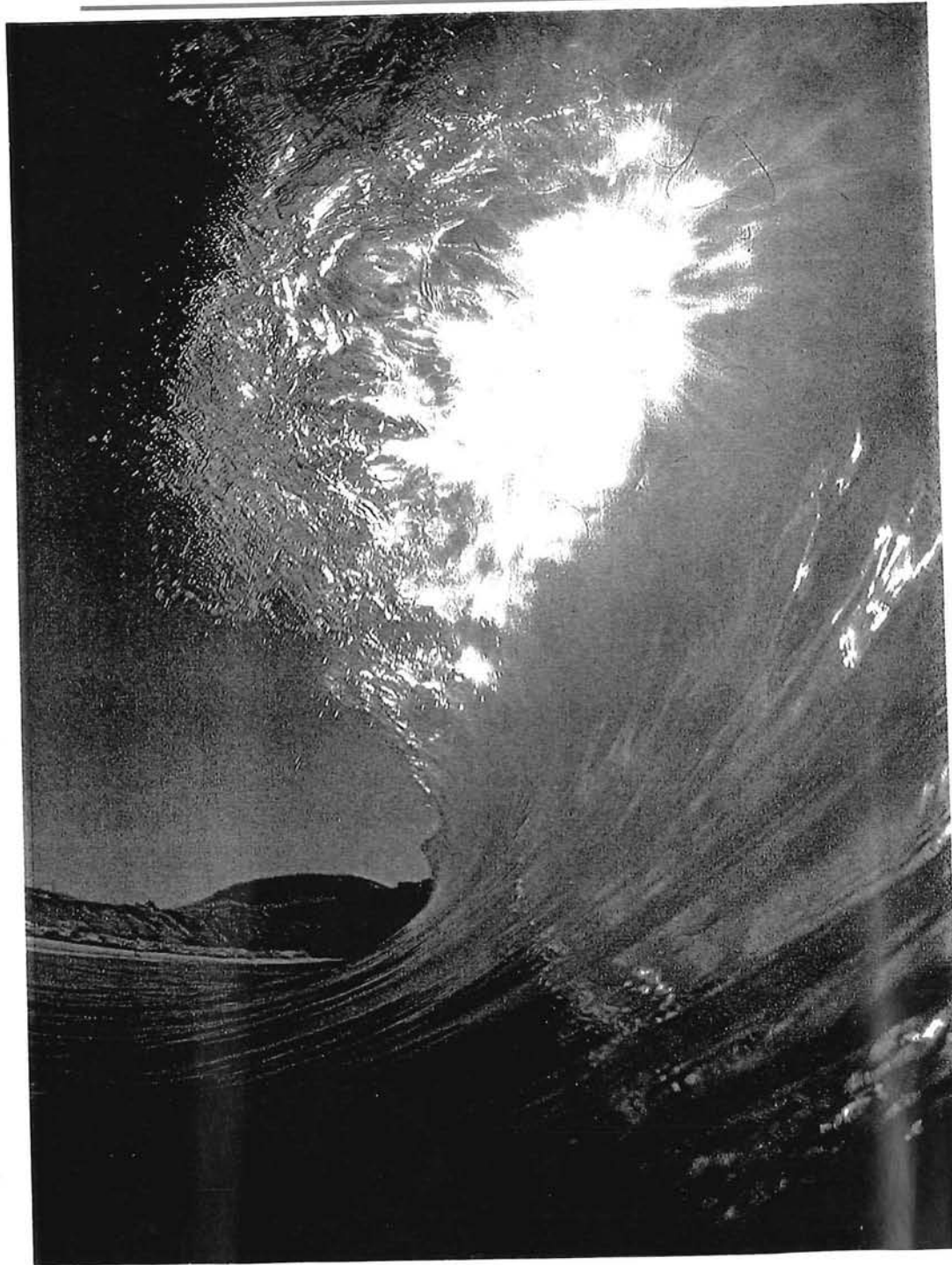


ASSIMILATIE VAN SATELLIET- EN BOEIGEGEVENS
IN DE VOORSPELLING VAN GOLVEN OP ZEE



**"ASSIMILATIE VAN SATELLIET- EN BOEIGEGEVENS
IN DE VOORSPELLING VAN GOLVEN OP ZEE."**

AFSTUDEERVERSLAG
MIRIAM J. VAN ENDT
AUGUSTUS 1995

FACULTEIT DER CIVIELE TECHNIEK
VAKGROEP WATERBOUWKUNDE
SECTIE VLOEISTOFMECHANICA

TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT

AFSTUDEERCOMMISSIE:
PROF.DR.IR. J.A. BATTJES
DR.IR. L.H. HOLTHUIJSEN
DR.IR. N. BOOIJ
PROF.IR. K. D'ANGREMOND

VOOR MAMA

Van de Zee [Willem Kloos]

*De Zee, de Zee klotst voort in eindeloze deining,
De Zee, waarin mijn Ziel zichzelf weerspiegeld ziet;
De Zee is als mijn Ziel in wezen en verschijning,
Zij is een levend Schoon en kent zichzelf niet.*

*Zij wist zichzelf af in eeuwige verreining,
en wendt zich altijd òm en keert weer waar zij vliedt,
Zij drukt zichzelf uit in duizenderlei lijning,
En zingt een eeuwig-blij en eeuwig-klagend lied.*

*O, Zee, was Ik als Gij, in al uw onbewustheid,
Dán zou ik eerst gehéél en gróót gelukkig zijn;*

*Dán had ik eerst geen lust naar menselijke belustheid
Op menselijke vreugd en menselijke pijn;*

*Dan wás mijn Ziel een Zee, en hare zelfgerustheid
Zou, wijl Zij groter is dan Gij, nóg groter zijn.*

