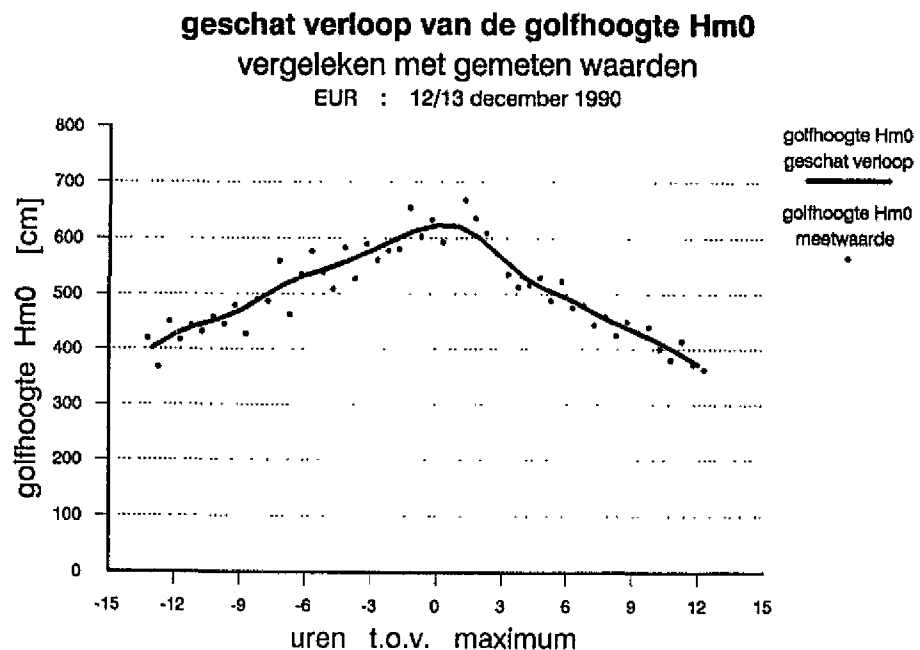
Als het meetinterval (d.i. de periode tussen twee opeenvolgende metingen) klein is ten opzichte van de duur van de storm, veroorzaakt deze meetnauwkeurigheid dat de hoogst gemeten waarde vrijwel altijd hoger is dan het werkelijke maximum van de storm. Dit wordt geïllustreerd in figuur 5.1, waarin enerzijds de uurlijkse meetwaarden van stappenbaak en wavec-boei tijdens de storm van 12 december 1990 bij EUR worden gegeven en anderzijds een zo nauwkeurig mogelijke schatting van het werkelijk verloop van die storm nabij het maximum.

Voor deze schatting is van alle beschikbare gegevens gebruikt gemaakt en is een speciale filterprocedure toegepast (lit. 11). Aangenomen wordt dat dit geschatte verloop het werkelijk verloop dicht benadert.

Uit de figuur blijkt dat er in de buurt van het geschatte werkelijke maximum een aantal meetwaarden zijn, waarvan er door toeval enkele hoger en enkele lager zijn dan het werkelijke verloop. De hoogste meetwaarde is ongeveer 0,5 m hoger dan het aangenomen werkelijke maximum. Het zal duidelijk zijn dat als er meer meetwaarden zijn in de tijdsduur dat de golfhoogte bij benadering maximaal is (langduriger maximum of korter meetinterval), de kans op een grotere overschatting toeneemt. De gemiddelde overschatting neemt dan ook toe.

figuur 5.1

Geschat verloop van de golfhoogte bij een storm en uurlijkse meetwaarden



Als echter het meetinterval groot is in relatie tot de stormduur dan is de kans op onderschatting groot, want dan zal het meettijdstip in het algemeen ver voor of na het maximum liggen.

Als in het voorbeeld van figuur 5.1 het meetinterval 8 uur zou zijn geweest, met als tijdstippen 4 uur voor en 4 uur na het geschatte maximum, dan zou de maximale golfhoogte met ongeveer 0,5 m zijn onderschat.

Dit is, samen met andere aspecten van het schatten van maxima, onderzocht aan de hand van het verloop van 5 stormen uit 1990 en 1991 bij 5 meetstations. In dat onderzoek is gekeken naar de meetnauwkeurigheid van de golfhoogte H_{m0} , naar systematische over- en onderschattingen bij het bepalen van het maximum van de golfhoogte H_{m0} tijdens een storm, naar de nauwkeurigheid van het geschatte maximum en naar de gemiddelde stormduur.

De uitkomsten zijn beschreven in (lit. 11). De voor dit onderdeel belangrijkste conclusies zijn dat bij onze meetmethode en in ons meetgebied de grootste gemeten golfhoogte bij uurlijkse metingen het werkelijke maximum ongeveer 6% overschat. Bij drie-uurlijkse metingen bedraagt die overschatting ca. 2%.

Bij de bepaling van de maxima tijdens storm moet met deze overschatting rekening worden gehouden, ofwel door te corrigeren met de genoemde percentages, ofwel door het maximum op een andere manier te schatten, bijvoorbeeld met filtertechnieken.

5.4 Aanvullingen en correcties op de maxima

Op de met de zichtduurselectie verkregen reeksen maxima van golfhoogten bij 5 meetstations zijn nog enkele aanvullingen en correcties verricht. Allereerst is besloten om tenminste voor golven en zo mogelijk ook voor wind en waterstanden de gegevensreeksen uit te breiden met de jaren 1992 en 1993 als aanvulling op de oorspronkelijk (in 1992) gekozen periode 1979 t/m 1991. De betreffende golfreeksen zijn uit het bestand gehaald en gecontroleerd. Vervolgens zijn voor de 5 hoofdstations de stormperiodes geselecteerd en gevalideerd en waar nodig aangevuld.

Omdat het niet mogelijk bleek om op korte termijn windgegevens te verzamelen voor de noordelijke meetstations, is geheel afgezien van het toevoegen van aanvullende gegevens (wind- en waterstand) over 1992-1993.

Dit houdt dus in dat de marginale statistiek voor golfhoogten gebaseerd wordt op in principe 15 jaar (1979-1993) meetgegevens en bijvoorbeeld de (wind)richtingsafhankelijke statistiek op 13 jaar (t/m 1991).

Vervolgens zijn de systematische verschillen tussen de inwindsensoren verwerkt in de maxima van de stormen. Besloten is om de maxima te standaardiseren op de sensor wavec. Dat betekent dat maximale golfhoogten, die afkomstig zijn uit waverider registraties worden verhoogd met 1,4% als correctie van de systematische onderschatting van de waverider ten opzichte van de wavec.

Bij EUR zijn de systematische verschillen in golfhoogte tussen wavec en stappenbaak afhankelijk van de golfrichting (lit. 8 en 9). Op de maximale golfhoogten bij EUR, die afgeleid zijn uit stappenbaakregistraties wordt dan ook een richtingsafhankelijke correctie toegepast. Bij westelijke golfrichtingen worden die golfhoogten met enkele procenten (0 tot 7%) verlaagd en bij oostelijke golfrichtingen iets verhoogd.

De maxima van de golfhoogten H_{m0} zijn steeds zodanig gecorrigeerd, alsof de inwindsensor een wavec-boei was!

Daarna is gecorrigeerd voor de systematische overschatting, die optreedt bij het beschouwen van de hoogste waarde van een drie-uurlijkse reeks golfhoogten als het maximum van een storm. Zoals eerder in dit hoofdstuk vermeld, levert dit een overschatting op van 2%.

Alle maximale golfhoogten H_{m_0} zijn daarom met dit percentage verlaagd.

Een laatste correctie is uitgevoerd op de hoogste 20 maxima van elk van de 5 hoofdstations. Van deze maxima is het verloop van de golfhoogte tijdens die stormen nog eens goed onderzocht, met gebruikmaking van alle beschikbare gegevens, zoals uurlijkse reeksen, reeksen van een tweede sensor, kwaliteitsaanduidingen, filtertechnieken en dergelijke. Met behulp daarvan is het werkelijke maximum geschat. Als er bijvoorbeeld uurlijkse waarden aanwezig zijn, dan geeft dit een veel nauwkeuriger schatting op van het werkelijke maximum dan een hoogste drie-uurlijkse waarde, gecorrigeerd met 2%.

Dit leverde bij ongeveer de helft van de onderzochte stormen een verbeterde schatting van het maximum op.

Tenslotte is de schattingsnauwkeurigheid van het maximum van de golfhoogte H_{m_0} en de bijbehorende golfrichting onderzocht. Met behulp van de kencijfers voor kwaliteit en herkomst uit de in het vorige hoofdstuk beschreven golfbestanden is voor elk maximum vastgesteld in welke mate de golfhoogten in de omgeving van het maximum uit werkelijk gemeten waarden en in hoeverre uit aangevulde waarden bestaan en aan de hand daarvan is een schatting gemaakt van de nauwkeurigheid van het maximum. Als de omgeving van het maximum geheel uit gemeten waarden bestaat, is deze nauwkeurigheid gesteld op de in (lit. 11) gevonden waarde, namelijk 5%. Naarmate er meer geschatte/aangevulde waarden bij de schatting van het maximum zijn gebruikt, wordt de schattingsnauwkeurigheid minder tot ca. 15%.

Bij de nader onderzochte hoogste maxima komen iets betere schattingsnauwkeurigheden voor, tot 2%.

Voor de golfrichtingen is iets soortgelijks gedaan, resulterend in schattingsnauwkeurigheden van 3° tot ca. 15°.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de aantallen maxima volgens de zichtduur-selectie bij elk van de hoofdstations. Tevens zijn de toegepaste drempelwaarden voor de golfhoogte gegeven en het hoogste maximum voor de golfhoogte H_{m_0} in de periode 1979-1993.

Tabel 5.1
Overzicht drempelhoogten en aantallen maxima, per meetstation

meetstation	drempel H_{m_0} m	aantallen maxima		netto meetduur		grootste H_{m_0} m
		'79-'91	'79-'93	'79-'91	'79-'93	
SON	2,5	248	287	12,2	14,2	7,70
ELD	2,9	197	241	10,0	12,0	7,70
K13	3,1	262	301	13,0	15,0	7,70
YM6	2,7	253	290	12,4	14,4	7,00
EUR	2,7	256	296	13,0	15,0	6,45

Ter illustratie worden in de bijlagen 5.1 van elk station de 50 maxima met de grootste golfhoogten gegeven. Deze bijlagen vermelden achtereenvolgens :

- volgnummer, datum, tijd en golfhoogte H_{m_0} van elk maximum
- de bijbehorend golfperiode en golfrichting
- de op hetzelfde tijdstip gemeten waterstand, 'rechte' waterstandsofzet windsnelheid en -richting
- de schattingsnauwkeurigheid van de maximale golfhoogte (in %) en van de bijbehorende golfrichting (in °)

Met deze tabellen kan een indruk worden verkregen van de stormen met de grootste golfhoogten uit de afgelopen jaren en van de toch vrij grote lokale verschillen. Bijvoorbeeld : de storm van 14/15 november 1993 is de storm met de grootste golfhoogte bij EUR, maar komt bij SON volgens bijlage 5.1 pas op de 45^e plaats!

5.5 NESS-maxima

Uit de NESS-dataset zijn gridpunten geselecteerd op posities dicht bij de 5 hoofdstations. Uit de modelreeksen met golfhoogten over 25 jaar van die gridpunten, zijn op dezelfde manier als bij de metingen (zichtduurselectie en winterperioden) maxima van stormperioden geselecteerd.

Daarbij is een wat hogere drempelwaarde voor de golfhoogte gekozen om tegemoet te komen aan de verwachte overschatting van de NESS-reeksen bij golfhoogten van ca. 3 meter. Desondanks is het gemiddeld aantal maxima per jaar groter dan bij de gemeten maxima, namelijk 22 tot 26 per jaar in plaats van 20 per jaar. Tabel 5.2 geeft de drempelhoogten, aantallen maxima en maximale golfhoogten. De maximale golfhoogten zijn steeds wat lager dan bij de gemeten golfhoogten.

De maxima uit de periode oktober 1964 t/m 1978 zullen, na correctie van eventuele systematische verschillen, aan de gemeten maxima worden toegevoegd als verlenging van de registratieperiode van de meetgegevens.

Tabel 5.2

Overzicht drempelhoogten en aantallen maxima, per NESS-gridpunt

NESS-gridpunt	nabij meetpunt	drempel H_{m_0} m	aantal maxima	grootste H_{m_0} m
50-77	SON	2,6	660	7,00
48-81	ELD	3,0	647	6,90
46-83	K13	3,2	541	7,10
49-83	YM6	2,8	580	6,70
49-86	EUR	2,8	544	6,20

6. Keuze statistische extreme-waardenverdeling

6.1 Inleiding

Ten behoeve van het onderzoek naar overschrijdingsfrequenties staan een groot aantal statistische extreme-waardenverdelingen ter beschikking, zoals de exponentiële verdeling (b.v. toegepast door de Deltacommissie t.b.v. de Basispeilen), de gegeneraliseerde Pareto Verdeling (GPV) en de daarop lijkende VVM-0 (toegepast voor de recente vaststelling van de Basispeilen (lit. 1) en voor de maatgevende Rijnafvoer), de Weibull-verdeling (vaak gebruikt voor extreme windsnelheden), de Gumbel-verdeling en de gegeneraliseerde Extreme-waardenverdeling (GEV). De laatste twee verdelingen worden toegepast op jaarmaxima.

6.2 GPV-verdeling

Het statistisch onderzoek naar de overschrijdingsfrequentie van extreme golfhoogten (H_x) heeft zich in eerste instantie gericht op de GPV-verdeling (lit. 12) in analogie met het basispeilenonderzoek en het onderzoek naar de maatgevende afvoer van de Rijn. Bij deze methode worden de waarden boven een zekere drempelwaarde zo goed mogelijk "gefit" aan een GPV-verdeling.

Formule GPV:

$$P[u > a + \omega \mid u > \omega] = 1 - F(a) = (1 + \gamma a / \sigma)^{-1/\gamma}$$

waarbij :

- $P[u > a + \omega \mid u > \omega]$ de kans is dat de waarde van u (bijvoorbeeld de golfhoogte) groter is dan $a + \omega$ (bijvoorbeeld 6 m) gegeven dat u boven de drempel ω ligt.
- γ en σ de parameters van de verdeling zijn

De twee parameters van de verdeling γ en σ kunnen worden geschat met de maximum likelihood methode. De parameter γ bepaalt de kromming van de functie. In het geval $\gamma = 0$ is de functie op logaritmisch papier een rechte lijn. Voor negatieve waarden van γ heeft de functie op logaritmisch papier een kromming naar beneden (indien gepresenteerd zoals in figuur 6.1). De functie heeft dan een maximum waarde voor zeer kleine kansen waar deze naar toe buigt.

Toepassing van de GPV-verdeling op een groot aantal golf-, wind- en opzetdata met reekslengten van 10 tot 50 jaar gaf niet altijd bevredigende resultaten (op het oog sluiten de gevonden verdelingen niet altijd even goed aan bij de geplotte meetwaarden). Dit was aanleiding voor verder onderzoek aan de GPV-verdeling en om te kijken naar andere verdelingen.