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting

1. Inleiding	-1-
2. Golven en data assimilatie	-3-
2.1 Golven	-4-
2.2 Data assimilatie	-7-
3. Methode	-12-
3.1 Inleiding	-13-
3.2 Assimilatie theorie	-13-
3.3 Stuurvariabelen, assimilatie tijdschema	-15-
3.4 Invloed van assimilatie van lokale en/of globale gegevens	-16-
3.5 Invloed van de grootte van de standaard deviaties	-17-
3.6 Scatterindex	-19-
3.7 Het golfmodel DOLPHIN-B	-20-
4. Data	-23-
4.1 Algemeen	-24-
4.2 Meteorologische gegevens	-25-
4.3 Boeien	-25-
4.4 ERS-1	-30-
5. Resultaten	-36-
5.1 'First Guess' resultaten	-37-
5.2 Resultaten assimilatie van lokale en/of globale gegevens.	-40-
5.3 Resultaten bij variatie van de grootte van de standaard deviaties	-47-
5.4 Resultaten deiningshoogte	-51-
6. Conclusies	-55-
Dankwoord	-58-
Literatuurlijst	-59-
BIJLAGE I Beschrijving stormen 1-10 maart 1993	-62-
Lijst 1: Figuren	-i-
Lijst 2: Tabellen	-ii-
Lijst 3: Gebruikte symbolen	-iii-

SAMENVATTING

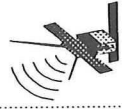
Baggeraars en offshore aannemers hebben groot belang bij goede voorspellingen van zowel windzee als deining. Deze voorspellingen kunnen gebaseerd zijn op observaties of op numerieke golfmodellen. Data assimilatie is een manier om de observaties zodanig te gebruiken, dat de model golfparameters zo dicht mogelijk de gemeten golfparameters benaderen. Hierbij worden zowel het golfmodel als de windvelden, die als invoer dienen voor het golfmodel, aangepast door correctie van wind- en modelparameters (stuurvariabelen). De windvelden bevatten namelijk fouten, die een belangrijke bron van fouten zijn in golfvoorspellingen. De in dit onderzoek toegepaste assimilatie methode (de multi-time-level methode der kleinste kwadraten) is gebaseerd op het minimaliseren van een kostfunctie, die o.a. het kwadratische verschil tussen de gemeten en de berekende significante golfhoogte (H_s) bevat, waarbij de waarden van de stuurvariabelen (constant in de tijd en de plaats) gecorrigeerd worden. De nieuwe waarden van de stuurvariabelen, die behoren bij het minimum van de kostfunctie, worden gebruikt in een nieuwe (geassimileerde) golfmodelrun.

De methode is toegepast op twee stormen in de Groenlandzee/Noorse Zee in de periode 1-10 maart 1993. De geassimileerde significante golfhoogten zijn afkomstig van de radar altimeter van de ERS-1 satelliet en de Waverider boeien bij Scott (Noordzee) en Haltenbanken (Noorse Zee). Het gebruikte golfmodel is DOLPHIN-B, een 1e/2e generatie diep water, discreet, spectraal, éénpunts golfmodel, dat de spectrale energiedichtheid berekent langs stralen vanuit het voorspellingspunt. In dit onderzoek is een klein aantal 'overall' windparameters als stuurvariabelen gebruikt om de assimilatie te sturen, zoals de lokatie van de storm, de diepte van de depressie etc.. Tevens is een dissipatie coëfficiënt in het golfmodel als stuurvariabele gebruikt. In de geassimileerde modelrun zijn de nieuwe waarden van de stuurvariabelen geëxtrapoleerd naar de 'forecast' periode. Verschillende (combinaties van) metingen van H_s zijn in de assimilaties gebruikt om de invloed van assimilatie van lokale (boei) en/of globale (satelliet) informatie op de golfvoorspelling te onderzoeken, zowel in de assimilatieperiode als in de 'forecast'. Tevens is de invloed van de grootte van de gekozen onzekerheid in de stuurvariabelen op de correctie van die stuurvariabelen onderzocht.

De resultaten van de geassimileerde golfmodelruns zijn vergeleken met de metingen en de eerste schattingen ('first guess' runs) van het golfmodel. De berekeningen zijn gedaan ter plaatse van de tracks van de ERS-1 en de lokaties van de boeien. Het resultaat, uitgedrukt in een scatterindex (= r.m.s.-verschil tussen metingen en modelresultaat, genormaliseerd met het gemiddelde van de metingen) is zeer verheugend voor de voorspelling van H_s : de scatterindex in de forecast periode bij Scott neemt af van 36.8% in de first guess naar 13.1% na assimilatie. Bij Haltenbanken neemt deze af van 12.4% naar 9.1%. In de assimilatieperiode nemen de scatterindices af met dezelfde orde van grootte. Assimilatie van alléén (lokale) boeigegevens blijkt over het algemeen betere resultaten voor de voorspelling van H_s in een voorspellingspunt op te leveren dan bij het gebruik van (combinatie van boeigegevens met) de globale ERS-1 gegevens. Het totale golfveld wordt door de ERS-1 gegevens gecorrigeerd, waardoor de correctie in één punt niet optimaal zal zijn, maar een soort van 'gemiddelde correctie' is. De assimilatie van H_s voor het voorspellen van deining blijkt minder goede resultaten op te leveren: de scatterindices voor de deiningshoogte worden na sommige assimilaties zelfs slechter dan in de first guess. Indien er hoofdzakelijk deiningsenergie in het first guess spectrum aanwezig is, wordt de voorspelling van de deiningshoogte wèl significant verbeterd bij assimilatie van H_s , voornamelijk bij assimilatie van de globale ERS-1 metingen.

De grootte van de gekozen standaard deviatie van de stuurvariabelen heeft geen grote invloed op de correcties van de stuurvariabelen, noch op de golfvoorspelling. Wel levert een grote standaard deviatie ($\geq 10^\circ$) van de draaiing van de windvectoren zeer grote (fysisch onacceptabele) correcties van de richting van de windvectoren op: 30° à 40° . De dissipatie coëfficiënt van het golfmodel wordt bij alle assimilaties zoveel gecorrigeerd, dat nader onderzoek naar de first guess waarde van deze stuurvariabele gewenst is.

Het golf assimilatie systeem in deze opzet is een effectieve en efficiënte manier gebleken om een verbeterde golfvoorspelling te maken. Effectief omdat er bij grove correctie van slechts een paar stuurvariabelen reeds een significante verbetering in de golfvoorspelling optreedt. Efficiënt omdat het systeem slechts een paar uur rekentijd op een eenvoudige PC behoeft en dus geschikt lijkt voor operationele doeleinden (op snellere machines) en dus vrij goedkoop is.



1. INLEIDING



Bij baggerwerken en offshore operaties werkt het groot materieel, zoals cutterzuigers en drijvende kranen, vaak in open water. Dit betekent dat het wordt blootgesteld aan golven. Hierbij spelen zowel de golfhoogte als de golfperiode een belangrijke rol. Wanneer vaste offshore platforms worden belaagd door hoge golven, kunnen de hydrodynamische krachten die hierbij optreden een gevaar vormen voor de stabiliteit van de constructie. Bij installatie van die platforms en bij baggerwerkzaamheden is tevens de golfperiode van belang, aangezien de eigenperiode van de schepen in de buurt ligt van de periode van deininggolven: 10 - 20 s. Er is dan gevaar voor opslinging en kans op schade. De werkbaarheid is hierdoor sterk afhankelijk van de toestand van de zee, die kan bestaan uit windzee en/of deining. Voor een efficiënte inzet van het materieel zijn goede golfvoorspellingen dus noodzakelijk. Hiervoor zijn (en worden) golfmodellen ontwikkeld, waarin windvelden en geografische gegevens worden ingevoerd om golfparameters, zoals golfhoogte, -richting en -frequentie, te berekenen.

Een groot probleem bij golfvoorspelling is de betrouwbaarheid van de windvelden, die gegenereerd worden door meteorologen met behulp van windmodellen op grond van metingen, gedaan aan boord van schepen, satellieten en ter plaatse van weerstations. Ondanks de huidige ontwikkelingen in de meteorologie, waarbij men steeds meer geavanceerde windmodellen gebruikt, bevatten de windvelden fouten die een belangrijke bron zijn van fouten in golfvoorspellingen.

Een manier om het golfmodel en de windvelden zodanig aan te passen dat de berekende golven zo goed mogelijk de gemeten golven benaderen, is data assimilatie. Hierbij worden gemeten golf- en/of windgegevens in het golfmodel geassimileerd. Er zijn in de loop der tijd verschillende assimilatie technieken ontwikkeld, die gebruik maken van meetgegevens van boeien of satellieten. Voordeel van het gebruik van satelliet data is dat de methode te gebruiken is in gebieden waar weinig (of geen) meetboeien liggen, zoals op het zuidelijk halfrond. Tevens levert de satelliet een grote hoeveelheid informatie die ruimtelijk verspreid is.

Het doel van deze studie is onderzoeken of assimilatie van (een combinatie van) gegevens van meetboeien en een satelliet in een 1e/2e generatie golfmodel een verbeterde golfvoorspelling oplevert.



2. GOLVEN EN DATA ASSIMILATIE



2.1 GOLVEN

Een veel gebruikte manier om het zeeoppervlak te beschrijven is met behulp van een energiespectrum. Men past het superpositiebeginsel toe op de in een golfveld aanwezige, onafhankelijk veronderstelde, sinusvormige golven met verschillende lengten, frequenties en richtingen. De energiedichtheid per golfcomponent in een golfveld wordt weergegeven in het energiedichtheidspectrum, $E(f, \theta)$. Het frequentiespectrum $E(f)$ kan als volgt geschreven worden:

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (2-1)$$

met:

$E(f, \theta)$ en $E(f)$ = energiedichtheid
 f = golffrequentie
 θ = golfrichting

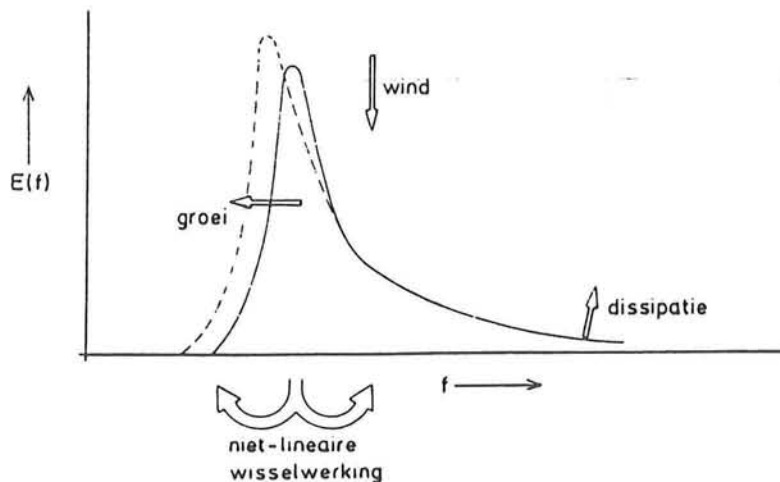
Het spectrum ontwikkelt zich in de tijd door verschillende processen waarbij energie wordt overgedragen: de energie die de wind aan de golven toevoegt wordt voor een gedeelte omgezet in andere vormen van energie door processen zoals dissipatie (breking, bodemwrijving en white-capping) en niet-lineaire wisselwerkingen: de verschillende golfcomponenten in een golfveld oefenen invloed op elkaar uit. Deze onderlinge beïnvloeding is echter zeer zwak, waardoor het lineaire superpositiebeginsel lokaal nog wel blijft gelden. Toch moet men bij golfmodellering rekening houden met deze niet-lineaire wisselwerkingen, aangezien deze een herverdeling van de energie binnen het spectrum teweeg brengen en zo een stabiliserende invloed hebben op vorm van het spectrum. De frequenties aan de hoogfrequente flank ontvangen de meeste energie van de wind en staan via niet-lineaire wisselwerkingen energie af naar beide zijden van het spectrum. De energieoverdracht naar de lagere frequenties wordt gebruikt voor de groei van het spectrum, terwijl de energie naar de hogere frequenties bijna geheel gedissipeerd wordt. Een overzicht van de energiehuishouding van het groeiende spectrum wordt gegeven in FIGUUR 2.1. De energiebalansvergelijking voor het spectrum kan Eulers zijn, waarbij een ruimte wordt opgedeeld in balansgebiedjes in een stilstaand assenstelsel. De wet van behoud van energie, toegepast op de golfenergie in deze balansgebiedjes luidt:

$$\frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{c}_g \cdot E(f, \theta)) = S_{in} + S_{diss} + S_{nl} \quad \left(\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_y \right) \quad (2-2)$$



met:

- \vec{c}_g = groepssnelheid
- t = tijd
- S_{in} = bronterm groei door wind
- S_{diss} = bronterm dissipatie door breking etc.
- S_{nl} = bronterm niet-lineaire wisselwerkingen



FIGUUR 2.1
ENERGIEVERDELING BINNEN HET GROEIENDE SPECTRUM

Er kan ook gewerkt worden met een Lagrangiaans assenstelsel, dat zich in de golfrichting met de groepssnelheid meebeweegt, waardoor de energiebalansvergelijking overgaat in de vorm, zoals die gegeven is in (2-3):

$$\frac{dE(f,\theta)}{dt} = S_{in} + S_{diss} + S_{nl} \quad (2-3)$$

Hierbij wordt de vergelijking geïntegreerd langs de weg (de karakteristiek) die de golfcomponent aflegt, met oplegging van de juiste begin- en randvoorwaarden.

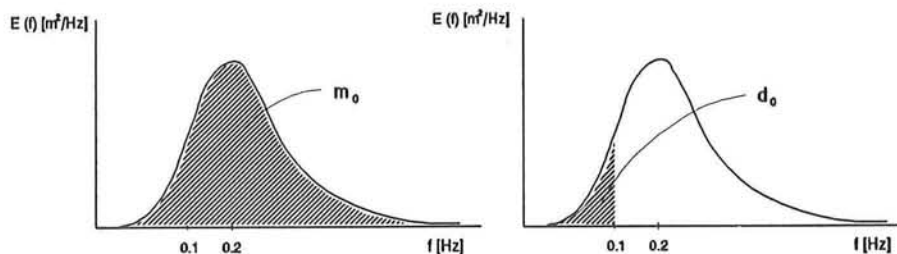
Voor de beschrijving van een golfveld gebruikt men enkele spectrale parameters, zoals 'piekfrequentie' en 'significante golfhoogte'. De significante golfhoogte, H_s , wordt gedefinieerd als het gemiddelde van het hoogste $\frac{1}{3}$ deel van de golfhoogten; er geldt:



$$H_s \approx H_{m_0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}, \quad \text{waarin} \quad m_0 = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (2-4)$$

Met andere woorden, m_0 is het oppervlak onder het frequentiespectrum en H_s is hierin uit te drukken.

In dit onderzoek wordt tevens gebruik gemaakt van de term 'deiningshoogte', H_{d_0} , waarbij d_0 het oppervlak voorstelt onder het frequentiespectrum, maar dan alleen voor $0 \leq f \leq 0.1$ Hz. In de golffrequenties binnen dit interval bevindt zich de deiningenergie. Zie ook FIGUUR 2.2.



FIGUUR 2.2
 M_0 EN D_0

In de ontwikkeling van de numerieke golfmodellering is men in de jaren '60 begonnen met zogenaamde 1e generatie modellen. In deze modellen neemt de golfenergie toe tot een bepaalde (Phillips') limietwaarde, waarna de groei volledig wordt gecompenseerd door een dissipatieterm. Bij deze modellen worden de niet-lineaire wisselwerkingen tussen de golfcomponenten buiten beschouwing gelaten. Uit uitvoerige groeiexperimenten bleek later dat de modellen de windinput overschatten en dat de niet-lineaire effecten niet verwaarloosd mochten worden. Vervolgens is de ontwikkeling op gang gekomen van de 2e generatie modellen, waarbij een quasi-universele vorm van het windzeespectrum wordt meegenomen in de transportvergelijking zelf (parametrische of hybride modellen, waarin het spectrum wordt gekarakteriseerd in termen van piekfrequentie en totale energie) of wordt ingevoerd als een opgelegde limiet van f en θ tijdens de berekening van het spectrum (discrete modellen).

De herverdeling van de energie in het spectrum door de niet-lineaire effecten wordt in 2e generatie modellen op een eenvoudige, empirische manier meegenomen. Ook de groei- en dissipatie brontermen worden op empirische wijze gegeven. Hierdoor zijn deze 2e generatie modellen niet geschikt voor het simuleren van complexe situaties, zoals die ontstaan bij snel variërende windsnelheden en -richtingen. Ook de formulering van de



2. GOLVEN EN DATA ASSIMILATIE

overgang tussen windzee en deining geeft nogal wat moeilijkheden (voornamelijk in 'gekoppelde hybride modellen', waarbij de deining discreet geformuleerd wordt en het windzeegedeelte in geparametriseerde vorm wordt gegeven).

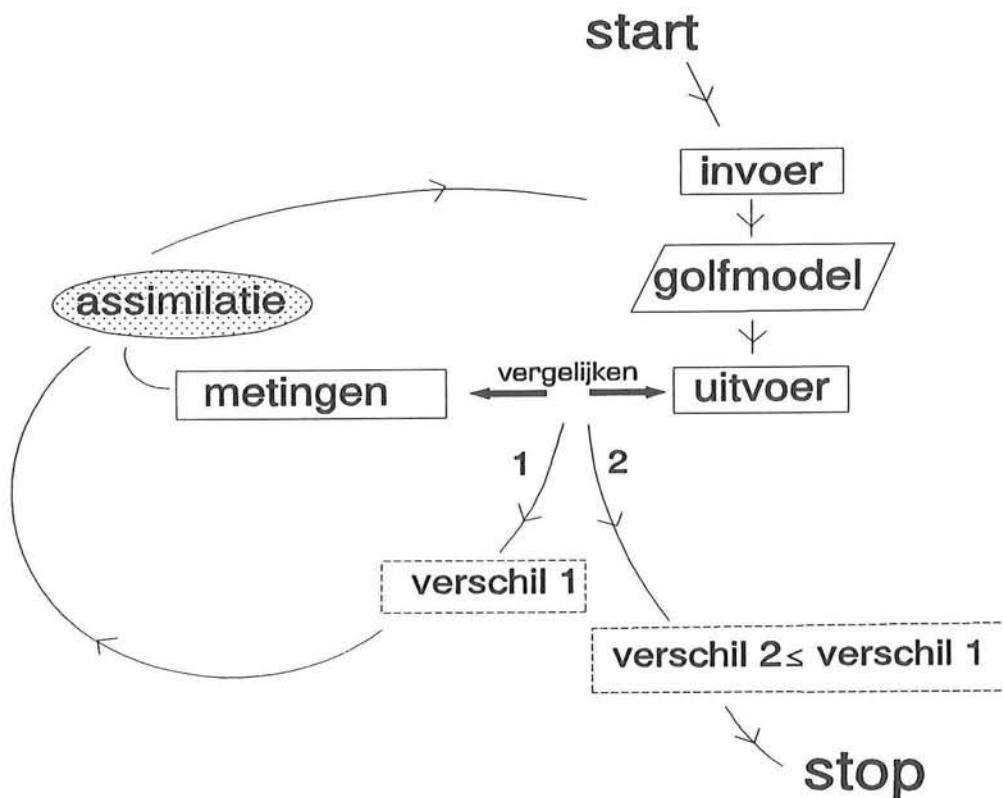
De volgende stap was het ontwikkelen van 3e generatie modellen (bijv. het WAM-model, [WAMDIG, 1988]), waarbij de spectrale vorm niet van te voren vastligt, maar ontstaat uit de integratie van de energiebalansvergelijking. Dit is pas mogelijk geworden na beschikbaar komen van een goede beschrijving van de diverse brontermen, met name de niet-lineaire wisselwerkingen.