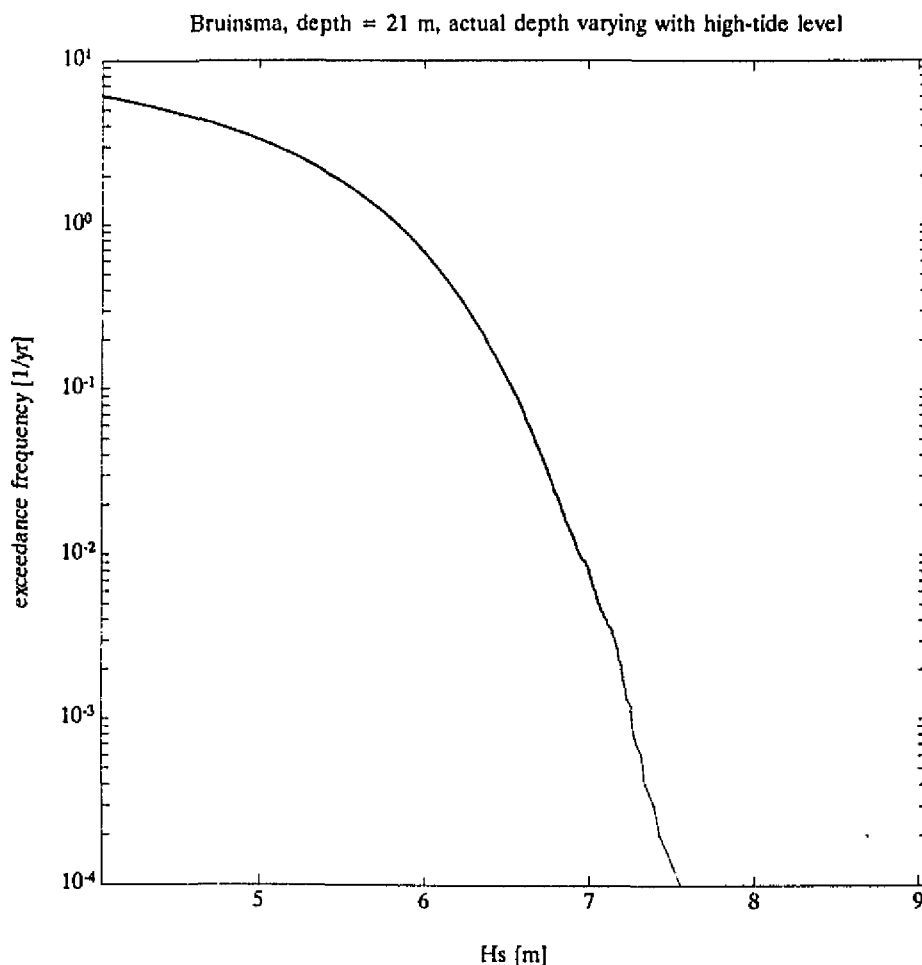
Met behulp van Monte Carlo technieken zijn een groot aantal reeksen met golfhoogten gegenereerd met lengten van respectievelijk 10, 25 en 100 jaar (lit. 13). Om deze reeksen te genereren is gebruik gemaakt van de methoden gebruikt door Bruinsma (zie hoofdstuk 3). Dit ging als volgt:

- Allereerst is uitgaande van de waterstandstatistiek van Hoek van Holland een zeer grote reeks met waterstanden c.q opzetten gegenereerd, overeenkomend met een periode van 10.000 jaar.
- Vervolgens zijn met deze waterstanden windsnelheden volgens de methode Bruinsma gegenereerd.
- Deze zijn weer volgens de methode Bruinsma omgezet in golfhoogten (met o.a. de golfgroeicurve van Bretschneider)

De aldus verkregen 10.000 jaar golfdata staan geplott in figuur 6.1. De plot vertoont een sterke kromming rond de 6 m en loopt daarna geleidelijk nog verder omhoog. De golfhoogte limiterende werking van de beperkte waterdiepte is duidelijk te herkennen. Dit leidt echter niet tot een bepaald maximum (de kromme blijft stijgen). In de realiteit is dit gedrag waarschijnlijk, omdat bij steeds kleinere kansen nog steeds grotere waterdiepten behoren met grotere golfhoogten.

Alhoewel er een groot aantal pragmatische aannamen ten grondslag liggen aan de verkregen golfdata ziet de verdeling ervan er zeer aannemelijk uit en is er een goede dataset verkregen voor nader onderzoek naar de GPV- (en andere) verdelingen.

.....
figuur 6.1
 Overschrijdingskromme van 10.000 jaar gesimuleerde golfdata (lit. 13)

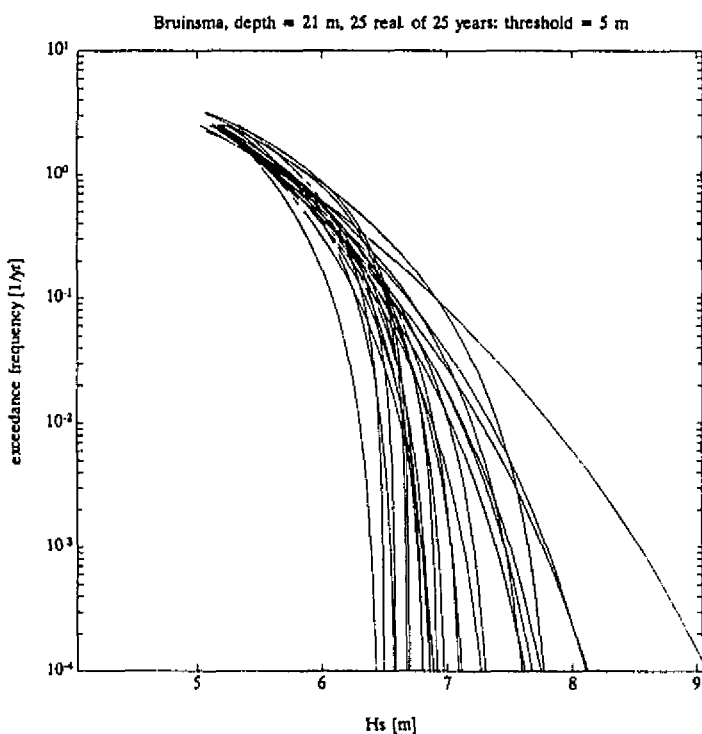


Om de GPV te testen zijn steeds 25 verschillende reeksen van 10 resp. 25 resp. 100 jaar random getrokken uit de golfdataset van 10.000 jaar. Van al deze reeksen is de GPV bepaald, de resultaten ervan staan weergegeven in de bijlagen 6.1 t/m 6.3. In figuur 6.2 wordt als voorbeeld één van deze resultaten gegeven.

Vooraf voor kleine reekslengten en lage drempels wordt de 10^{-4} -waarde in de uitgevoerde experimenten onderschat. Verder valt de grote spreiding op, uiteraard vooral bij de korte reekslengten en hoge drempels.

.....
figuur 6.2

25 random GPV-realiseraties van overschrijdingskrommen, gebaseerd op 25 jaar data (lit. 13)



Gezien bovenstaande resultaten is gezocht naar een verdeling die ook bij kleine reekslengten geen systematische afwijking (bias) vertoont en die zo mogelijk een kleinere spreiding heeft. Een kleinere spreiding in de eindresultaten wil met andere woorden zeggen een meer "robuste" verdeling. Een meer robuuste verdeling houdt tevens in dat als er een aantal waarnemingen bijkomen of als de hoogste waarden wat gewijzigd worden, de eindresultaten minder veranderen. Het lijkt dus "hoe robuuster, hoe beter". Dit gaat echter niet altijd op. Bijvoorbeeld de exponentiële verdeling is zeer robuust, maar dit komt door de aanname dat de geplote functie op logaritmisch papier een rechte is. Door het doen van aannames wordt de "bewegingsvrijheid" van de functie beperkt waardoor de eindresultaten minder van elkaar afwijken. Bijvoorbeeld de aanname "de 10^{-4} waarde van de golfhoogte is 8 meter" geeft een extreem robuuste verdeling. Het is duidelijk dat aannames goed onderbouwd moeten zijn voordat ze toegepast mogen worden.

Gezocht wordt nu naar :

een zo robuust mogelijke verdeling, waarbij zo weinig mogelijk aannames gedaan moeten worden en waarbij toepassing van de verdeling geen systematische afwijkingen mag veroorzaken.

6.3 Weibull-verdeling

Een robuuste verdeling is gevonden in de conditionele Weibull-verdeling. Dat wil zeggen een Weibull-verdeling toegepast op waarnemingen boven een bepaalde drempel.

Formule Weibull-verdeling:

$$P[u > a \mid u > \omega] = e^{-(a/\sigma)^\alpha + (\omega/\sigma)^\alpha} \quad \text{met } a \geq \omega \quad (\text{kans-vorm})$$

$$F[u > a \mid u > \omega] = p_c * e^{-(a/\sigma)^\alpha + (\omega/\sigma)^\alpha} \quad \text{met } a \geq \omega \quad (\text{frequentie-vorm})$$

waarbij de parameters zijn :

α is de krommingsparameter (voor $\alpha=1$ is de kromme op logarit-
misch papier recht).

σ is de schaal parameter (bij benadering een maat voor de helling)

ω is de drempel golfhoogte

p_c is de frequentie van voorkomen van overschrijding van de drempel-
golfhoogte (in aantal per jaar)

In bijlage 6.4 staan voor de eerder gebruikte 25 tijdreeksen van 25 jaar de resultaten. Deze kunnen vergeleken worden met die in bijlage 6.2. Wat vooral opvalt is de kleinere spreiding van de lijnen. De systematische afwijking is bij een drempel van 6 m. eveneens verdwenen.

Een punt van aandacht is dat er wat betreft de Weibull-verdeling een aanname is gedaan over de vorm van de kromme, namelijk een logaritmi-
sche. Er zijn echter nog voldoende vrijheidsgraden over (helling en krom-
ming) zodat dit niet op bezwaren stuit.

Als tweede test zijn de GPV- en de Weibull-verdeling toegepast op tijdreek-
sen waarbij de hoogste waarneming wel en niet is veranderd (lit. 14). Zo'n
verandering behoort bij een robuuste verdeling geen erg grote invloed te
hebben. Het verschil in uitkomsten tussen de oorspronkelijke reeks en die
waarbij de hoogste waarneming gewijzigd is, is een maat voor de robuust-
heid.

De resultaten zijn gegeven in tabel 6.1. Ook deze test laat zien dat de
Weibull-verdeling robuuster is dan de GPV-verdeling.

Als laatste controle is gekeken naar de bepaling van het basispeil te Hoek
van Holland zoals die destijds gedaan is met de VVM-0 (lit. 2) methode
t.o.v. een bepaling met de Weibull-verdeling (lit. 15).

In bijlage 6.5 staan voor Hoek van Holland de 10^{-4} -waarden gepresenteerd
als functie van de aantallen beschouwde hoogwaterstanden, bepaald met
de VVM-0 methode en bepaald met de 2 parameter Weibull-verdeling.
Vergelijken we de Weibull-methode met de VVM-0 methode dan blijken de
 10^{-4} -waarden in het deel met de hoge aantallen (meer dan 400) over de

Tabel 6.1

Test op robuustheid van de Weibull- en GPV-verdeling (lit. 14)

Type verdeling	Oorspronkelijke reeks	Reeks waarbij de hoogste waarde is veranderd	Verskil
<i>Windsnelheid Schiphol in m/s ; 1950-1991 ; drempel is 15 m/s hoogste waarneming is 2 m/s verhoogd.</i>			
Weibull	33,0	33,7	0,7
GPV	31,4	33,1	1,7
<i>Significante golfhoogte Europlatform in m ; 1979-1991 drempel is 4 m hoogste waarneming is 0,5 m verlaagd.</i>			
Weibull	7,8	7,5	-0,3
GPV	7,6	6,8	-0,8
<i>Opzetten Hoek van Holland in m ; 1887-1985 ; drempel is 0,75 m hoogste waarneming is 0,43 m verlaagd.</i>			
Weibull	3,22	3,12	-0,10
GPV	3,34	3,11	-0,23

hele linie met de Weibull-verdeling ongeveer 30 à 40 cm. ($\pm 10\%$) hoger te liggen. In het deel met de lage aantallen (minder dan 400), dat gebruikt wordt om de 10^{-4} -waarden te bepalen, ligt het gemiddelde niveau bij beide methoden rond de 5 m. De maxima zijn lager en de minima zijn hoger voor VVM-0.

Dit laatste is geheel in overeenstemming met hetgeen te verwachten is vanwege het robuuste karakter van de Weibull-verdeling, waardoor "afwijkingen" in de extreme waarden minder invloed hebben op de verdeling. Het verloop van de 10^{-4} -waarden komt dus zowel kwalitatief als kwantitatief heel goed met elkaar overeen voor het gebied met aantallen waarnemingen kleiner dan 400.

Uit het bovenstaande blijkt dat de Weibull-verdeling een prima verdeling is om extreme-golfhoogtenstatistiek mee te bepalen vanwege de robuustheid, mede gezien de relatief korte tijdreeksen waar we in het geval van golven over beschikken.

7. H_{m_0} -max

7.1 Inleiding

De extreme waarden van golven op zee worden meestal bepaald door het extrapoleren van de statistiek van waargenomen of numeriek gemodelleerde golven. Daarbij wordt vrijwel altijd verondersteld dat de eigenschappen van golven niet veranderen in extreme situaties. Voor extrapolaties van bescheiden omvang in diep water condities is dit een verantwoorde veronderstelling. Echter, voor grotere extrapolaties in ondiep water is dit minder zeker i.v.m. een mogelijk ander fysisch regime van de golven. Dit wordt thans niet verdisconteerd in de statistische extrapolaties, mede omdat de daarvoor benodigde informatie in vergaande mate ontbreekt. Voor Nederland is dit met name relevant in de zuidelijke Noordzee waar de golven fysisch begrensd worden door een beperkte waterdiepte over een groot gebied.

7.2 Doelstelling

De doelstelling van de H_{m_0} -max berekeningen is het schatten, met behulp van een numeriek golfmodel, van de maximaal mogelijke significante golfhoogte H_s die op kan treden onder zeer extreme condities op de zuidelijke Noordzee, met name op een aantal vaste meetlokaties. Bij deze zeer extreme condities is een windsnelheid aangenomen van 50 m/s. De maximaal denkbare windsnelheid in dit gebied is in overleg met het KNMI bepaald en ligt tussen 40 en 50 m/s, de hier genomen 50 m/s is dus een echte bovengrens. Voor de berekeningen is het model WAVEWATCH gebruikt waarin door de keuze uit verschillende golffysica-formuleringen en het windveld de best mogelijke beschrijving wordt gegeven van de maximale significante golfhoogte die op kan treden.

7.3 Model

Het WAVEWATCH-model (lit. 16 ; gebaseerd op het WAM model : Hasselmann et al.) is een derde generatie spectraal golfmodel waarin rekening wordt gehouden met golfrefractie, golfgeneratie door wind, vier golfinteracties, golfbreken op steilheid en bodemwrijving. Het rekenrooster dat gebruikt is heeft een resolutie van 16 km met een verfijning bij de Nederlandse kust van 3 km.

7.4 Resultaten

Eén van de belangrijkste aspecten bij het zoeken naar de maximale significante golfhoogte is het windveld. Hiervoor is een uitgebreid onderzoek verricht waarbij op basis van windsnelheden ($U_{\max} \leq 50$ m/s) en depressiebanen een duizendtal stormen zijn doorgerekend met het golfstralenmodel DOLPHIN-B. Met verschillende zoekmethoden is het windveld gevonden dat de maximale golfhoogte genereert, dit is het geval bij een uniform windveld van 50 m/s en een windrichting 330°. Bij kunstmatige stormen met een variërend windveld in snelheid en richting waren de golfhoogten in alle gevallen lager dan bij het uniforme windveld, in één geval is bijna

dezelfde golfhoogte bereikt (lit. 17 en 18).

Met behulp van een gevoeligheidsonderzoek zijn verschillende golffysica-formuleringen in WAVEWATCH onderzocht en geanalyseerd. De onzekerheid van de coëfficiënten in de formuleringen is terug te voeren in de onzekerheid van de berekende golfhoogte, deze onzekerheid σ is vastgesteld op 5% boven en 25% onder de gevonden maximale golfhoogte. Het model is geverifieerd met metingen van twee stormen, december 1990 en februari 1993. De resultaten zijn over het algemeen goed (fouten kleiner dan 10% in significante golfhoogte bij de piek van de storm) behalve voor één station (SON) met een fout van 18%.

In tabel 7.1 worden de modelresultaten weergegeven voor de desbetreffende stations met een 3 km rooster geldend voor de volgende extreme condities over het hele gebied (lit. 7) :

- uniform windveld
- windsnelheid 50 m/s
- wind- en golfrichting 330° (NNW)
- waterstand 5 m boven gemiddeld zeeniveau
- standaardinstellingen van het model

Tabel 7.1
Resultaten standaard model

Station	diepte tov NAP [m]	Hm ₀ [m]	Tm ₀₂ [s]	hoogst opgetreden Hs	(j):mm:dd)
SON	20,0	9,48	7,52	7,70	90:12:12
GBR	23,4	11,21	8,41	fictief station	
ELD	25,5	11,62	8,49	7,70	90:12:12
K13	27,5	12,41	7,93	7,70	90:12:12
YM6	21,5	10,07	7,94	7,00	93:02:21
EUR	30,6	13,22	9,39	6,45	93:11:14
LEG	21,6	10,29	8,37	5,80	90:01:25
BBR	17,4	9,02	8,19	fictief station	

In tabel 7.2 zijn dezelfde extreme condities gebruikt maar dan met de maximale instellingen van het model. De fysische formuleringen en parameterinstellingen zijn hier zo ingesteld dat ze een maximale Hm₀ opleveren.