(bronnen: *Battjes*, 1992, *Holthuijsen*, 1980, *Janssen et al.*, 1987, *de las Heras*, 1994, *Komen et al.*, 1994)

2.2 DATA ASSIMILATIE

Een groot probleem bij het modelleren van oceaangolven is de gevoeligheid van het golfveld voor fouten in het windveld [*Janssen, Komen en De Voogt*, 1984]. Er wordt als vuistregel aangenomen dat een fout van 10% in de lokale windsnelheid een fout van 20% kan veroorzaken in de golfhoogte [*Janssen et al.*, 1987]. Tevens zijn in golfmodellen enkele waarden van modelcoëfficiënten niet goed bekend en komen dus voor een betere afregeling in aanmerking. Een manier om de windvelden en de modelcoëfficiënten zodanig aan te passen dat het berekende golfveld goed overeenkomt met de werkelijkheid, is data assimilatie. Hierbij worden waarden van gemeten windsnelheden, golfhoogten of spectrale parameters etc. in de berekeningen meegenomen, zodat deze invloed hebben op de modeluitvoer. Het verschil tussen de gemeten en berekende waarden is na assimilatie kleiner geworden. In FIGUUR 2.3 wordt dit principe van data assimilatie schematisch weergegeven.

Data assimilatie wordt reeds lange tijd toegepast in meteorologische modellen. De berekende windvelden zijn namelijk sterk afhankelijk van de beginvoorwaarden, waardoor een door assimilatie opgelegde beginwindsnelheid en -richting veel effect heeft op het uiteindelijk voorspelde windveld. Bij golfmodellering is echter sprake van een gekoppeld wind-golf systeem, waardoor initiële golfhoogten als beginvoorwaarden snel uitgewerkt zijn als gevolg van de invloed van de wind. De golfdata kunnen wel worden gebruikt als 'lopende correctie' op het golfmodel [*Hasselmann et al.*, 1988]. Hierbij worden er voortdurend nieuwe beschikbare data in het systeem geassimileerd. Sinds het beschikbaar komen van technologieën en operationele systemen voor golf- en windmetingen door remote sensing satellieten is assimilatie van grote hoeveelheden aan meetgegevens in de golfmodellering mogelijk geworden, en worden hiervoor methoden ontwikkeld en geïmplementeerd.



FIGUUR 2.3
DATA ASSIMILATIE SCHEMA

Er zijn twee hoofdgroepen waarin de tot nu toe ontwikkelde data assimilatie methoden zijn op te splitsen: de 'single-time-level methoden' en de 'multi-time-level methoden'. Hierna volgt een beschrijving van beide groepen.

De 'single-time-level' methoden

Bij deze methoden worden op ieder tijdstip waarop nieuwe metingen beschikbaar zijn nieuwe correcties toegepast, zonder rekening te houden met de toestand van de zee in de voorafgaande tijdperiode. Deze (kinematische) methoden zijn hierdoor niet consistent met de wind-golfdynamica.

Een eerste poging tot kinematische data assimilatie in een golfmodel (GONO, 2e generatie golfmodel) is gedaan door Komen in 1985, waarbij door assimilatie van gemeten golfhoogten op het AUK platform in de Noordzee een verbetering in de deiningvoorspelling bij de ingang van de Eurogeul is verkregen [Komen, 1985]. De gebruikte assimilatie methode is gebaseerd op het **overschrijven** van de bij AUK berekende golfhoogten door de gemeten waarden, waarna met het aldus ontstane golfveld wordt verder gerekend. Doordat het golfmodel nog steeds door 'foute' windvelden wordt aangedreven en de



2. GOLVEN EN DATA ASSIMILATIE

golven elders in het model niet worden gecorrigeerd is de invloed van de opgelegde golfhoogte maar van korte duur. De voorspelling van deining is in dit geval dus meer succesvol dan windgolfvoorspelling, aangezien de deininggolven niet beïnvloed worden door de wind.

Het **verspreiden** van de gemeten golfenergie over het (reken)rooster rondom het observatiepunt om minder last te hebben van ruis en van discontinuïteiten in het resulterende golfveld is toegepast door onder andere *Janssen et al.*, 1989, en *Hasselmann et al.*, 1988. *Janssen et al.*, 1989, assimileren zowel golfhoogten als windsnelheden. Hierbij worden de golfhoogte en de wind-schuifspanningssnelheid in de roosterpunten rondom de meetpunten en hun directe burens aangepast. Ondanks het feit dat nu ook de aandrijvende wind wordt geassimileerd, treedt er een snelle relaxatie op van de nieuwe golfhoogte, aangezien het invloedsgebied van de metingen slechts 1 roostercel groot is.