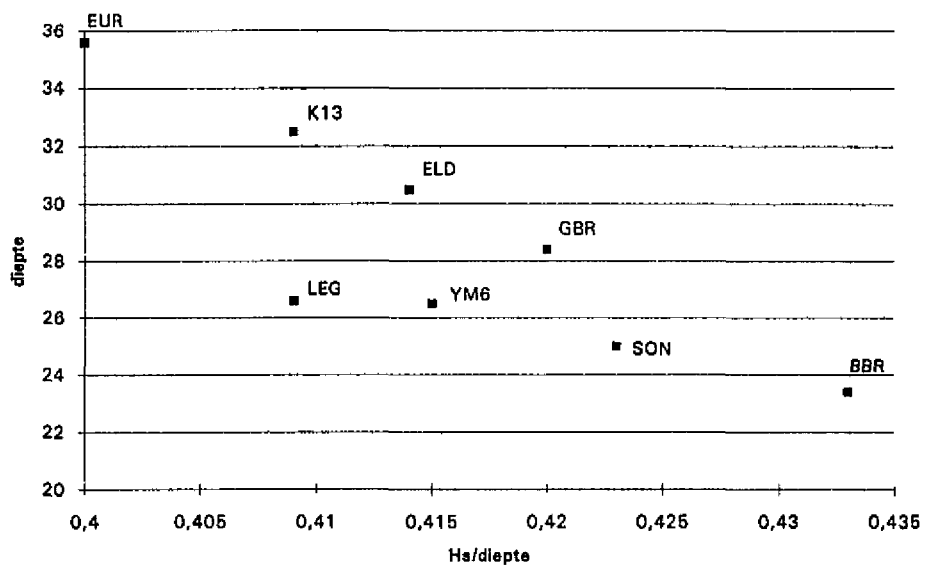
Tabel 7.2
Resultaten maximum model

Station	diepte tov [m]	Hm ₀ -max [m]	Tm ₀₂ [s]	Tp [s]	verhouding Hm ₀ /waterdiepte
SON	20,0	10,58	9,89	20,83	0,423
GBR	23,4	11,92	11,22	20,83	0,420
ELD	25,5	12,64	10,43	20,83	0,414
K13	27,5	13,29	10,82	21,28	0,409
YM6	21,5	10,99	9,47	13,89	0,415
EUR	30,6	14,22	10,94	15,63	0,400
LEG	21,6	10,89	9,62	15,15	0,409
BBR	17,4	9,71	9,78	15,38	0,433

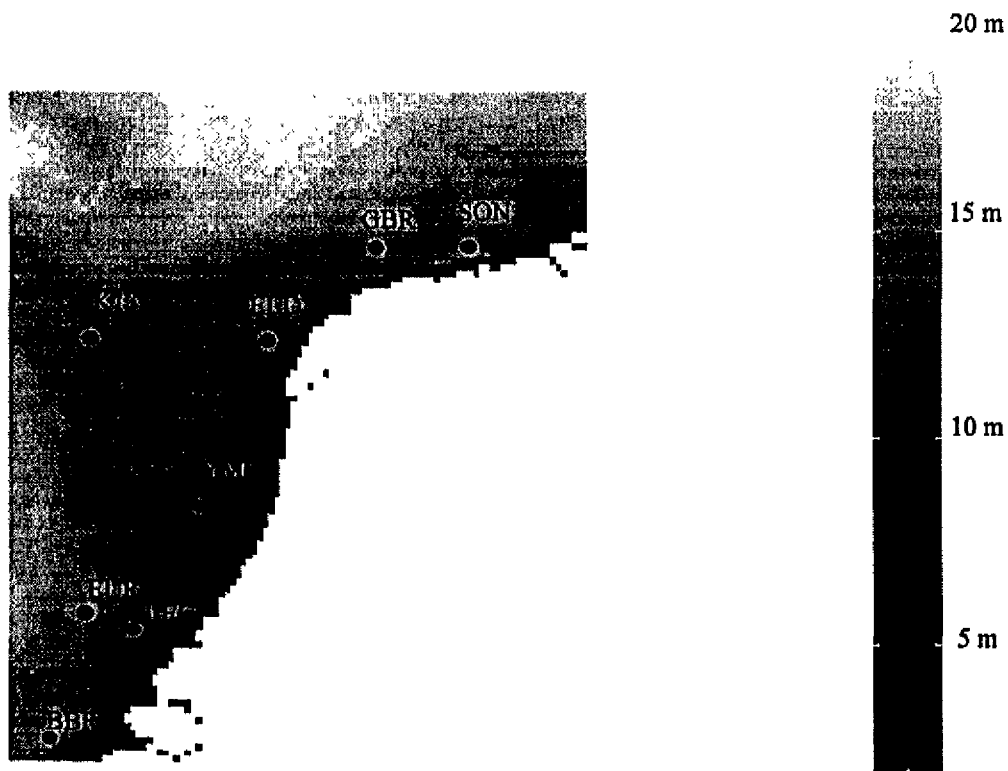
Figuur 7.1 geeft een kleine variatie aan van de verhouding Hm₀ en de waterdiepte, voor de stations met een grotere diepte geldt een kleinere verhouding van de Hm₀/waterdiepte. Bij een nog grotere windsnelheid is hier nog een hogere Hs-max te verwachten. Grotere windsnelheden dan 50

m/s zijn voor de zuidelijke Noordzee niet realistisch, de lokale diepte blijft de belangrijkste factor voor de maximale H_{m0} . In figuur 7.2 en 7.3 zijn contourplots gegeven van met het maximum model berekende golfhoogten en golfperiodes.

Figuur 7.1
Verhouding H_{m0} /waterdiepte tot de waterdiepte



Figuur 7.2
Contourplot van de met het maximum model berekende golfhoogten H_{m0}



Figuur 7.3
 Contourplot van de met het maximum model berekende golfperioden $T_{m_{02}}$



7.5 Conclusies

Uit tabel 7.2 blijkt dat de verhouding tussen de maximale significante golfhoogte en de lokale waterdiepte redelijk constant is en op ongeveer 0.42 ligt. Deze verhouding blijft gelijk bij een stormopzet van 6 meter i.p.v. 5 meter. De relatieve ongevoeligheid voor de variaties in windsnelheid, windveld variaties en stormopzet niveau ondersteunt de veronderstelling dat de maximaal mogelijke golfhoogten in de zuidelijke Noordzee grotendeels bepaald worden door de lokale waterdiepte.

8. Resultaten

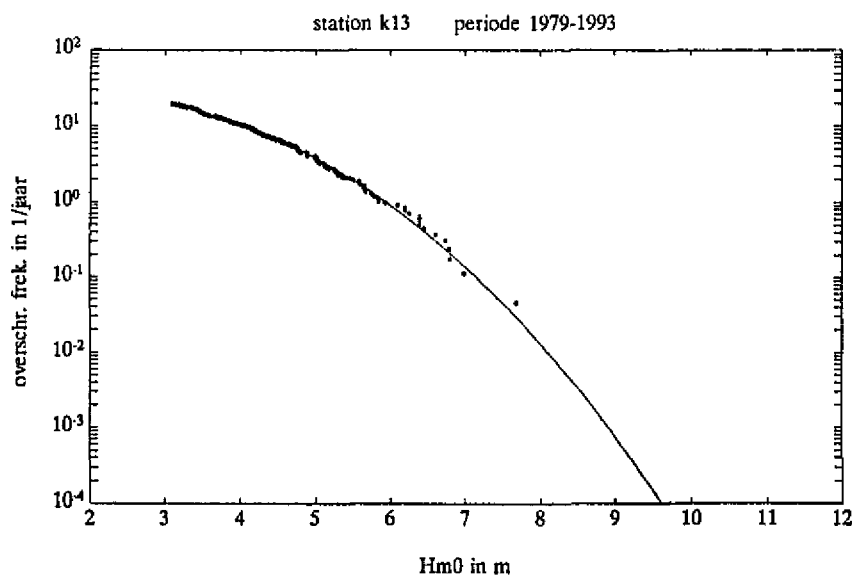
8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van achtereenvolgens de volgende onderdelen gepresenteerd :

- statistiek uit metingen
- statistiek uit metingen + NESS
- statistiek en klimaatcorrecties
- statistiek en Hs-max
- vaststellen extreme significante golfhoogten met een gemiddelde overschrijdingskans van 10^{-4} per jaar

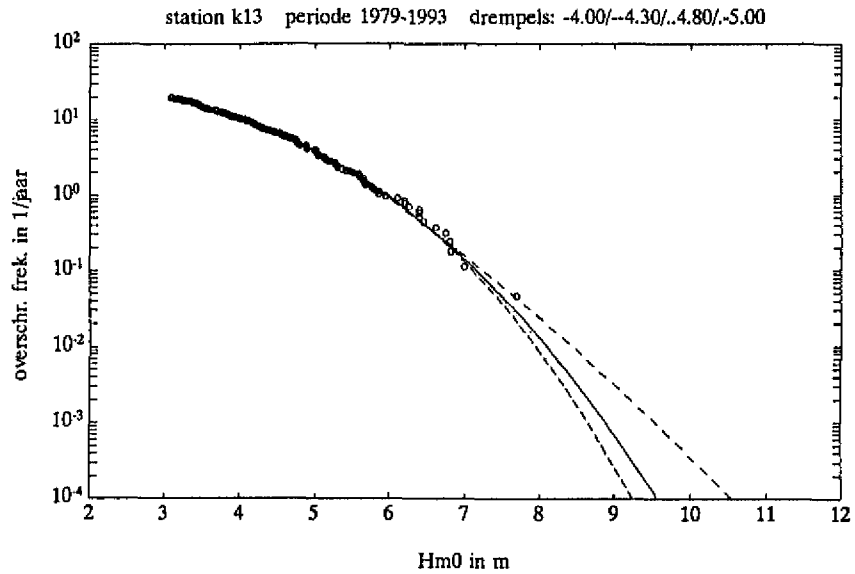
Zoals in hoofdstuk 6 reeds uiteengezet is zijn de statistische resultaten verkregen door gebruik te maken van de conditionele 2-parameter Weibull-verdeling, vanwege het robuuste karakter. De parameters α en σ van de Weibull-verdeling worden geschat met de maximum likelihood methode. Als voorbeeld zijn in figuur 8.1 de punten van de overschrijdingsfrequentie met daar doorheen de Weibull-verdeling gepresenteerd voor de lokatie K13, bij een drempelwaarde van 3 m ($H_s \geq 3$ m).

.....
Figuur 8.1
 Voorbeeld van overschrijdingsfrequenties met gefitte Weibull-verdeling



Om de extreme golfhoogten meer gewicht toe te kennen kan de Weibull-verdeling ook gefit worden bij hogere drempelwaarden. In figuur 8.2 zijn als voorbeeld een viertal krommen gepresenteerd voor vier verschillende drempelwaarden, welke bij extrapolatie tot vier verschillende 10^{-4} -waarden (de waarden bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} keer per jaar) leiden. De 10^{-4} -waarden kunnen ook als functie van de drempelwaarden gepresenteerd worden; de zogenaamde drempelplaatjes. In figuur 8.3 is hiervan een voorbeeld gepresenteerd.

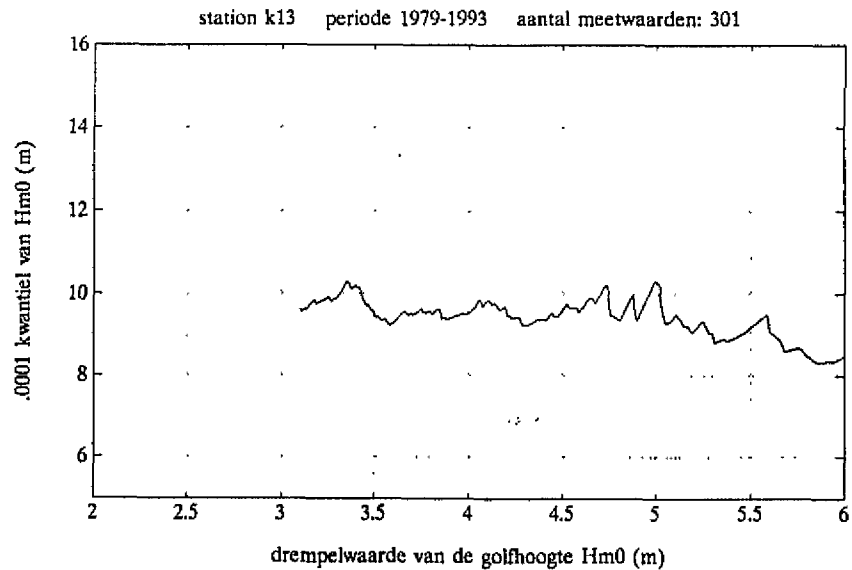
Figuur 8.2
Voorbeeld van Weibull-verdelingen met verschillende drempelhoogten



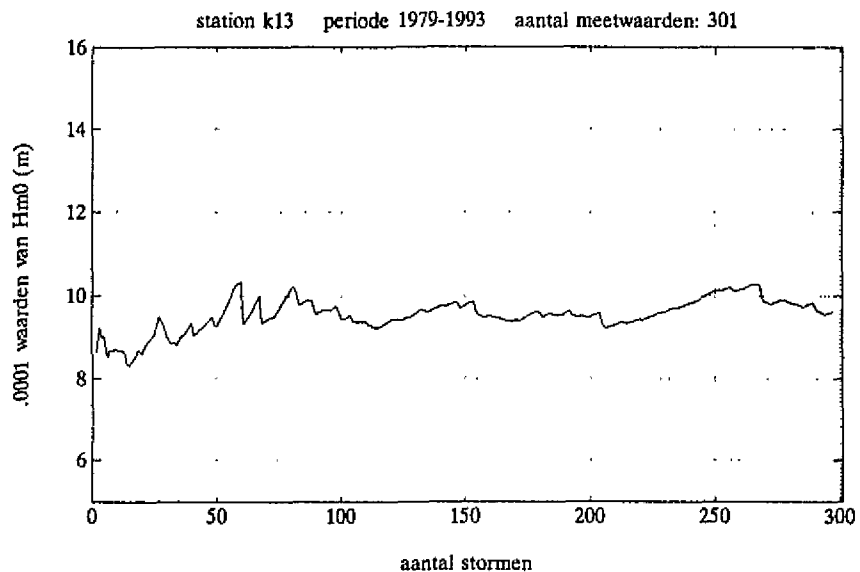
Behalve de waarden van de drempelgolfhoogten kunnen ook de daarmee corresponderende aantallen maxima gebruikt worden, zoals gepresenteerd in figuur 8.4.

De drempelplaatjes vormen een belangrijk tussenresultaat, op basis waarvan de schattingen van de 10^{-4} -waarden tot stand gekomen zijn.

Figuur 8.3
Voorbeeld van extreme (10^{-4}) golfhoogten als functie van de drempelgolfhoogte



Figuur 8.4
Voorbeeld van extreme (10^{-4}) golfhoogten als functie van het aantal maxima



8.2 Statistiek uit metingen

Voor de schatting van de 10^{-4} -waarden van de golfhoogten voor de verschillende lokaties is uitgegaan van zowel optimalisatie van de conditionele 2-parameter Weibull-verdeling naar α en σ (variabele α) als optimalisatie naar σ bij gekozen α (vaste α) (lit. 19).

Variabele alfa

Uitgaande van optimalisatie naar zowel α als σ zijn voor de verschillende lokaties drempelplaatjes verkregen die de basis vormen voor de schatting van de 10^{-4} -waarden. In het gebied van de drempelwaarden van de aantallen van 75 tot 150 zijn voor alle lokaties de waarden redelijk stabiel, dat wil zeggen dat de 10^{-4} -waarden, per lokatie, slechts weinig veranderen bij verandering van de drempel. Omdat de meetreeksen van de verschillende lokaties niet even lang zijn, en om de resultaten van de lokaties onderling zo goed mogelijk te kunnen vergelijken is uitgegaan van drempelgebiedgrenzen op basis van gelijke overschrijdingsfrequenties van de significante golfhoogten.

Uitgaande van bovengenoemde aantallen 75-150 is het daarmee zo veel mogelijk overeenkomende drempelgebied gekozen, namelijk behorend bij overschrijdingsfrequenties tussen 5 en 10 keer per jaar.

Ter bepaling van de 10^{-4} -waarden van de golfhoogten is voor de verschillende lokaties de mediaanwaarde berekend over het drempelgebied overeenkomend met de bovengenoemde overschrijdingsfrequenties. Evenals voor de 10^{-4} -waarden van de golfhoogten zijn ook voor de krommingsparameter α en de schaalparameter σ op analoge wijze de mediaanwaarden bepaald (zie tabel 8.1). Opgemerkt moet worden dat door bovengenoemde berekeningswijze de combinaties van α en σ niet exact leiden tot de gepresenteerde 10^{-4} -waarden van de golfhoogten

Tabel 8.1

De 10^4 -waarden voor de meetdata (1979-1993) met de methode van de variabele α

station	10^4 -waarden golfhoogten	krommings- parameter α	schaal- parameter σ
SON	10,16	2,37	3,50
ELD	9,49	3,16	4,31
K13	9,66	2,56	3,57
YM6	9,47	2,43	3,31
EUR	8,43	2,56	3,12

Vaste alfa

De krommingsparameter α is van grote invloed op de extrapolatie naar 10^4 -waarden. Naarmate de α groter wordt is de kromming van de Weibull-verdeling sterker met als gevolg dat bij de extrapolatie de 10^4 -waarden van de significante golfhoogte kleiner worden. Het gebruik van een vaste α maakt de Weibull-verdeling dan ook nog robuuster.

Op basis van fysische overwegingen, vooral in het extrapolatiegebied waar bodemwrijving en breken een maatgevende rol spelen, en waarvan aangenomen wordt dat dit voor de verschillende lokaties nagenoeg hetzelfde moet zijn, is vervolgens uitgegaan van een vaste kromming, dus vaste α . Ter bepaling van de 10^4 waarde van de golfhoogte is verder uitgegaan van dezelfde aanpak als bij de variabele alfa.

Op basis van visuele vergelijkingen van meetgegevens en naar σ geoptimaliseerde krommen bij verschillende vaste α 's bleek de waarde van α , die voor alle lokaties de beste fit geeft, nagenoeg overeen te komen met het rekenkundig gemiddelde van de α 's bepaald met de methode van de variabele α (lit. 20). Voor de methode van de vaste α is daarom uitgegaan van een vaste α bepaald door bovengenoemd rekenkundig gemiddelde ($\alpha = 2,62$). In tabel 8.2 zijn de resultaten van de methode met de vaste alfa gepresenteerd.

Tabel 8.2

De 10^4 -waarden voor de meetdata (1979-1993) met de methode van de vaste α

station	10^4 waarden golfhoogten	krommings- parameter α	schaal- parameter σ
SON	9,78	2,62	3,75
ELD	10,13	2,62	3,87
K13	9,61	2,62	3,63
YM6	9,21	2,62	3,50
EUR	8,36	2,62	3,16

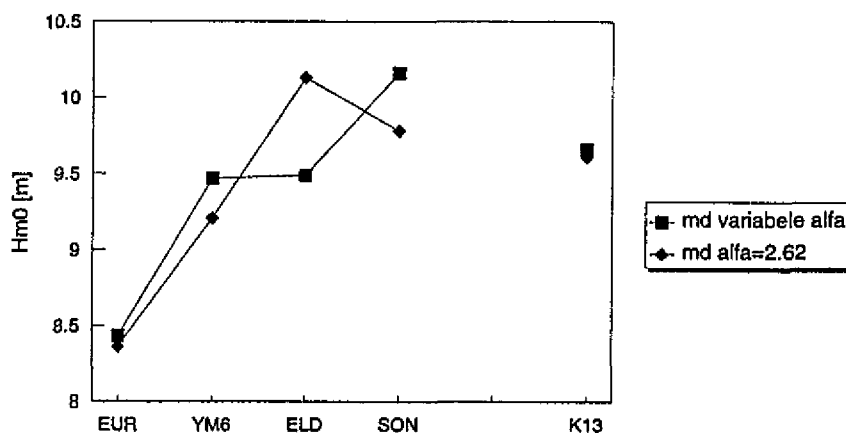
Vergelijking methoden met variabele en vaste alfa

In onderstaande figuur 8.5 zijn de 10^4 -waarden voor de verschillende lokaties uitgezet voor variabele α en vaste α . Hieruit blijkt:

- voor de vaste α is de 10^4 waarde van de golfhoogte voor ELD beduidend hoger dan voor de variabele α ;
- de 10^4 waarde van de golfhoogte voor SON en YM6 is voor de vaste α duidelijk lager dan voor de variabele α ;

- voor de vaste α is de 10^{-4} waarde van de golfhoogte voor SON lager dan van ELD in tegenstelling met die van de variabele α en is het verschil met K13 kleiner geworden;
- bij de vaste α is de waarde van de golfhoogte voor ELD circa een meter hoger dan voor IJmuiden, terwijl voor de variabele α de waarden hetzelfde zijn.

Figuur 8.5
Extreme (10^{-4}) golfhoogten volgens de methoden met variabele en vaste α



Beschouwen we bovenstaande verschillen tussen vaste en variabele α in het licht van fysieke inzichten dan moet de voorkeur uitgaan naar de methode met de vaste α . De belangrijkste redenen daarvoor zijn :

- het is niet waarschijnlijk dat de 10^{-4} waarde van de golfhoogte voor SON veel hoger is dan voor ELD en K13;
- het is niet waarschijnlijk dat de 10^{-4} -waarden van de golfhoogte voor ELD en IJmuiden hetzelfde zijn.

8.3 Statistiek uit metingen + NESS

De verlenging van de periode door het aanvullen met NESS gegevens van een periode van ongeveer 15 jaar (1979-1993) naar een van ongeveer 30 jaar (1964-1993) heeft als voordeel een langere reeks. Echter het nadeel is dat de nauwkeurigheid van de NESS gegevens ongeveer een factor drie lager is dan de meetgegevens. Het is daarom zonder uitgebreid onderzoek niet zonder meer aantoonbaar vast te stellen of de verlenging tot nauwkeurigere resultaten leidt.

Voor de statistiek uit metingen aangevuld met NESS gegevens is eerst een bias-correctie op de NESS gegevens toegepast, teneinde de systematische fouten in de NESS gegevens zoveel mogelijk te corrigeren aan de hand van de meetgegevens. Dit is gedaan met behulp van de overlappende periode 1979-1989. Voor de bias-correctie zijn twee methoden onderzocht :

- de methode met $\log H_{\text{meetgegevens}} = a \log H_{\text{NESS gegevens}} + b$ (lit. 21). Deze methode is gebaseerd op het vergelijken van de frequentieverdelingen, waarbij voor de NESS-waarde de meetwaarde genomen wordt bij dezelfde overschrijdingsfrequentie;
- een lineair verband tussen de meet- en NESS gegevens, waarbij onderscheid gemaakt wordt voor de lage en de hoge waarden. Per lokatie is zowel voor de lage waarden een lineair verband bepaald alsook voor de hoge waarden.

Bias-correctie op basis van $\log H_m = a \log H_N + b$

De waarden op basis van de methode waarbij voor de bias-correctie de overschrijdingen vergeleken worden, is alleen bepaald met behulp van de methode van de variabele α (lit. 20).

In onderstaande tabel 8.3 zijn de resultaten weergegeven.

Tabel 8.3

Resultaten 10^4 -waarden van de golfhoogten van meetdata + NESS (1964-1993) (met bias-correctie en variabele α); in meters.

	SON	ELD	K13	YM6	EUR
metingen	10,02	9,44	9,55	9,43	8,26
metingen + NESS	9,94	9,26	9,11	9,95	9,63

Uit de resultaten blijkt :

- de 10^4 -waarden voor de westelijke kust zijn hoger door toevoeging van NESS-gegevens, vooral t.p.v. het Europlatform;
- voor de noordelijke stations daarentegen zijn de 10^4 -waarden in geringe mate lager geworden zijn.

Gezien de hoge 10^4 waarde voor Ijmuiden vergeleken met die voor ELD en K13 kunnen de resultaten, verkregen met de bovengenoemde bias-correctie, op basis van fysische inzichten als niet-realistisch gekwalificeerd worden.

De resultaten zijn aanleiding geweest om de tussenresultaten, namelijk de bias-correctie, nogmaals kritisch te bekijken. Op de bijlagen 8.1 zijn de resultaten visueel gepresenteerd. Hieruit blijkt dat voor de lage waarden de NESS-gegevens hoger dan de meetdata zijn en voor de hoge waarden lager.

Vergelijken we echter de bias-correctie (de kromme) met de punten van de NESS-gegevens versus de meetgegevens, dan blijkt dat er bij de hogere waarden afwijkingen optreden. Er is een tendens van een buiging te zien waardoor in het gebied van de hogere waarden, de meet- en NESS-gegevens weer meer naar dezelfde waarden neigen, terwijl de logaritmische correctie de neiging vertoont steeds groter te worden bij hoge waarden. In het licht van de noodzakelijke extrapolaties is dit reden geweest voor een verder onderzoek naar de bias-correctie op basis van een lineair verband tussen meet- en NESS-gegevens.

Bias-correctie op basis van lineair verband

De resultaten van de bias-correctie op basis van lineaire verbanden zijn gepresenteerd in bijlage 8.2. Per lokatie wordt een lage- en een hoge tak onderscheiden.

Vergelijken we de bijlage 8.1 met bijlage 8.2 dan blijkt het verband op basis van lineariteit beter bij de punten aan te sluiten dan op basis van vergelijking van overschrijdingsfrequenties ($\log H_m = a \log H_N + b$).

Op basis van het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat een bias-correctie op basis van lineariteit tot betere resultaten zal leiden dan op basis van vergelijking van frequentieverdelingen.

Met de bias-correcties op basis van de lineariteit zijn vervolgens op 3 verschillende manieren de 10^4 -waarden bepaald :

- met de methode variabele α ;
- met de methode van de vaste $\alpha = 3,00$; dit is het gemiddelde van de bovenstaande variabele α 's (metingen en NESS);
- met de eerder bepaalde vaste $\alpha = 2,62$, welke voor de meetgegevens bepaald is (lit. 20).

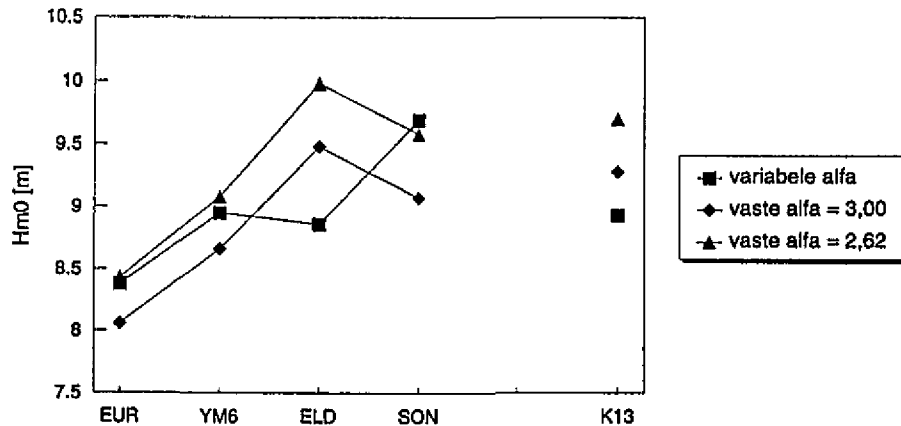
In onderstaande tabel 8.4 zijn de resultaten van de 10^4 -waarden met behulp van bovenstaande methoden gepresenteerd.

Tabel 8.4
De 10^4 -waarden van de golfhoogten H_{m0} van meet- + NESS-gegevens (1964-1993) met bias-correctie op basis van lineariteit, in meters

	SON	ELD	K13	YM6	EUR
met variabele α	9,69	8,86	8,93	8,95	8,38
met vaste α ($\alpha = 3,00$)	9,07	9,48	9,28	8,66	8,06
met $\alpha = 2,62$	9,58	9,98	9,70	9,08	8,43

Op basis van fysische inzichten kunnen om dezelfde reden zoals genoemd in hoofdstuk 8.2 de resultaten met de methoden van de variabele α als minder realistisch gekwalificeerd worden. Bovenstaande resultaten zijn tevens in onderstaande figuur 8.6 grafisch gepresenteerd.

Figuur 8.6
Extreme (10^4) golfhoogten uit metingen + NESS (lineaire bias correctie) voor verschillende methoden van het gebruik van α



Uit de bovenstaande figuur blijkt :

- de 10^{-4} -waarden van de meetdata en NESS-gegevens met vaste $\alpha = 3,00$ liggen voor alle lokaties circa een halve meter lager dan die voor $\alpha = 2,62$;
- de 10^{-4} -waarden met vaste $\alpha = 2,62$ voor meetdata en NESS-gegevens zijn bijna even groot als die van alleen de meetdata;
- door de toevoeging van NESS-gegevens is de 10^{-4} waarde voor SON enigszins lager en voor K13 fractioneel hoger geworden;
- door de toevoeging van NESS-gegevens is de waarde voor K13 fractioneel hoger geworden dan die van SON.

Het toevoegen van de NESS-golfhoogten over de periode 1964-1978 geeft als het ware de overschrijdingskromme van meetdata + NESS-gegevens op kunstmatige wijze een extra kromming, resulterend in een relatief hoge α .

8.4 Klimaatcorrecties

De meetgegevens (1979-1993) en de meetgegevens + NESS-gegevens (1964-1993) beslaan ook samen nog een relatief korte periode. De mogelijkheid bestaat dat deze perioden, mogelijk deels, binnen een tijdsperiode vallen waarin relatief minder hoge golven voorkomen door weinig en of minder extreme stormen. Ook het omgekeerde zou kunnen. Extrapolatie van deze gegevens tot 10^{-4} -waarden van de golfhoogten zou dan tot onderschatting dan wel tot overschatting van de golfhoogten kunnen leiden. Daarom is onderzocht in hoeverre hiervan sprake kan zijn, en in hoeverre daarvoor een correctie toegepast zou moeten worden.

Omdat van waterstanden wel lange meetreeksen aanwezig zijn, van een drietal lokaties zelfs meer dan 100 jaar, zijn deze voor het onderzoek naar klimaatcorrecties gebruikt. Daarbij is ervan uitgegaan dat er een redelijk verband bestaat tussen waterstanden en golfhoogten onder extreme weersomstandigheden. Het onderzoek naar klimaatcorrecties is in eerste instantie gedaan zowel aan de hand van hoge hoogwaterstanden, als aan de hand van opzetten bij hoge hoogwaterstanden, onder stormachtige omstandigheden. Na een keuze voor toepassing van opzetten heeft, in tweede instantie, een verdere uitwerking plaats gevonden.

Voor het verkrijgen van 10^{-4} -waarden van de waterstanden is bij het onderzoek naar de basispeilen langs de Nederlandse kust indertijd voor het extrapoleren uitgegaan van de VVM-0 methode. Voor het eventueel toepassen van klimaatcorrecties op basis van het vergelijken van overschrijdingsfrequenties, verdient het echter de voorkeur om van dezelfde extrapolatiemethoden uit te gaan, daarom is voor dit onderzoek de 2-parameter Weibull-verdeling ook op de waterstanden toegepast. Zoals in hoofdstuk 6 al is aangetoond, zijn met beide methoden vergelijkbare uitkomsten te bereiken.

De 10^{-4} -waarden zijn berekend als mediaanwaarden over het drempelgebied overeenkomend met de overschrijdingsfrequenties tussen 0,5 en 5,0 keer per jaar (lit. 22). Naast de perioden van de meetgegevens (1979-1993) en van de meetgegevens + NESS-gegevens (1964-1993) is de periode van 1932-1993 en "de lange" periode, gepresenteerd in tabel 8.5, gebruikt.

In tabel 8.6 en 8.7 worden de geschatte extreme hoogwaterstanden respectievelijk opzetten gepresenteerd voor de vier genoemde perioden.

Tabel 8.5
Overzicht "lange" periode"

waterstand station	gebruikte meetperiode
Vlissingen	1 oktober 1881 - 31 december 1993
Hoek van Holland	1 oktober 1887 - 31 december 1993
IJmuiden	1 oktober 1883 - 31 december 1993

Tabel 8.6
De 10^4 -waarden van de hoogwaterstanden (lit. 22)

	"lang"	1932-1993	1964-1993	1979-1993
Vlissingen	5,2	5,3	4,4	4,4
Hoek van Holland	4,9	4,8	3,5	3,2
IJmuiden	5,1	4,6	3,7	3,1
Den Helder		4,1	3,5	3,4
West-Terschelling		3,9	3,9	3,8

Tabel 8.7
De 10^4 -waarden van de opzetten (lit. 22)

	"lang"	1932-1993	1964-1993	1979-1993
Vlissingen	3,2	2,8	1,9	1,9
Hoek van Holland	3,8	4,0	2,1	2,3
IJmuiden	4,1	3,8	2,8	3,5
Den Helder	-	3,6	3,1	3,2
West-Terschelling	-	3,0	2,8	2,9

Uit de tabellen 8.6 en 8.7 blijkt :

- dat de verschillen in 10^4 -waarden tussen de lange periode en de periode vanaf 1932 gering zijn. Gemiddeld genomen zijn de waarden voor de lange periode iets hoger. Echter voor Hoek van Holland is de waarde voor de opzet voor de periode vanaf 1932 hoger;
- dat de verschillen tussen de beide korte perioden (vanaf 1964 en vanaf 1979) gering zijn. Ook hier blijkt IJmuiden vooral bij de hoogwaterstanden af te wijken omdat de waarde voor 1964-1993 relatief hoog is ten opzichte van 1979-1993;
- dat er tussen enerzijds de beide lange perioden en anderzijds de korte perioden wel duidelijke verschillen optreden. Bij Terschelling treedt nog geen verschil op, bij Den Helder is de waarde enigszins hoger voor de langere periode en voor IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen duidelijk hoger. Vooral bij Hoek van Holland en IJmuiden (gesloten kust) zijn deze verschillen aanzienlijk;
- dat de trends enerzijds voor hoogwaterstanden en anderzijds voor de opzetten in het algemeen goed vergelijkbaar zijn.

Uit een vergelijking van de drempelplaatjes van de aan voorgaande gepresenteerde ten grondslag liggende waarden, blijkt dat voor de opzetten het verloop van de 10^{-4} -waarden stabiel is dan voor de waterstanden. Dit geldt ook voor de alfa's. Voor het nader uitwerken van eventueel toe te passen klimaatcorrecties is daarom verder uitgegaan van onderzoek op basis van opzetten (lit. 22).

Het onderzoek naar mogelijke correcties is uitgevoerd op basis van vergelijking van overschrijdingsfrequenties, waarvan het principe in bijlage 3.1 is gepresenteerd.

De resultaten voor deze correcties zijn gepresenteerd in de bijlagen 8.3 t/m 8.5. In bijlagen 8.3 wordt een vergelijking gemaakt tussen de lange periode en de periode 1932-1993, in bijlage 8.4 tussen de perioden 1932-1964 en in bijlage 8.5 tussen de perioden 1932-1993 en 1979-1993. In de bijlagen worden krommen gepresenteerd, waarbij de waarde van de overschrijdingsfrequentie van een bepaalde opzet in de ene periode af te lezen valt, gegeven de overschrijdingsfrequentie van dezelfde opzet in de andere periode.