De methode van **optimale interpolatie** die door onder andere *Lionello et al.*, 1992 en 1995, is toegepast, smeert de golfhoogtedata uit over het gehele rekenrooster, waarbij een gewogen fractie van het verschil tussen gemeten en berekende golfhoogte bij de berekende golfhoogte wordt opgeteld. Hierbij wordt voor de weging gebruik gemaakt van de foutencovariantie matrices van het model en de observaties, waardoor een 'verbeterd' golfhoogteveld ontstaat. Met behulp van het aldus geconstrueerde H_s -veld en een eerste modelschatting ('first guess') van het spectrum wordt vervolgens een nieuw spectrum geconstrueerd. In deze methode worden voor de foutencovariantiematrices van het model en de observaties grove aannamen gedaan, aangezien het numeriek berekenen van deze matrices enorm veel extra computercapaciteit vereist. In de **Karman filter methode** worden de matrices wel numeriek berekend, maar deze methode wordt dan ook nog niet echt gebruikt bij operationele golfvoorspellingen.

De 'multi-time-level' methoden

Deze methoden hebben als kenmerk dat ze alle metingen die door de tijd heen beschikbaar zijn gekomen meenemen in de assimilatie. Hierdoor kan er dus wel rekening gehouden worden met de toestand van de zee op voorgaande tijdstippen. Tevens worden de aandrijvende windvelden nu aangepast, waardoor er voldaan wordt aan de model windgolfdynamica. Een nadeel ten opzichte van de single-time-level methoden is dat er aanzienlijk meer computercapaciteit en rekentijd benodigd is, waardoor de toepassing voor operationele doeleinden minder aantrekkelijk is. Er wordt een zogenaamde 'kostfunctie', J , gedefinieerd, die o.a. het verschil bevat tussen de modelresultaten en de observaties. Het opstellen van de kostfunctie en de minimalisatie ervan kan op verschillende manieren geschieden. Enkele voorbeelden zijn: **inverse modellering**, de **Green's functie benadering**, de **kleinste kwadraten methode** en de **adjoint techniek**.



Bij **inverse modellering** wordt de inverse van het golfmodel gebruikt om met behulp van golfvelden, die gecorrigeerd zijn met observaties, een nieuw, gecorrigeerd windveld te creëren. Helaas wordt deze inverse van het wind-golfmodel over het algemeen snel instabiel. In plaats de inverse kan een benadering van de **Green's impulsresponsiefunctie** worden gebruikt. Deze functie geeft de fysische respons van het golfspectrum op (x_0, y_0, t_0) als gevolg van veranderingen in de wind op (x_1, y_1, t_1) . Er wordt slechts een klein stukje van het windveld gecorrigeerd: men gaat ervan uit dat veranderingen in het windveld ter plaatse van de bron van de golfenergie grote invloed hebben op het verschil tussen het gemeten en het gemodelleerde spectrum.

Bij de **kleinste kwadraten methode** [b.v. *Burt*, 1984] komen in de kostfunctie alleen kwadratische termen voor, zoals het kwadratische verschil tussen gemeten en berekende waarden. Deze kostfunctie wordt geminimaliseerd door de afgeleide ervan naar correcties op enkele wind- en/of modelparameters gelijk aan 0 te stellen (deze wind- en/of modelparameters sturen in feite de assimilatie en worden in het vervolg *stuurvariabelen* genoemd). Daarna volgt uit het oplossen van het stelsel lineaire vergelijkingen een nieuwe set waarden voor de stuurvariabelen waarvoor de kostfunctie minimaal is. Vervolgens kan met de nieuwe set stuurvariabelen het wind-golfmodel opnieuw gedraaid worden. De gevoeligheid van de modelresultaten voor correcties op de stuurvariabelen wordt berekend aan de hand van aparte golfmodelruns. Hierdoor zijn er evenveel gevoeligheidsruns nodig als het gekozen aantal stuurvariabelen en is deze methode dan ook alleen efficiënt bij een klein aantal stuurvariabelen.

In de **adjoint techniek** [b.v. *de las Heras*, 1994] wordt de kostfunctie uitgebreid met een hulpgrootte λ , die informatie bevat over de gevoeligheid van de initiële kostfunctie J voor veranderingen van de stuurvariabelen (p). Eerst wordt er een 'first guess' run gedraaid waarbij de gevoeligheid van de brontermen voor deviatie van de spectrale dichtheid per golfcomponent bepaald wordt. Vervolgens wordt de hulpgrootte λ bepaald door terug in de tijd te rekenen en zijn de gradiënten $\text{grad}_p J (= \partial J / \partial p + \text{functie}(\lambda))$ te berekenen. Deze gradiënten worden gebruikt om het minimum van de kostfunctie te vinden. Dit gebeurt iteratief door de procedure te herhalen met telkens aangepaste waarden van de stuurvariabelen. Een groot nadeel van deze methode is dat er geavanceerde computers en een grote geheugencapaciteit voor nodig zijn.

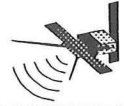
Het bespreken van de wiskundige details omtrent de verschillende assimilatiemethoden ligt buiten het terrein van dit afstudeerwerk, hiervoor zij verwezen naar *de las Heras*, 1994 en *Komen et al.*, 1994.



Dit onderzoek

In dit onderzoek is gekozen voor toepassing van een 'multi-time-level' methode, aangezien deze effectiever is dan een 'single-time-level' methode wegens consistentie met de wind-golfdynamica: correcties op het windveld zijn langer van invloed op de modelresultaten dan bij een 'single-time-level' methode. Om toegepast te kunnen worden in de operationele sfeer door bijvoorbeeld aannemers moet het systeem kunnen draaien op eenvoudige computers, zogenaamde "stand-alone's", die geen grote geheugencapaciteit bezitten. Tevens is een korte rekentijd van belang wanneer men denkt aan operationele toepassingen, waarbij er maar weinig tijd is om goede golfvoorspellingen voor 1 à 2 dagen vooruit te maken. Van de multi-time-level methoden lijkt de kleinste kwadraten methode voor deze doeleinden het meest efficiënt, maar slechts dan als men zich beperkt tot een klein aantal stuurvariabelen, aangezien de benodigde rekentijd bijna evenredig toeneemt met het aantal te corrigeren stuurvariabelen. Nu is het kleine aantal stuurvariabelen niet echt een beperking, gezien het feit dat fouten in het windveld over het algemeen globale fouten zijn, zodat correctie van een klein aantal globale parameters al heel effectief zal zijn. Tevens zijn de golven het resultaat van een integratie van de wind over plaats en tijd, dus geniet correctie van globale parameters de voorkeur boven correctie van bijvoorbeeld iedere windvector apart.