De gepresenteerde correcties zijn bepaald door voor verschillende drempelwaarden (corresponderend met overschrijdingsfrequenties tussen 0,5 en 5,0 per jaar) correcties te bepalen en daarvan de mediaan en de 25% en 75% overschrijding ("hinges") te nemen.

Correcties voor de periode 1932-1993 tov de lange periode

Uit de bijlagen 8.3 blijkt dat er slechts weinig gecorrigeerd zou behoeven te worden om de statistiek voor de periode 1932-1993 om te zetten naar de lange periode. In de verdere uitwerking is voor alle lokaties een zelfde correctie toegepast. Hiervoor is uitgegaan van een lineair verband tussen de logaritmen van de overschrijdingsfrequenties en is een factor $f = 0,85$ toegepast.

Correcties voor de perioden 1964-1993 en 1979-1993 tov 1932-1993

Uit de bijlagen 8.4 en 8.5 blijkt dat er grote correcties voor Vlissingen, Hoek van Holland en IJmuiden toegepast zouden moeten worden, iets minder voor Den Helder en nauwelijks voor Terschelling. De correcties die volgen uit de bijlagen 8.4 en 8.5 lijken voor Vlissingen, Hoek van Holland en IJmuiden niet realistisch en de betrouwbaarheid is onvoldoende groot. Om toch resultaten te krijgen zijn voor de verdere uitwerking met behulp van "expert judgement" meer realistisch aandoende correcties vastgesteld (bijlage 8.5: applied correction). Ook hiervoor zijn lineaire verbanden aangenomen met factoren g , welke gepresenteerd zijn in onderstaande tabel. Daarin zijn tevens de bovengenoemde factor $f=0,85$ en voor de totale correctie het produkt van f en g , namelijk fg voor de overschrijdingsfrequentie gepresenteerd (lit. 22 en 23).

Tabel 8.8

Correctie factoren voor de logaritmische transformatie van de overschrijdingsfrequenties

waterstand station	f	g_{Ijmuiden}	$f g_{\text{Ijmuiden}}$	$g_{\text{Vlissingen}}$	$f g_{\text{Vlissingen}}$
Vlissingen	0,85	0,65	0,55	0,64	0,54
Hoek van Holland	0,85	0,65	0,55	0,64	0,54
IJmuiden	0,85	0,78	0,66	0,64	0,54
Den Helder	0,85	0,83	0,71	0,66	0,58
West-Terschelling	0,85	1,00	0,85	0,86	0,78

Toepassing van de bovengenoemde correcties op de 10^{-4} -waarden van de golfhoogten (verkregen met de methode van variabele α) in de drempelplaatjes leidt voor de meetgegevens (periode 1979-1993) tot de resultaten welke gepresenteerd zijn in bijlage 8.6. Voor EUR zijn daardoor de extreme golfhoogten in de orde van grootte van 2 m hoger, afhankelijk van de drempelwaarde. Voor YM6 is dit circa 1,5 m, ELD en K13 circa 1 m en SON circa 0,5 m.

Uitgaande van de mediaanwaarde voor het drempelgebied behorend bij de overschrijdingsfrequenties tussen 5 en 10 stormen per jaar leidt dit tot de in tabel 8.9 vermelde 10^{-4} -waarden voor de golfhoogten.

De 10^{-4} -waarden van de meetgegevens uitgebreid met NESS-gegevens (periode 1964-1993, verkregen met de methode van variabele α en de NESS-correctie op logaritmische basis) zijn op analoge wijze tot stand gekomen

De in tabel 8.9 vermelde waarden zijn in onderstaande figuur 8.7 in grafiekvorm gepresenteerd.

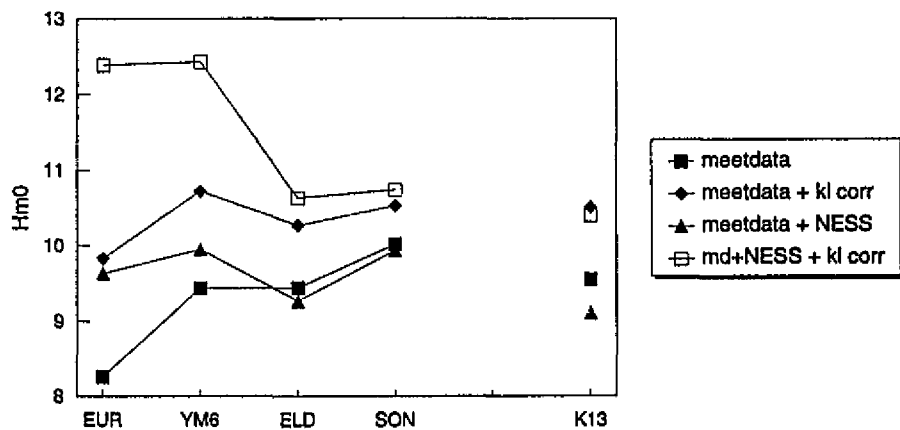
Tabel 8.9

De 10^{-4} -waarden van de golfhoogten H_{m0} in meters met en zonder klimaatcorrecties, uitgaande van methode van een variabele α en NESS-correctie op logaritmische basis

methode	SON	ELD	K13	YM6	EUR
metingen	10,02	9,44	9,55	9,43	8,26
metingen + klimaatcorrecties	10,53	10,27	10,51	10,72	9,83
metingen + NESS	9,94	9,26	9,11	9,95	9,63
metingen + NESS + klimaatcorrecties	10,74	10,63	10,40	12,43	12,39

Figuur 8.7

Extreme (10^{-4}) golfhoogten uit meetdata en metingen + NESS ; verschillende methoden



Bij de start van het onderzoek naar klimaatcorrecties is uitgegaan van een "redelijk" verband tussen golfhoogten enerzijds en hoogwaterstanden en opzetten bij hoogwaterstanden anderzijds, omdat beide door de wind veroorzaakt worden. Daarnaast is er van uitgegaan dat een mogelijke klimaatverandering zich op grote ruimteschaal zou manifesteren, zodat langs de Nederlandse kust volstaan zou kunnen worden met een uniforme klimaatcorrectie.

Uit het onderzoek blijkt echter dat er voor de noordkust nauwelijks klimaatcorrecties toegepast hoeven te worden in tegenstelling tot de westkust, waarbij de correcties naar het zuiden toe steeds groter worden en voor Hoek van Holland en Vlissingen zelfs onrealistisch groot lijken. De meest waarschijnlijke verklaring is dat niet alleen de kracht van de storm maar ook andere stormkarakteristieken zoals windrichtingen en stormbanen in de onderscheiden perioden behoorlijk verschillen. Aangezien de golfgroei plaatsvindt op een ruimteschaal van honderden kilometers en de klimaatveranderingen zich manifesteren op een kleinere schaal binnen 100 km is een "redelijk" verband tussen lokale golfhoogten en opzetten tijdens storm discutabel geworden, zeker als voor het verkrijgen van 10^{-4} -waarden nogmaals geëxtrapoleerd moet worden.

De bovengenoemde meest waarschijnlijke verklaring lijkt ondersteund te worden door windklimaatstudies (lit. 13), waarvan in bijlage 8.7 een resultaat gepresenteerd wordt. Hierin is te zien dat in de periode 1950-1964 op Schiphol de windsnelheden hoger zijn dan in de periode 1979-1989, terwijl dit niet het geval is op Terschelling.

Uit het bovenstaande en het feit dat aan de klimaatcorrecties slechts een geringe betrouwbaarheid toegekend mag worden, mogen eventuele klimaatcorrecties slechts met grote voorzichtigheid toegepast worden. Er is daarom gekozen om de toepassing van klimaatcorrecties te beperken tot het afronden naar boven bij de keuzen tussen de methoden met of zonder NESS met variabele α of vaste α (en de grootte van de vaste α).

Zo wordt als vaste waarde voor α de waarde 2,62 gebruikt voor de gehele periode 1964-1993 in plaats van 3,00 (die tot lagere 10^{-4} -waarden leidt). Dit is gedaan als klimaatcorrectie voor de periode 1964-1993, die zoals blijkt uit de opzetten van tabel 8.7, klimatologisch gezien een relatief rustige periode vormde.

8.5 Samenvatting resultaten

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste resultaten van de statistiek en van de fysisch-numerieke modellen (hoofdstuk 6) samengevat en gepresenteerd in de bijlagen 8.8 en 8.9. Deze bijlagen zijn hetzelfde, echter met dit verschil dat in bijlagen 8.8 de statistische resultaten gebaseerd zijn op meetdata, in bijlage 8.9 op meetdata aangevuld met NESS gegevens.

Meetdata en statistische resultaten

De statistische resultaten zijn in de bijlagen 8.8 en 8.9 gepresenteerd in grafiekvorm met op de horizontale as de significante golfhoogten en op de verticale as de overschrijdingsfrequenties in aantal keren per jaar. In de bijlagen zijn de volgende statistische resultaten opgenomen:

- de gebruikte geselecteerde data, weergegeven als rondjes. In bijlage 8.8 zijn dit de meetdata, in 8.9 de meetdata + NESS;
- de conditionele 2-parameter Weibull-overschrijdingslijn op basis van de methode met de variabele α (krommen a) (hoofdstuk 8.2) met

- de daarbij horende met de bootstrap methode bepaalde 90% betrouwbaarheidsbanden (krommen ae)
- de conditionele 2-parameter Weibull-overschrijdingslijn op basis van de methode met de vaste α ($\alpha = 2,62$) (krommen b) (hoofdstuk 8.2) met de daarbij behorende 90% betrouwbaarheidsbanden (krommen be).

Betrouwbaarheidsinterval

De 90%-betrouwbaarheidsbanden zijn bepaald met de bootstrap methode (lit. 23). Dit is een zeer rekenintensieve procedure en daarom is voor de bijlagen 8.8 en 8.9 alleen het betrouwbaarheidsinterval voor de 10^{-4} extremen berekend en is voor de andere frequenties eenvoudigheidshalve een Weibull-verdeling met gelijke α gefit. In volgende bijlagen volgt een completere weergave van de betrouwbaarheidsbanden.

Uit de bijlagen blijkt dat de betrouwbaarheid voor de methode met de vaste α veel beter is dan voor de variabele α . Dit komt doordat bij de methode met de vaste α één van de twee parameters (α en σ) vooraf bekend wordt verondersteld, hetgeen resulteert in een toegenomen betrouwbaarheid. Dit is echter een te gunstige veronderstelling, omdat zodoende de onzekerheid omtrent de werkelijke waarde van α niet wordt meegenomen.

Het is daarom reëler om ook voor de vaste α rekening te houden met de betrouwbaarheid behorende bij de variabele α .

Als betrouwbaarheidsgebied is in dit rapport steeds gebruik gemaakt van 90%-banden. Eventueel kan als zeer globale schatting gevallen van andere, niet al te extreme, intervalbreedten van een normale verdeling worden uitgegaan. In dat geval is bijvoorbeeld het 95%-interval ongeveer 1,2 maal zo breed!

Resultaten op basis van fysisch-numerieke modellen

De fysische resultaten worden gepresenteerd door de twee lijnen c en d. De lijnen zijn bepaald op basis van vaste verhoudingen tussen significante golfhogten en waterdiepten (hoofdstuk 6).

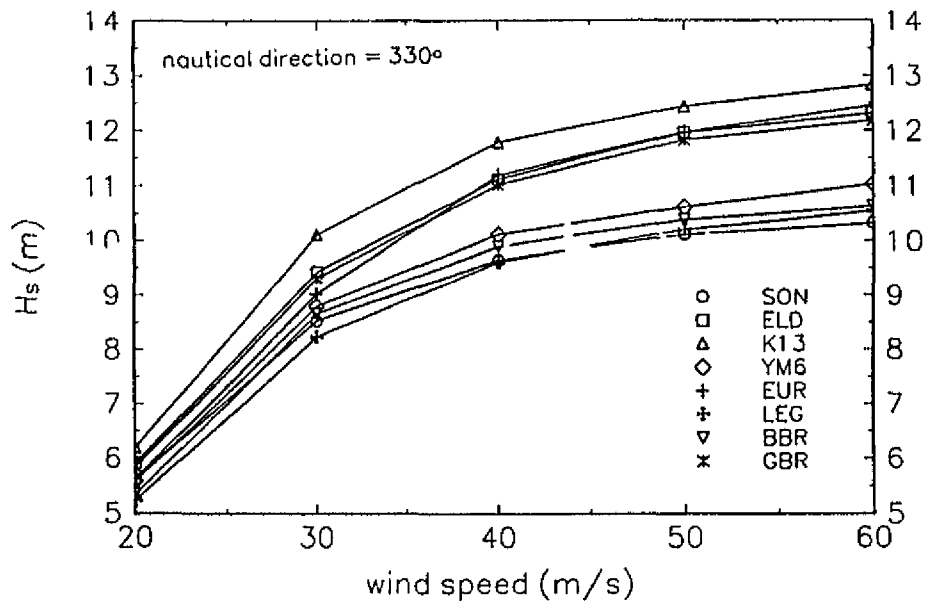
De waterdiepten met daarbij horende overschrijdingsfrequenties zijn gebaseerd op de resultaten van het onderzoek naar de basispeilen langs de Nederlandse kust (lit. 1).

De bovengenoemde vaste verhoudingen worden nagenoeg geheel bepaald door de setting van de modelparameters. De krommen c en d zijn op de volgende settings gebaseerd :

- een extreme setting van parameters voor golfgroei, bodemwrijving en breken zodat een maximum voor de Hs-max bepaald wordt, uitgevoerd bij een windsnelheid van 50 m/s (lijnen c);
- op een standaardsetting waarbij de bovengenoemde parameters zoveel mogelijk overeenkomen met verwachtingswaarden, dus zoveel mogelijk aansluitend bij de praktijk, ook bij een windsnelheid van 50 m/s (lijnen d).

De windsnelheid van 50 m/s is in overleg met het KNMI aangehouden als een bovengrens onder de meest extreme omstandigheden. Tevens blijkt uit onderstaande figuur 8.8 dat een verdere verhoging van de windsnelheid van 50 m/s, bij dezelfde parameter setting, nagenoeg dezelfde golfhogten opleveren.

Figuur 8.8
Toename golfhoogte bij toenemende windsnelheid (uniform windveld (lit. 7))



Voor de bepaling van de golven via bovengenoemde verhoudingen zijn de waterstanden ter plaatse van de golfmeetlokaties nodig. Omdat deze golfmeetlokaties niet overeenkomen met de voor de basispeilen gebruikte waterstandslokaties zijn de volgende correcties toegepast :

- een correctie voor het verschil in hoogwaterstanden van het astronomisch getij;
- een correctie voor het verschil in opzet welke t.p.v. de kust (lokaties basispeilen) hoger is dan meer op zee (golfmeetlokaties) (lit. 3).

Vergelijking H_s -max met metingen en statistiek

In dit onderdeel worden de resultaten van de statistiek vergeleken met de resultaten verkregen met fysisch-numerieke modellen (bijlagen 8.8 en 8.9). Voor een goede overeenstemming van meetgegevens, dan wel meetgegevens + NESS-gegevens, met de fysische modelresultaten zou de extrapolatie van de gegevens (krommen a en b) in het extreme extrapolatiegebied (10^{-5} - 10^{-8} keer per jaar) van dezelfde orde van grootte moeten zijn en ongeveer dezelfde helling moeten hebben als de H_s -max lijn voor de standaardsetting (lijn d).

Uit de bijlagen 8.8 en 8.9 kan dan geconcludeerd worden :

- dat er voor YM6 een bijzonder goede overeenstemming bestaat;
- dat er voor K13 en ELD een redelijke overeenstemming bestaat.
- dat er voor EUR en SON geen overeenstemming lijkt te bestaan. De extrapolatie van de meetgegevens van EUR geven lagere waarden dan de modellen. Voor SON geldt juist het omgekeerde.

De fysische modellen geven bij EUR onder zeer extreme omstandigheden relatief hoge golven. Mogelijk wordt de bodemwrijving in het relatief ondiepe voortraject ondanks de extreme setting toch nog enigszins

onderschat. Anderzijds is het mogelijk dat er in de meetgegevens het effect van een combinatie van variabele windrichtingen en effectieve strijklengten zit waardoor de golfhoogten lager blijven.

Uit een verificatie van het gebruikte fysisch-numerieke model met stormen uit 1990 en 1993 blijkt dat de berekende golven bij SON te laag zijn. Het model lijkt dan ook voor kwantitatieve berekeningen van golfhoogten ter plaatse van SON niet goed toereikend.

8.6 Vaststelling extreme significante golfhoogten met een gemiddelde overschrijdingskans van 10^{-4} per jaar

In de hoofdstukken 8.2 t/m 8.4 zijn voor het vaststellen van de 10^{-4} -waarden van de golfhoogte langs de Nederlandse kust verschillende varianten ontwikkeld :

- in hoofdstuk 8.2 extrapolatie van meetgegevens (1979-1993) met variabele en vaste vormparameter α ;
- in hoofdstuk 8.3 extrapolatie van meetgegevens uitgebreid met NESS-gegevens (1964-1993) met variabele en vaste α ;
- in hoofdstuk 8.4 zijn klimaatcorrecties gepresenteerd met toepassing op de extrapolaties van de meetgegevens en op de meetgegevens uitgebreid met NESS-gegevens.

In hoofdstuk 8.4 is beargumenteerd dat klimaatcorrecties bij de huidige kennis met grote zorgvuldigheid toegepast moeten worden. Aangegeven is dat op basis van de klimaatcorrecties toepassing van de vaste $\alpha=2,62$ de voorkeur verdient boven een vaste $\alpha=3,00$.

In hoofdstuk 8.3 is beargumenteerd dat een correctie van de NESS-gegevens op basis van de lineaire verbanden tussen meetgegevens en NESS-gegevens de voorkeur verdient boven een correctie op basis van een vergelijking van de overschrijdingsfrequenties. Daarnaast is beargumenteerd dat een vaste vormparameter $\alpha = 2,62$ ook tot betere resultaten leidt dan $\alpha = 3,00$ op basis van de wijze waarop de NESS-correctie is toegepast.

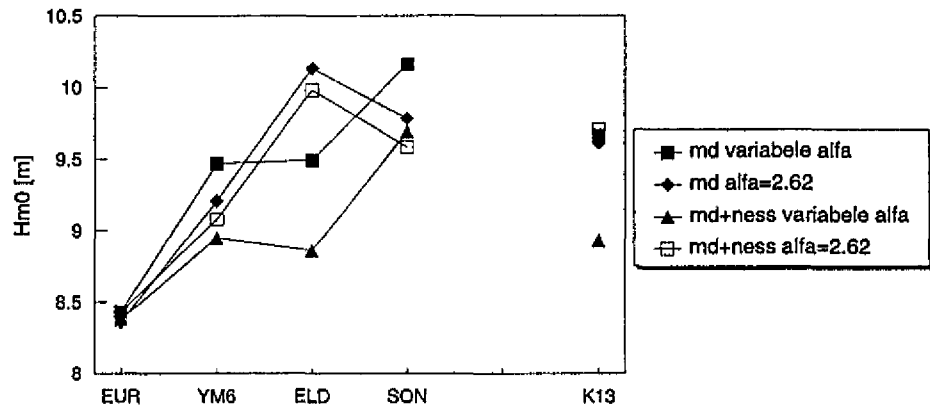
Op basis van bovenstaande argumenten blijven er een viertal varianten over die in de onderstaande tabel 8.10 zijn gepresenteerd.

De varianten zijn in onderstaande figuur 8.9 grafisch weergegeven

.....
Tabel 8.10
 Varianten met 10^{-4} -waarden in meters

meetstation	meetdata		meetdata + NESS	
	α vrij	α vast	α vrij	α vast
SON	10,16	9,78	9,69	9,58
ELD	9,49	10,13	8,86	9,98
K13	9,66	9,61	8,93	9,70
YM	9,47	9,21	8,95	9,08
EUR	8,43	8,36	8,38	8,43

Figuur 8.9
 Extreme (10^4) golfhoogten uit meetdata en metingen + NESS ; vier varianten met variabele en vaste α



In hoofdstuk 8.2 zijn de resultaten met de variabele α vergeleken met die van de vaste α . Daarbij is beargumenteerd dat op basis van fysieke inzichten de voorkeur gegeven dient te worden aan een vaste α .

De uiteindelijke keuze valt dan ook op de variant van meetdata + NESS met vaste α . Ook deze keuze is gebaseerd op fysieke inzichten, namelijk:

- de geringere 10^{-4} waarde van SON, in relatie met die van K13, is meer realistisch;
- het geringere verschil tussen ELD en K13 is realistischer;
- de lagere waarde voor YM6 is realistischer.

Statistisch gezien wordt ook de voorkeur gegeven aan een langere meetreeks, met meer waarnemingen, ondanks het feit dat de NESS-gegevens minder nauwkeurig zijn.

Dit leidt tot definitieve resultaten zoals gepresenteerd in tabel 8.11, waarin ook de waarden voor 10^0 , 10^{-1} , 10^{-2} en 10^{-3} keer per jaar gepresenteerd zijn.

Ook zijn in deze tabel de parameters van de conditionele Weibull-verdeling gegeven, namelijk de drempelgolfhoogte, α , σ en de gemiddelde jaarlijkse overschrijding van de drempelgolfhoogte P_{cond} .

Tabel 8.11
 Definitieve resultaten en aanbevolen waarden voor de golfhoogten langs de Nederlandse kust

meet-station	drempel [m]	α	σ	P_{cond}	golfhoogten H_{m0} [m]				
					10^0	10^1	10^2	10^3	10^4
SON	3,7	2,62	3,692	7,45	5,63	6,99	8,01	8,86	9,6
ELD	4,0	2,62	3,832	7,47	5,92	7,31	8,37	9,24	10,0
K13	4,3	2,62	3,676	7,29	5,93	7,19	8,17	8,99	9,7
YM6	3,9	2,62	3,464	7,29	5,50	6,71	7,64	8,42	9,1
EUR	3,7	2,62	3,188	7,19	5,11	6,22	7,07	7,78	8,4

In tabel 8.12 zijn de geschatte boven- en ondergrenzen gegeven van het 90%-betrouwbaarheidsinterval van deze extreme golfhoogten.

De overschrijdingskrommen van de gemeten stormmaxima over de periode 1979-1993, aangevuld met gecorrigeerde NESS maxima over 1964-1978 en de uiteindelijk daarbij gekozen fit volgens de Weibull-verdeling en het 90%-betrouwbaarheidsgebied daarvan, zijn (inclusief de metingen; de punten) voor elk station weergegeven in de bijlagen 8.10.

Tabel 8.12

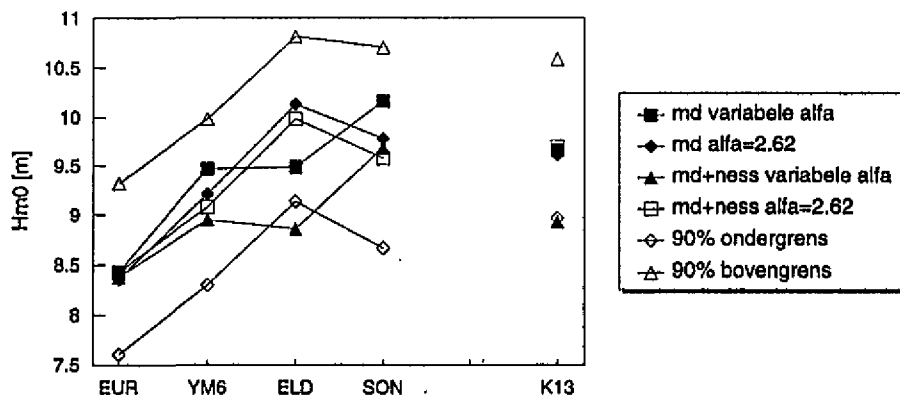
Grenzen van het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de extreme golfhoogten

meet-station	ondergrens (ond) en bovengrens (bov) van het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de extreme golfhoogten H_{m0} [m]									
	10^0		10^1		10^2		10^3		10^4	
	ond	bov	ond	bov	ond	bov	ond	bov	bov	ond
SON	5,47	5,78	6,63	7,30	7,48	8,59	8,10	9,70	8,67	10,70
ELD	5,77	6,04	7,02	7,57	7,90	8,84	8,57	9,84	9,14	10,81
K13	5,80	6,05	6,92	7,44	7,77	8,63	8,43	9,62	8,97	10,58
YM6	5,36	5,63	6,44	6,96	7,20	8,09	7,80	9,17	8,30	9,98
EUR	4,97	5,24	5,98	6,46	6,64	7,51	7,15	8,43	7,61	9,32

Om een beeld te geven van de onderlinge verschillen van de vier varianten van tabel 8.10 in relatie tot de bovenstaande 90% betrouwbaarheidsintervallen, is in figuur 8.10 nogmaals figuur 8.9 gepresenteerd met daarin tevens de betrouwbaarheidsintervallen. Hieruit blijkt dat de varianten, behalve die van de meet- en NESS-gegevens met variabele σ , ruimschoots binnen de betrouwbaarheidsintervallen liggen.

Figuur 8.10

Extreme (10^4) golfhoogten uit meetdata en metingen + NESS ; vier varianten met variabele en vaste α , inclusief de 90% betrouwbaarheidsintervallen.



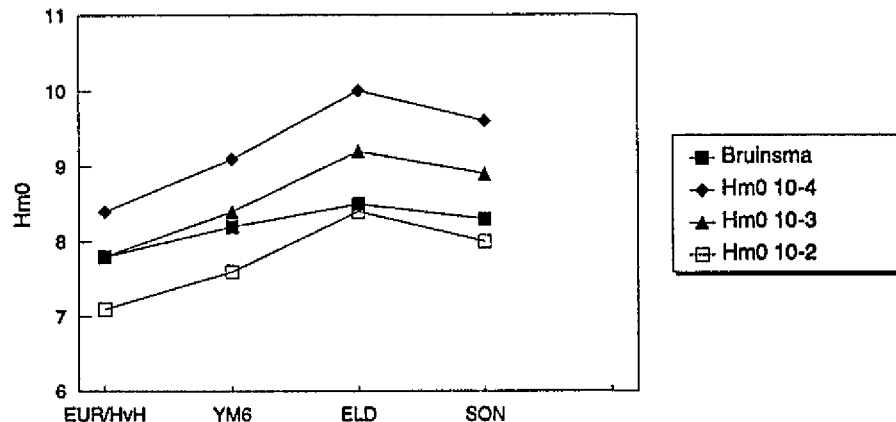
Vergelijking met de methode Bruinsma

Een zuivere vergelijking van de eindresultaten met de resultaten van de methode Bruinsma is niet goed te maken. De eindresultaten van dit onderzoek zijn met behulp van marginale statistiek bepaald en verkregen door alle windrichtingssectoren bij elkaar te nemen (omnidirectioneel). De methode Bruinsma geeft echter een verwachtingswaarde van de significante golfhoogten bij een waterstand met een bepaalde overschrijdingsfrequentie (conditionele statistiek), waarbij is uitgegaan van een maatgevende smalle windrichtingssector.

Bovendien is de methode Bruinsma uitgegaan van de overschrijdingsfrequenties van waterstanden uit de "Deltarapporten". Inmiddels zijn er nieuwe overschrijdingslijnen verschenen (lit. 3). Hieruit blijkt dat voor de noordkust (Den Helder tot Rottum) de waterstanden bij dezelfde overschrijdingsfrequenties veel lager (ter plaatse van West-Terschelling 1 meter) zijn. De betrekkingen tussen de verwachte significante golfhoogten en de waterstanden (stormvloedpeilen) van de methode Bruinsma zijn daardoor voor de noordkust niet meer goed bruikbaar, gezien de wijze waarop deze tot stand gekomen zijn.

In figuur 8.11 zijn resultaten gepresenteerd van beide methoden. Van dit onderzoek zijn dat de 10^{-4} , de 10^{-3} en de 10^{-2} waarden van de golfhoogten uitgezet. Van de methode Bruinsma zijn dat de verwachte golfhoogten die optreden bij waterstanden met een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} keer per jaar weergegeven.

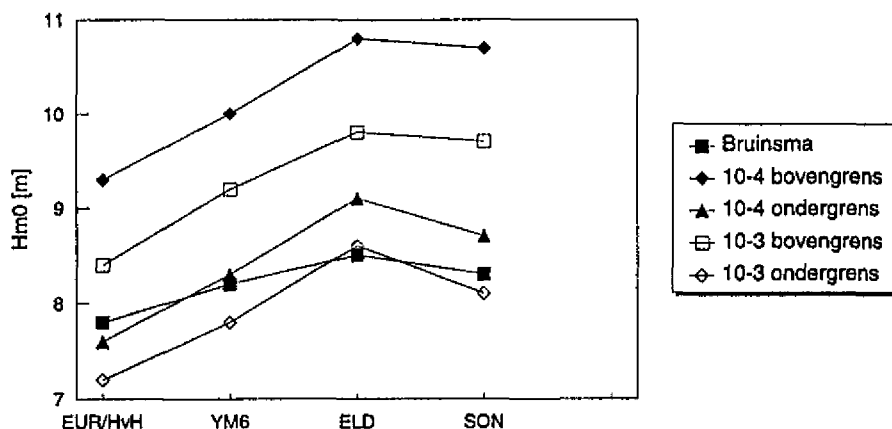
.....
Figuur 8.11
 Resultaten van het onderhavige onderzoek en van de methode Bruinsma



Uit figuur 8.11 blijkt dat de waarden van de methode Bruinsma tussen 10^{-3} en 10^{-2} waarden van dit onderzoek liggen.

In figuur 8.12 zijn de waarden van de methode Bruinsma nogmaals uitgezet samen met de 10^{-4} en 10^{-3} waarden en de corresponderende 90% betrouwbaarheidsintervallen.

Figuur 8.12
 Waarden van de methode Bruinsma en de 90% betrouwbaarheidsintervallen van de 10^3 en 10^4 -waarden.



Uit figuur 8.12 blijkt dat de "Bruinsma waarden", behalve voor EUR/HvH, buiten de 90% betrouwbaarheidsintervallen van de 10^4 -waarden liggen en redelijk samenvallen met de ondergrens van de 10^3 betrouwbaarheidsintervallen.

Bij een volledige koppeling van waterstanden en golven via de wind hoort bij een overschrijdingsfrequentie van de waterstand van 10^4 keer per jaar een verwachte golfhoogte met een overschrijdingsfrequentie van eveneens 10^4 . Aangezien de koppeling niet volledig is, is de overschrijdingsfrequentie van de verwachte golfhoogte echter hoger. Echter de waarden van de methode Bruinsma voor de noordelijke stations ELD en SON lijken vergeleken met de resultaten van dit onderzoek aan de lage kant.

9. Extreme golfhoogten per richtingsector

9.1 Inleiding

Uit plots van de maxima van stormen, uitgezet tegen de richting ('richtingsrozen'- bijlagen 9.1) blijkt duidelijk dat er afhankelijkheid bestaat tussen de wind- of golfrichting en de maxima van golfhoogten tijdens storm.

Een goede weergave van deze afhankelijkheid in de verwachtingswaarde van extreme golfhoogten vereist een twee-dimensionale aanpak van de statistiek. Hoewel dit onderdeel van het project HYDRA slechts marginale, één-dimensionale statistiek behelst, is deze richtingafhankelijkheid toch zo belangrijk dat hier alvast enige resultaten worden gegeven van richtingafhankelijke extreme golfhoogten.

Daartoe zijn enkele schematisaties, keuzen en vereenvoudigingen nodig welke in het hiernavolgende zullen worden toegelicht. Vervolgens zullen enkele resultaten worden gepresenteerd.

9.2 Keuze richting en methode

Uit eerdergenoemde richtingsrozen blijkt dat golfrichtingen duidelijker samenhangen met maximale golfhoogten dan windrichtingen. Dit is ook logisch want vrijwel altijd draait de wind gedurende de storm en het is betrekkelijk toevallig in welke fase van het draaien de maximale golfhoogte optreedt. De golfrichting hangt mede af van het voorafgaande verloop van de windrichting; de golfrichting verandert daardoor langzamer en is stabielier.

Desondanks is toch gekozen voor de **w**indrichting, omdat windrichting als selectie criterium zowel goed bruikbaar is voor golven als voor waterstandsverhogingen.

Bovendien sluit selectie op windrichting beter aan op de praktijk, waarin vrijwel altijd met windrichtingsectoren wordt gewerkt.

In aansluiting op de voorgaande 'omnidirectionele', d.i. alle richtingen bevattende, statistiek zal ook de statistiek per richting worden gebaseerd op de maxima van stormen, geselecteerd met de zichtduur selectie uit de meetreeksen over de periode 1979-1991 van de 5 hoofdstations. De periode eindigt, anders dan bij omnidirectioneel, in 1991 omdat ten tijde van het onderzoek voor de jaren 1992-1993 nog niet voor alle stations gemeten windrichtingen beschikbaar waren.

De schattingsmethode van de extreme (10^{-4}) golfhoogten is dezelfde als bij omnidirectioneel, dus met een vaste waarde voor de Weibull-parameter α van 2,62 voor alle meetstations en per meetstation, echter met een vaste drempelwaarde met een overschrijdingskans van ca. 7,5 maal per jaar.

Bij dit deelonderzoek is geen gebruik gemaakt van het mogelijk aanvullen van de meetgegevens met NESS-waarden over de periode 1964-1978. Deze modelschattingen zijn minder nauwkeurig, niet alleen in maximale golfhoogte maar ook in windrichting. Bovendien is de bij de omnidirectionele schatting gebruikte bias-correctie waarschijnlijk richtingafhankelijk, waarmee een extra bron van onzekerheden wordt geïntroduceerd. Dit alles maakt waarschijnlijk dat de toegenomen lengte van de beschouwde periode, anders dan bij omnidirectioneel, onvoldoende opweegt tegen de grotere onnauwkeurigheid van de NESS-reeksen.