In dit onderzoek is dus gebruik gemaakt van de 'multi-time-level' methode der kleinste kwadraten met correctie van een klein aantal stuurvariabelen.



3. METHODE



3.1 INLEIDING

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het 1e/2e generatie golfmodel DOLPHIN-B [Holthuijsen en de Boer, 1988], in combinatie met het systeem ARCADIA [Booij, 1993] voor de assimilatie van golfhoogtemetingen, afkomstig van boeien en de ERS-1 radaraltimeter. De data assimilatie is toegepast volgens de variationele methode der kleinste kwadraten, zie hoofdstuk 2. Voor een beschrijving van de gebruikte gegevens wordt verwezen naar hoofdstuk 4.

Met initiële windvelden en modelcoëfficiënten wordt met het golfmodel DOLPHIN-B (zie paragraaf 3.7) een eerste schatting van de golfhoogte op voorspellingslokatie (x,y,t) gemaakt, de zogenaamde 'first guess'. Deze voorspellingslokatie en -tijden komen overeen met de lokaties en tijden waarop golfhoogtemetingen beschikbaar zijn (van de ERS-1 en de boeien). Vervolgens worden de gemeten golfgegevens geassimileerd. Hierbij worden enkele windparameters en een modelcoëfficiënt als stuurvariabelen gebruikt. Er volgt een nieuwe set stuurvariabelen, die het minimum van de kostfunctie oplevert. Met deze nieuwe waarden van de wind- en modelparameters in DOLPHIN-B kan nu een geassimileerde golfvoorspelling gemaakt worden in een willekeurig punt.

3.2 ASSIMILATIE THEORIE

Het verschil tussen gemeten (O_i) en gemodelleerde (H_i) waarden van golfparameters op i lokaties (x,y,t) moet zo klein mogelijk gemaakt worden door variatie van enkele stuurvariabelen p_j (bijvoorbeeld wind- en/of modelparameters).

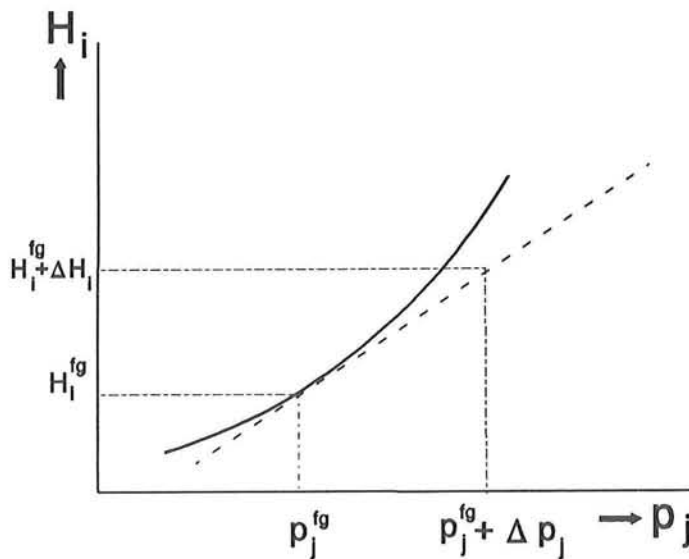
In de 'first guess' modelrun hebben de stuurvariabelen de waarde p_j^{fg} en worden de resultaatwaarden H_i^{fg} berekend. Er wordt aangenomen dat bij deviatie van p_j met Δp_j het modelresultaat ook lineair toeneemt, zie FIGUUR 3.1.

Hieruit volgt:

$$\begin{aligned} H_i &= H_i^{fg} + \Delta H_i \\ &= H_i^{fg} + \frac{\partial H_i}{\partial p_j} \Delta p_j \end{aligned} \quad (3-1)$$

De waarden van $\partial H_i / \partial p_j$ worden bepaald aan de hand van gevoeligheidsruns met het golfmodel, waarbij er steeds 1 stuurvariabele wordt gevarieerd met een gekozen afwijking Δp_j^0 en de rest van de variabelen zijn initiële waarde behoudt. Ook hier wordt een lineaire benadering aangehouden:

$$\frac{\partial H_i}{\partial p_j} \approx \frac{\Delta H_i}{\Delta p_j^0} \quad (3-2)$$



FIGUUR 3.1

LINEAIRE BENADERING VAN DE VERANDERING VAN HET MODELRESULTAAT H_i BIJ VERANDERING VAN DE STUURVARIABLE p_j IN HET PUNT H_i^{fg}

Er wordt een zogenaamde 'kostfunctie', J , opgesteld, die geminimaliseerd dient te worden. J bevat o.a. het kwadratische verschil tussen gemeten en gemodelleerde waarden:

$$J_{\text{golf}} = \sum_i [O_i - H_i]^2 = \sum_i [O_i - (H_i^{fg} + \frac{\partial H_i}{\partial p_j} \Delta p_j)]^2 \quad (3-3)$$

Tevens worden aan de kostfunctie de correcties op de stuurvariabelen toegevoegd om ervoor te zorgen dat deze correcties geen al te grote waarden aannemen:

$$J_{\text{variabele}} = \sum_j \Delta p_j^2 \quad (3-4)$$

Aangezien de termen J_{golf} en $J_{\text{variabele}}$ niet dezelfde dimensies hebben, worden ze dimensieloos gemaakt met vooraf gekozen standaard deviaties (betrouwbaarheden) van de metingen (σ_{O_i}) en van de stuurvariabelen (σ_{p_j}). Hierna kunnen ze worden opgeteld in een dimensie-loze kostfunctie \tilde{J} :

$$\tilde{J} = \sum_i \frac{[O_i - (H_i^{fg} + \frac{\partial H_i}{\partial p_j} \Delta p_j)]^2}{\sigma_{O_i}^2} + \sum_j \frac{\Delta p_j^2}{\sigma_{p_j}^2} \quad (3-5)$$

Het minimum van de kostfunctie wordt bepaald door de afgeleide van \tilde{J} te nemen naar de



correcties op de stuurvariabelen en deze gelijk aan 0 te stellen:

$$\frac{\partial \bar{J}}{\partial \Delta p_j} = \sum_i \frac{2 \frac{\partial H_i}{\partial p_j} [O_i - (H_i^{\text{fg}} + \frac{\partial H_i}{\partial p_j} \Delta p_j)]}{\sigma^2_{O_i}} + \sum_j \frac{2 \Delta p_j}{\sigma^2_{p_j}} = 0 \quad (3-6)$$

De onbekenden Δp_j zijn uit dit homogene stelsel lineaire vergelijkingen te bepalen door middel van Gauss eliminatie.