Als maat voor de windrichting is gekozen voor de opgetreden windrichting ten tijde van het maximum van de golfhoogte. Dit is dus de richting van de windkracht, die op het moment van de maximale golfhoogte, invloed uitoefent op het golfveld. Deze windrichting zal niet altijd geheel overeenkomen met de gemiddelde richting van de windkracht, die het golfveld heeft opgebouwd en ook lang niet altijd met de golfrichting. De momentane windsnelheid ten tijde van maximale golfhoogte is echter een voor de hand liggende keuze, die aansluit bij de praktijk.

De nauwkeurigheid van de schatting wordt nadelig beïnvloed door de keuze van de momentane richting als selectie. Het is bijvoorbeeld heel wel mogelijk dat bij een typische zuidwesterstorm de windrichting op het geselecteerde moment van maximale golfhoogte ondertussen naar het westen is gedraaid!

De geldigheid wordt beïnvloed door het feit dat alleen naar maxima wordt gekeken. Voor of na zo'n maximum kunnen ook zeer grote golfhoogten voorkomen met mogelijk een andere richting. De berekende extreme golfhoogten gelden bijgevolg alleen voor maxima van stormen!

Voorts is er voor gekozen de schattingen van de extreme golfhoogten per richtingsector te beschouwen als een **onderverdeling** van de omnidirectionele schatting en dus niet als onafhankelijke schattingen. Dit houdt in dat de som van de directionele schattingen, die vanwege onnauwkeurigheden in de schattingsprocedure niet gelijk zal zijn aan de omnidirectionele schatting, door vereffening wel gelijk zal worden gemaakt aan omnidirectioneel, althans voor de schattingen op het 10^{-4} niveau.

9.3 Werkwijze

De breedte van de richtingsectoren beïnvloedt de schatting van de extreme golfhoogten. Bij brede sectoren mogen vrij nauwkeurige, maar minder afhankelijke extremen worden verwacht, terwijl bij smalle sectoren de veranderingen beter zullen worden gevolgd, maar de nauwkeurigheid minder is. Er moet dus worden onderzocht wat de optimale breedte is.

Om te beginnen zijn voor allerlei sectoren met verschillende breedten de extreme golfhoogten berekend. Dit is gedaan door conditionele Weibull-verdelingen te fitten voor datasets met maxima van stormen met een windrichting binnen de beschouwde sector en weer gemiddeld over drempelwaarden binnen een soortgelijk drempeltraject als bij omnidirectioneel.

In plots (bijlagen 9.2) zijn de resultaten weergegeven van de schattingen van de 10^{-4} golfhoogte voor richtingsectoren met hoofdrichtingen (middens van sectoren) tussen ZZO via W tot NNO ($160^\circ \rightarrow 60^\circ$ per 10°) en sectorbreedten van respectievelijk 10° , 30° en 50° . Een sectorbreedte van 10° is de kleinst mogelijke sectorbreedte omdat de windrichtingen zijn afgerond op veelvoud van 10° .

Bij een sectorbreedte van 10° zijn de schattingen voor elke hoofdrichting onafhankelijk. Voor grotere sectorbreedten worden overlappende sectoren gebruikt en zijn de schattingen (sterk) onderling afhankelijk. Deze schattingsmethode met overlappende sectoren werkt als een gladstrijkfiter. Er zijn ook nog schattingen gemaakt met nog grotere sectorbreedten, tot 130° , maar daarbij bleek het verloop van de extreme golfhoogten over de richtingen te sterk te worden afgevlakt.

Uit de plots blijkt dat bij de smalle sectoren van 10° , zonder overlap, het gebrek aan nauwkeurigheid door de kleine aantallen maxima binnen een sector een grote rol speelt en dat sectoren van 70° eigenlijk te breed zijn, waardoor de gevoeligheid voor verandering te klein is. De sectorbreedte zal daarom ongeveer 50° moeten zijn en in dat geval ligt de keuze van sectoren met hoofdrichtingen **Z, ZW, W, NW, N en NO** voor de hand. De extreme golfhoogten voor deze sectoren met een breedte van 45° kunnen, vanwege de afronding op 10° echter niet rechtstreeks worden geschat. Dit kan echter in de toch al noodzakelijke vereffening worden verrekend.

Daarbij is de volgende werkwijze gevolgd. In de plots van bijlage 9.2, waarin voor verschillende sectorbreedten de relatie tussen sectormidden van de windrichting en de 0,0001-waarde van de golfhoogte wordt gegeven, is een vloeiende lijn getrokken voor een sector breedte van bij benadering 45° . Daarbij is ook gelet op het verloop bij andere breedten en met de schattingsnauwkeurigheden.

Van deze lijn zijn de extreme (10^{-4}) golfhoogten afgelezen bij de hoofdrichtingen $180^\circ, 225^\circ, \dots$ t/m 45° . Hiermee is voor elke sector de parameter σ van een conditionele Weibull-verdeling berekend; immers de drempelwaarde (als bij omnidirectioneel) en α (vaste waarde 2,62) zijn bekend. Met deze Weibull-verdelingen per sector is voor elke sector de overschrijdingsfrequentie berekend van de extreme omnidirectionele (10^{-4})-golfhoogte. Deze frequenties zijn gesommeerd en waar deze som groter of kleiner was dan 10^{-4} zijn de verdelingen per sector naar evenredigheid met de berekende frequenties aangepast.

De aldus berekende verdelingen zijn voor de 5 hoofdstations en voor de 6 zeewindsectoren weergegeven in tabel 9.1. Ter illustratie zijn ook golfhoogten bij enkele andere, minder extreme overschrijdingsfrequenties gegeven.

Vermeld moet nog worden dat de verrichte vereffening er alleen voor zorgt dat de som van de frequenties over de richtingen klopt met die van de omnidirectionele extreme golfhoogte (10^{-4}). Bij de drempel klopt de sommatie per definitie ook maar voor de tussenliggende waarden niet. De verschillen bij andere frequenties zijn echter niet erg groot, althans niet op de golfhoogteschaal.

9.4 Resultaten

Bij het meetstation SON blijken volgens tabel 9.1 slechts 3 sectoren merkbaar bij te dragen aan extreme golfhoogten en daarvan levert de sector met de hoofdrichting NW weer verreweg het grootste aandeel. Dit kan ook nauwelijks anders gezien de geografische ligging van dit meetpunt. Bij EUR en YM6 is de maatgevende sector ook NW, maar W is ook groot en er zijn merkbare bijdragen uit ZW en N. Bij ELD zijn de sectoren W en NW beide groot en is er een kleine bijdragen uit N.

Ook bij K13 is NW de belangrijkste sector, maar bij dit station zijn de richtingen N en W ook belangrijk en leveren de sectoren ZW en NO ook merkbare bijdragen. De richtingsverdeling is bij dit meetstation duidelijk het vlakst. Dit is natuurlijk ook te verwachten, want bij dit ver van de kust gelegen station is de landinvloed gering en kunnen vanuit alle richtingen flinke golfhoogten worden opgewekt.

In bijlage 9.3 worden de overschrijdingskrommen per windrichtingsector in figuurvorm weergegeven, apart voor elk meetstation.

Tabel 9.1

Weibull-fits van extreme waarden per richtingsector. Vaste α (2,62).

windrichting- sector midden van-tot		P_{COND}	σ	golfhoogten H_{m0} [m] bij enkele kwantielen				overschrijdings- frequentie omnidirectionele 10^4 waarde
				10^1	10^2	10^3	10^4	
Station SON ; drempel 3,7 m ; duur 12,23 jaar								
180°	158-202	0,00	-					
225°	203-247	0,35	2,482	4,25	5,04	5,67	6,20	<< 0,01
270°	248-292	3,05	3,419	6,15	7,17	7,99	8,70	0,03
315°	293-337	2,85	3,815	6,64	7,83	8,78	9,59	0,96
360°	338-022	1,20	3,338	5,55	6,66	7,52	8,25	0,01
45°	23-67	0,00	-					
OMNIDIRECTIONEEL		7,45	3,692	6,99	8,01	8,86	9,6	1,00
Station ELD ; drempel 4,0 m ; duur 10,02 jaar								
180°	158-202	0,00	-					
225°	203-247	0,80	3,330	5,48	6,60	7,47	8,20	< 0,01
270°	248-292	4,27	3,800	6,97	8,07	8,97	9,75	0,44
315°	293-337	1,70	3,952	6,62	7,91	8,93	9,79	0,54
360°	338-022	0,60	3,636	5,58	6,91	7,92	8,75	0,02
45°	23-67	0,10	2,742	4,00	5,07	5,85	6,50	<< 0,01
OMNIDIRECTIONEEL		7,47	3,832	7,31	8,37	9,24	10,0	1,00
Station K13 ; drempel 4,3 m ; duur 13,00 jaar								
180°	158-202	0,70	3,000	5,33	6,24	6,97	7,60	<< 0,01
225°	203-247	1,20	3,560	6,11	7,24	8,14	8,90	0,06
270°	248-292	2,49	3,664	6,63	7,72	8,60	9,35	0,31
315°	293-337	1,50	3,780	6,48	7,68	8,64	9,45	0,45
360°	338-022	0,90	3,721	6,10	7,35	8,33	9,15	0,17
45°	23-67	0,50	3,474	5,52	6,73	7,67	8,45	0,01
OMNIDIRECTIONEEL		7,29	3,676	7,19	8,17	8,99	9,7	1,00
Station YM6 ; drempel 3,9 m ; duur 12,43 jaar								
180°	158-202	0,30	2,670	4,44	5,32	6,01	6,60	<< 0,01
225°	203-247	1,70	3,243	5,74	6,72	7,52	8,20	0,03
270°	248-292	2,89	3,469	6,27	7,30	8,13	8,85	0,41
315°	293-337	1,40	3,587	6,02	7,19	8,11	8,89	0,51
360°	338-022	1,00	3,360	5,58	6,69	7,57	8,30	0,05
45°	23-67	0,00	-					
OMNIDIRECTIONEEL		7,29	3,464	6,71	7,64	8,42	9,1	1,00
Station EUR ; drempel 3,7 m ; duur 13,00 jaar								
180°	158-202	0,60	2,681	4,60	5,45	6,13	6,70	<< 0,01
225°	203-247	1,90	2,958	5,36	6,23	6,94	7,55	0,02
270°	248-292	2,34	3,162	5,69	6,63	7,40	8,05	0,26
315°	293-337	1,25	3,342	5,58	6,68	7,54	8,27	0,64
360°	338-022	0,80	3,158	5,15	6,22	7,05	7,75	0,08
45°	23-67	0,30	2,767	4,33	5,32	6,07	6,70	<< 0,01
OMNIDIRECTIONEEL		7,19	3,188	6,22	7,07	7,78	8,4	1,00

10. Golfperioden bij extreme golfhoogten

10.1 Inleiding

Zoals in de inleiding (hoofdstuk 1) vermeld is, is het doel van dit rapport om op uniforme wijze te komen tot de enkelvoudige statistiek van golfhoogten op relatief diep water. Echter voor het toetsen van de waterkeringen zijn, met name bij zeedijken, behalve golfhoogten ook golfperioden noodzakelijk. Zo zijn voor de bepaling van kruinhoogten de piekperioden als randvoorwaarde nodig en voor vermoeïngsberekeningen aan taluds uitgevoerd in asfalt, gemiddelde perioden. Hieraan zal dan ook in het vervolgonderzoek naar de golfrandvoorwaarden uitgebreid aandacht besteed worden. Om, vooral voor ontwerpers, reeds nu, enige golfperiode-informatie te verschaffen is dit hoofdstuk aan het rapport toegevoegd. De informatie bestaat uit verwachtingswaarden van gemiddelde golfperioden en piekperioden, bij extreme golfhoogten. De methode die daarbij wordt gebruikt, bestaat uit het bepalen van een relatie tussen golfhoogte en golfperiode, waarmee een verwachtingswaarde kan worden bepaald voor de golfperiode, behorend bij de eerder gevonden extreme golfhoogten.

10.2 Gemiddelde golfperioden

Voor het onderzoek naar de verwachtingswaarden van de gemiddelde golfperioden bij extreme golfhoogten is uitgegaan van de golfperiode parameter Tm_{02} uit de HYDRA-golfbestanden, zie hoofdstuk 4. Vervolgens is, na vooronderzoek, uitgegaan van de relatie:

$$Tm_{02} = a * Hm_0^b$$

Deze relatie is toegepast op getallen paren van Tm_{02} - Hm_0 , welke op twee manieren geselecteerd zijn, namelijk:

1. De Tm_{02} -waarden behorend bij (zelfde tijdstip) de maxima van Hm_0 tijdens stormen, welke gebruikt zijn voor de extreme waarden statistiek van Hm_0 (1979-1993).
2. De Tm_{02} - Hm_0 getallen paren van 3-uurlijkse waarnemingen (1979-1993), met een drempel voor de Hm_0 -waarden. Zo'n drempel is nodig omdat bij lage golfhoogten de relatie tussen golfhoogte en golfperiode zeer onduidelijk wordt door deininginvloed. Als voorbeeld hiervan dient bijlage 10.1, welke vergelijkbaar is met bijlage 10.3c, waarin een drempel, waarmee de invloed van deining zo veel mogelijk geëlimineerd is, is toegepast.

Voor het fitten is gebruik gemaakt van de lineaire regressie van de logaritmische transformatie met behulp van de kleinste kwadraten methode.

De resultaten op basis van de eerste selectiemethode zijn gepresenteerd in de bijlagen 10.2 en van de tweede in bijlagen 10.3 In de volgende tabel 10.1 zijn de resultaten van de coëfficiënten a en b alsmede gemiddelde perioden behorend bij $Hm_0 = 10m$ gepresenteerd.

Tabel 10.1
De resultaten van a en b alsmede Tm_{02} bij $Hm_0 = 10$ meter.

	bij Hm_0 van stormmaxima			bij Hm_0 3-uurlijks + drempel		
	b	a	Tm_{02} bij $Hm_0=10m$ [sec]	b	a	Tm_{02} bij $Hm_0=10m$ [sec]
SON	0,477	3,68	11,1	0,488	3,60	11,1
ELD	0,470	3,52	10,4	0,478	3,47	10,4
K13	0,421	3,69	9,8	0,454	3,53	10,0
YM6	0,434	3,66	9,9	0,459	3,56	10,2
EUR	0,400	3,71	9,3	0,437	3,43	9,4

Uit de tabel blijkt dat de waarden voor beide selectie-methoden goed met elkaar overeenkomen. De exponentiële coëfficiënten (b-waarden) liggen tussen 0,40 - 0,48 en tussen 0,44 - 0,49 en de lineaire coëfficiënten (a-waarden) tussen 3,5 - 3,7 en tussen 3,4 - 3,6

De variatie in de b-waarden is gering, de vorm van de krommen zijn dan ook nagenoeg gelijk (vergelijk bijlagen 10.3^a en 10.3^b). Dit geeft een mogelijkheid om enige samenhang tussen de relaties van de verschillende meetstations aan te brengen (geografische samenhang), namelijk door voor alle stations een vaste waarde voor b te kiezen en per station een verschillende waarde voor a.

In de praktijk wordt vaak gebruik gemaakt van de veronderstelling dat de gemiddelde golfsteilheid constant is. Op basis van fysische gronden volgt dan dat de golfperiode evenredig is met de wortel uit de golfhoogte. Dit lijkt niet strijdig met de waarden van b die hiervoor zijn gevonden, welke slechts weinig verschillen van 0,5.

Daarom is gekozen voor de relatie :

$$Tm_{02} = a * \sqrt{Hm_0}$$

De waarde van a wordt voor elk station apart geschat. Dit is niet gedaan met behulp van de kleinste kwadraten methode van de logaritmen, maar door de relatie door het punt van de gemiddelde waarden van de golfhoogte Hm_0 en de golfperiode Tm_{02} (het zwaartepunt) uit de datasets (van de bijlagen 10.3 ; de 3-uurlijkse golfhoogten boven een onderdrempel) te laten lopen.

De uiteindelijke relaties zijn gegeven in de bijlagen 10.4.

De fits met $\sqrt{Hm_0}$ blijken bij grote golfhoogten vaak iets beter te voldoen dan de oorspronkelijke best fits met 2 variabelen, vergelijk bijvoorbeeld de bijlagen 10.3 en 10.4!

In de onderstaande tabel 10.2 zijn de resultaten numeriek samengevat.

Tabel 10.2

De eindresultaten voor de gemiddelde golfperioden en de factor a

	factor a	$T_{m_{02}}$ bij $H_{m_0} = 10\text{m}$ [sec]	$H_{m_0} 10^{-4}$ keer/jaar [m]	$T_{m_{02}}$ bij $H_{m_0} 10^{-4}$ keer/jaar [sec]
SON	3,53	11,2	9,6	10,9
ELD	3,35	10,6	10,0	10,6
K13	3,29	10,4	9,7	10,2
YM6	3,35	10,6	9,1	10,1
EUR	3,14	9,9	8,4	9,1

Uit de resultaten blijkt dat naarmate de lokatie meer zuidwestelijk ligt de gemiddelde golfperiode kleiner wordt. Een deel valt mogelijk te verklaren uit de veronderstelling dat golfvelden opgebouwd zijn uit lokale (Noordzee) golfopwekking en uit deining vanaf het noorden vanuit de Atlantische Oceaan. Van de deining, met de lange perioden (laagfrequente componenten), kan op basis van diffractie aannemelijk gemaakt worden dat bij SON meer energie van de laagfrequente componenten overblijft dan bij de meer zuidwestelijke lokaties.

Een ander deel valt te verklaren uit bodemwrijving. De golven uit de maatgevende sector, het noordwesten, bereiken de meer zuidelijk gelegen lokaties, YM6 en EUR, via een relatief lang traject met minder diep water, waardoor de energie van vooral de laagfrequente componenten meer afneemt dan voor de andere lokaties het geval is.

10.3 Piekperioden

Het golfspektrum bestaat uit een groot aantal geschatte waarden van de energiedichtheid voor oplopende frequenties. De nauwkeurigheid van elke schatter apart is gering, de spreiding is bijvoorbeeld ca. 30% voor een spektrum met een frequentie stap $df = 0,01$ Hz uit een registratie van 20 minuten. De nauwkeurigheid van de piekperiode, de golfperiode behorend bij de frequentie met de grootste energiedichtheid, is bijgevolg ook slecht. Op bijlage 10.5 is hiervan een voorbeeld gegeven.

Door middelingsprocedures en/of fitten van spectra kunnen de piekperioden iets beter bepaald worden. Hiervan is in dit stadium van het onderzoek, vanwege de grote hoeveelheid werk, afgezien. Om dezelfde reden is ook afgezien van de mogelijkheid om via uniforme golfsteilheden tot $T_p - H_{m_0}$ relaties te komen. In het vervolgonderzoek zullen deze mogelijkheden zeker overwogen worden. In dit onderzoek is voor het extrapoleren gekozen voor een indirecte schatting van T_p via een relatie met $T_{m_{02}}$.

In dit onderzoek is uitgegaan van de gedachte van lokatie gebonden stabiele spectrumvormen gerelateerd aan de mate waarin sprake is van diep tot ondiep water. Op basis hiervan wordt verwacht dat door gebruik te maken van een relatie tussen de verhouding van de piekperiode en de gemiddelde periode ($T_p/T_{m_{02}}$) als functie van het quotiënt van de significante golfhoogte en van de diepte (H_{m_0}/d), als relatieve dieptemaat, relatief nauwkeurige $T_p - H_{m_0}$ relaties verkregen kunnen worden. In diep water is voor het Pierson-Moskovitch-spectrum (volgroeid zeegangsspectrum) de verhouding van $T_p/T_{m_{02}} \approx 1,4$ en voor een

JONSWAP-spectrum met een standaard parameterwaarde voor de piektheid van het spectrum ($\gamma=3,3$) is $T_p/Tm_{02} = 1,26$. Bij een spectrum met een nog meer geprononceerde piek ($\gamma=6,0$) voor heel jonge zeegang is $T_p/Tm_{02} = 1,20$.

Met betrekking tot de relatieve diepte is er sprake van diep water indien Hm_0/d kleiner is dan 0,1 en ondiep water bij Hm_0/d groter dan 0,2. Daartussen ligt de overgang van diep naar opdiep water waarbij de ondiepwater-effecten nog beperkt zijn.

Bij het vastleggen van de relaties is, per lokatie, uitgegaan van T_p/Tm_{02} verhoudingen in klassen van Hm_0/d verhoudingen, gebruik makend van de uit de metingen bepaalde waarden voor T_p , Tm_{02} en Hm_0 . Bij de indeling is uitgegaan van gelijke aantallen per klasse. Vervolgens is per klasse een gemiddelde T_p/Tm_{02} verhouding bepaald met standaardafwijking en het klassegemiddelde zelf. De resultaten hiervan zijn in bijlage 10.6 uitgezet. Uit bijlage 10.6 blijkt dat er verschillen tussen de lokaties zijn, die mogelijk verband houden met de geografische liggingen. ELD en K13 enerzijds en YM6 en EUR anderzijds tonen grote overeenkomst. In bijlage 10.7 zijn de punten gepresenteerd van de gegevens van alle stations bij elkaar. Met behulp van deze punten is de richtingscoëfficiënt (0,5) bepaald voor de relaties tussen T_p/Tm_{02} en Hm_0/d , welke voor alle stations gelijk gesteld is. Het bovenstaande heeft geleid tot de volgende relaties, welke grafisch gepresenteerd zijn in bijlage 10.8

SON :

$$\begin{aligned} Hm_0/d \leq 0,10 & \Rightarrow T_p/Tm_{02} = 1,40 \\ 0,10 < Hm_0/d < 0,40 & \Rightarrow T_p/Tm_{02} = 0,5 * Hm_0/d + 1,35 \end{aligned}$$

ELD en K13 :

$$\begin{aligned} Hm_0/d \leq 0,12 & \Rightarrow T_p/Tm_{02} = 1,36 \\ 0,12 < Hm_0/d < 0,35 & \Rightarrow T_p/Tm_{02} = 0,5 * Hm_0/d + 1,30 \end{aligned}$$

YM6 en EUR :

$$\begin{aligned} Hm_0/d \leq 0,14 & \Rightarrow T_p/Tm_{02} = 1,33 \\ 0,14 < Hm_0/d < 0,35 & \Rightarrow T_p/Tm_{02} = 0,5 * Hm_0/d + 1,26 \end{aligned}$$

Met bovenstaande relaties zijn de in de tabel 10.3 gepresenteerde waarden voor de piekperioden bepaald.

Tabel 10.3

Piekperioden bij de significante golfperioden met een overschrijdingsfrequentie van 10^4 keer per jaar

	Hm_0 10^{-4} [m]	lokaal gemeten diepte [m]	Hm_0/d (d=diepte +5m wa- terstand)	T_p/Tm_{02}	Tm_{02} bij Hm_0 10^{-4} [sec]	T_p bij Hm_0 10^{-4} [sec]
SON	9,6	19	0,40	1,55	10,9	16,7
ELD	10,0	26	0,32	1,46	10,6	15,5
K13	9,7	30	0,28	1,44	10,2	14,7
YM6	9,1	21	0,35	1,435	10,1	14,5
EUR	8,4	32	0,23	1,375	9,1	12,5

Uit de tabel blijkt dat de verwachtingswaarde voor T_p oplopen van 12,5 tot

16,7 seconden en, evenals bij de gemiddelde perioden, de piekperioden afnemen van noordoost naar zuidwest. De mogelijke verklaring hiervoor is, evenals bij de gemiddelde periode, zoals uiteengezet in hoofdstuk 10.2, de doordringing van laagfrequente energie vanaf het noorden vanuit de Atlantische Oceaan, de hogere bodemwrijving in de relatief ondiepe zuidelijke Noordzee en de hogere extreme windsnelheden in het noorden.

11. Conclusies en aanbevelingen

11.1 Conclusies

Ten behoeve van de komende toetsingen in het kader van de nieuwe "Wet op de waterkering" is binnen het HYDRA project extreme-waardenstatistiek geproduceerd voor de significante golfhoogte (H_s) bij de meetlocaties platform Euro-0 (EUR), IJmuiden-06 (YM6), Eierlandse Gat (ELD), Schiermonnikoog (SON) en platform K13A (K13). In bijlage 8.10 is dit weergegeven in de vorm van overschrijdingskrommen met betrouwbaarheidsbanden. Het is binnen het project gelukt om robuuste statistiek te verkrijgen door gebruik te maken van:

- de conditionele twee parameter Weibull-verdeling. Het betreft de conditionele verdeling omdat gebruik is gemaakt van waarnemingen boven een bepaalde drempel
- fysisch-numeriek modelonderzoek naar de maximaal mogelijke significante golfhoogte op de diverse locaties
- de met NESS uitgebreide reeksen. In het NESS (North European Storm Study) project zijn de winterperioden van 1964 - 1989 geheel doorgerekend met wind, golf en stromingsmodellen. De meetperiode 1979 - 1993 kon zo uitgebreid worden tot 1964 - 1993

De golfhoogten met een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} keer per jaar nemen van het noorden naar het zuiden toe af. In het noorden 9,6 à 10,0 meter (SON: 9,6m, ELD: 10,0m, K13: 9,7m), halverwege bij YM6 9,1 meter en in het zuiden bij EUR 8,4 meter (tabel 8.11). Uitgaande van een grootste bijdrage uit de noordwestelijke windrichtingssector (zie volgende conclusie) en een naar het zuiden toe een langer relatief ondiep traject voor de golven de locaties bereiken, valt dit ook te verwachten

Voor de overschrijdingsfrequenties van 10^{-4} keer per jaar is de bijdrage van de noordwestelijke windrichtingssector het grootst. Voor SON en EUR is deze zelfs maatgevend. Voor de ELD, K13 en YM6 draagt ook de westelijke windrichtingssector in aanzienlijke mate bij. Voor de hogere overschrijdingsfrequentie van 10^{-2} wordt voor ELD, K13 en YM6 de bijdrage van de westelijke windrichtingssector het grootst (tabel 9.1). Dit is overeenkomstig de verwachting op basis van effectieve strijklengten.

Het onderzoek naar klimaatscorrecties heeft (nog) niet geleid tot direct toepasbare correctiefactoren, omdat deze tot niet realistische resultaten leidden (zie figuur 8.7). Wel blijkt uit een vergelijking met overschrijdingsfrequenties van opzetten dat de in dit onderzoek bestreken periode 1964-1993 relatief rustig is vergeleken met een langere periode van ongeveer 100 jaar (zie tabel 8.7). Dit geldt in geringe mate voor de noordelijke kust en neemt naar het zuiden sterk toe. Een klimaatscorrectie is daarom wel nodig. Dit heeft er toe geleid om bij de keuze van de uitgewerkte varianten te kiezen een variant met relatief hogere waarden voor de significante golfhoogten bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} keer per jaar ($\alpha=2,62$ in plaats van $\alpha=3,00$, zie figuur 8.6).

Om te beoordelen in hoeverre rekening gehouden moet worden met fysische begrenzingsen, vooral het breken van golven, in het extrapolatiegebied is de statistiek vergeleken met fysisch-numerieke modelresultaten (zie bijlagen 8.9). Dit heeft niet geleid tot aanpassing van de statistiek.

Alleen voor SON leek de 10^{-4} golfhoogte boven de fysische begrenzing te liggen (zie bijlage 8.9a). Onderzoek heeft echter uitgeezen dat het toegepaste fysisch-numerieke model (HISWA) voor SON tot te lage golfhoogten leidt.

Het eindresultaat met de twee parameter Weibull-verdeling is verkregen met een voor alle locaties dezelfde vaste waarde voor de krommingsparameter ($\alpha=2,62$). Dit is gedaan omdat een vaste krommingsparameter, volgens fysische inzichten, tot realistischer resultaten leidt (zie figuur 8.5).

In hoofdstuk 10 zijn de verwachtingswaarden van de gemiddelde golfperioden en piekperioden bij de 10^{-4} golfhoogten gepresenteerd. De gemiddelde perioden liggen tussen 9,1 en 10,9 seconde (zie tabel 10.2), de piekperioden tussen 12,5 en 16,7 seconde (zie tabel 10.3). De waarden van beide perioden nemen af noordoost naar zuidwest. Dit valt mogelijk te verklaren door doordringing van deining uit het noorden vanuit de Atlantische Oceaan in samenhang met diffractie en bodemwrijving in de zuidelijke Noordzee naar het zuiden.

Een zuivere vergelijking van de eindresultaten met de resultaten van de methode Bruinsma is niet goed te maken. Desondanks lijken de resultaten van de methode Bruinsma aan de lage kant vergeleken met de resultaten van dit onderzoek (zie bladzijde 60 en 61).

11.2 Aanbevelingen

- In het onderhavige projectonderdeel is de zogenaamde marginale statistiek van H_s bepaald, dat wil zeggen de op zich staande statistiek van H_s , ongeacht andere parameters zoals bijvoorbeeld waterstand, golfperioden of wind. Voor het ontwerp van waterkeringen zijn deze combinaties wel van belang. Aanbevolen wordt om als volgende stap de gecombineerde statistiek te bepalen van H_s , waterstand, golfperioden en wind (eventueel per windrichting). Binnen het HYDRA project zijn hiervoor al de eerste stappen gezet.
- Het onderzoek naar klimaatscorrecties heeft in dit projectonderdeel nog niet tot bruikbare resultaten opgeleverd. Wel is het belang van klimaatscorrecties aangetoond. Daarom wordt dan ook aanbevolen hiernaar vervolgonderzoek te doen.
- In dit projectonderdeel is alleen de marginale statistiek van de significante golfhoogten uitgevoerd. Aanbevolen wordt om dit tevens te doen voor gemiddelde perioden en piekperioden.
- Over enige tijd (5 jaar) als er langere reeksen met meetgegevens beschikbaar zullen zijn, is het aan te bevelen om de hier gepresenteerde waarden nog eens na te rekenen om te toetsen of de extreme-waardenstatistiek voor golven bijgesteld moet worden.
- De extreme-waardenstatistiek is beschikbaar voor vijf lokaties. Voor het verkrijgen van randvoorwaarden, op ongeveer NAP -20m, tussen de lokaties, wordt aanbevolen om lineair tussen de lokaties te interpoleren.

Referenties

- Lit. 1 Urk, A. van, 1993, *De basispeilen langs de Nederlandse kust. Eindverslag*, Rapport DGW-93.026, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- lit. 2 Dillingh, D., et al, 1993, *De basispeilen langs de Nederlandse kust, Statistisch onderzoek*, Rapport DGW-93.023, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Lit. 3 Philippart M.E., et al, 1995, *De basispeilen langs de Nederlandse kust, De ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen*, Rapport RIKZ-95.008, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Lit. 4 Wieringa, J. en Rijkooft, P.J., 1983, *Windklimaat van Nederland*, KNMI, Staatsuitgeverij, Den Haag 1983.
- Lit. 5 Bruinsma, J., 1979, *Bepaling van de waterstand-golfhoogte relatie t.p.v. de -20m lijn t.b.v. werkgroep 5 van TAW*, Rijkswaterstaat, District Kust en Zee, Rapport WWKZ-79C.220.
- Lit. 6 Bruinsma, J. en Van de Graaff, J., 1982, *Golfhoogte-waterstand relatie t.p.v. de -20m lijn nabij Hoek van Holland t.b.v. de leidraad duinafslag*, Rijkswaterstaat, District Kust en Zee, Rapport WWKZ-82G.259
- Lit. 7 Holthuijsen, L.H., et al, 1995, *The maximum significant wave height in the southern North Sea*, Delft University Report, No 14-94.
- Lit. 8 Roskam, A.P., 1994, *De opbouw van datafiles voor golfklimatologie in HYDRA. Overzichtsrapportage*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-94.152x.
- Lit. 9 Roskam, A.P., 1994, *Vergelijking van op verschillende manieren gemeten of verwerkte golfparameters*, Memo bij lit. 6.
- Lit. 10 De Valk, C.F., 1994, *Selection of storm events and estimation of exceedance frequencies of significant wave height for five North Sea locations*, WL report H 1931
- Lit. 11 Roskam, A.P., 1993, *Bepaling van het maximum van de gemeten golfhoogte H_{m0} tijdens storm*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-93.113x.
- Lit. 12 De Valk, C.F., 1992, *Determining statistics of multivariate storm extremes off the coast of the Netherlands*, WL report H 1557.
- Lit. 13 De Valk, C.F., 1993, *An evaluation of methods for determining statistics of multivariate storm extremes off the coast of the Netherlands*, WL report H 1700 (part 1 and 2).
- Lit. 14 De Valk, C.F. and Otta, A.K., november 1993, *Robust estimation of exceedance frequencies of significant wave height*, WL report H 1817.
- Lit. 15 Marle, J.G.A. van, december 1995, *Extreme waardenstatistiek van hoogwaterstanden met een conditionele 2-parameter Weibull-verdeling*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-95.150x.
- Lit. 16 Tolman, H.L., 1991, *A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents*, J. Phys. Oceanogr., 21 (6), 782-797
- Lit. 17 Ferrier, P., et al, 1993, *Extreme parametric storms for waves in the southern North Sea*, Delft University Report, No 8-93.

- Lit. 18 Eldeberky, Y., Holthuijsen, L.H., 1993, *Computations of significant wave height for uniform windfields*, Delft University Report, No 9-93
- Lit. 19 Roskam, A.P., Hoekema, J., 1995, *Beschrijving van diverse deelonderzoeken binnen HYDRA in het kader van het schatten van de marginale verdeling van de golfhoogte H_{m0}* , Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-94.153x.
- Lit. 21 De Valk, C.F. and Petit, H.A.H., 1995, *Quantile estimates for significant wave height at 5 North Sea locations from hindcasts and measurements*, WL rapport H 1603.
- Lit. 22 De Valk, C.F., 1995, *Correction of wave height marginals for the temporal variability in storm intensity*, WL rapport H 2131.
- Lit. 23 De Valk, C.F., 1995, *Estimating confidence regions for Weibull parameters and quantiles*, WL rapport H 2240.