Uiteindelijk worden de nieuwe waarden van de stuurvariabelen, $p_j^{\text{nieuw}} = p_j^{\text{fg}} + \Delta p_j$, in het golfmodel gebruikt voor de geassimileerde golfvoorspelling.

Het totale aantal modelruns dat gedraaid dient te worden is gelijk aan een 'first guess' run, plus evenveel gevoeligheidsruns als het aantal stuurvariabelen en daarna nog een modelrun met de gecorrigeerde waarden van de stuurvariabelen. Bij k stuurvariabelen zijn dus $k+2$ modelruns benodigd. In het geval van tijdrovende berekeningen door het golfmodel zal deze methode alleen efficiënt zijn bij een beperkt aantal stuurvariabelen.

3.3 STUURVARIABLEN, ASSIMILATIE TIJDSHEMA

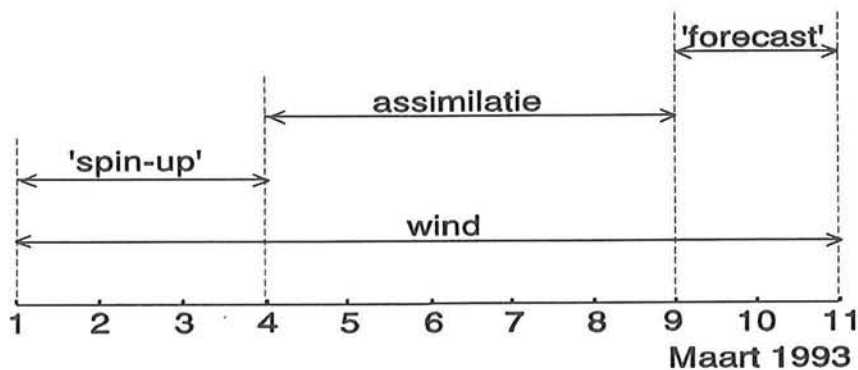
Zoals vermeld in paragraaf 2.2, waar de keuze van de assimilatie methode wordt gemotiveerd, is in dit onderzoek gebruik gemaakt van slechts een beperkt aantal stuurvariabelen. De correctie op deze variabelen is constant in de tijd en de ruimte gehouden in deze eenvoudige eerste opzet van het data assimilatie systeem, dat in de toekomst zeker uitgebreid zal worden. De gebruikte stuurvariabelen zijn:

- x_{w0}, y_{w0} : de coördinaten van de oorsprong van het windveld. Door verschuiving van het windveld wordt de lokatie van de storm gecorrigeerd. Als gevolg hiervan veranderen de afstand en richting van de storm t.o.v. het voorspellingspunt. Hierdoor zullen golfhoogte -frequentie en -richting ter plaatse van het voorspellingspunt veranderen.
- $|\vec{w}|$: de grootte van de windvectoren geven de diepte van een depressie aan: een depressie met grote luchtdrukverschillen over een kleine afstand zorgt voor hoge windsnelheden ter plaatse, wat weer hoge golven tot gevolg heeft.
- θ_w : de richting van de windvectoren heeft voornamelijk invloed op de golfrichting, maar tevens op de golfhoogte: vooral op plaatsen dicht bij de kust is de windrichting van groot belang i.v.m. de beschikbare strijklengte waarover de golven zich kunnen ontwikkelen.
- Γ : De waarde van de DOLPHIN-B dissipatie coëfficiënt Γ is in het verleden bepaald aan de hand van slechts 1 experiment. Wegens de grote onzekerheid omtrent de juistheid van deze waarde wordt deze term als stuurvariabele gebruikt.



Allereerst zijn er met DOLPHIN-B schattingen ('first guess' runs) gemaakt van de significante golfhoogte H_s voor uitvoerlokatie t.p.v. de ERS-1 tracks en de Waverider boeien bij Scott en Haltenbanken over de periode 1-10 maart 1993 (zie hoofdstuk 4). Hierna is de significante golfhoogte van deze boeien en/of de ERS-1 geassimileerd. De standaard deviaties van de boei- resp. satellietgolfhoogten zijn 0.1 resp. 0.2 maal hun waarden gekozen: de boeigegevens worden meer betrouwbaar geacht dan de satellietgegevens. Met de nieuwe set stuurvariabelen zijn vervolgens opnieuw DOLPHIN-B runs, de geassimileerde runs, gedraaid op de gekozen uitvoerlokatie.

Zoals te zien is in het schema in FIGUUR 3.2 worden eerst de inspeelverschijnselen van DOLPHIN-B in de 'spin-up' periode van 3 dagen weggewerkt. Daarna volgt een periode van 5 dagen waarin de metingen geassimileerd worden en vervolgens 2 dagen 'forecast'. De nieuwe set stuurvariabelen wordt hierbij geëxtrapoleerd naar de 'forecast' periode: de nieuwe waarden voor de lokatie van de storm, de diepte van de depressie etc. worden ook in de 'forecast' aangehouden.



FIGUUR 3.2

ASSIMILATIE TIJDSHEMA: 3 DAGEN 'SPIN-UP', 5 DAGEN ASSIMILATIE, 2 DAGEN 'FORECAST'.

3.4 INVLOED VAN ASSIMILATIE VAN LOKALE EN/OF GLOBALE GEGEVENS

Het onderzoeken van de invloed van assimilatie van lokale (boei-) en/of globale (satelliet-) gegevens staat allereerst centraal. Naar alle waarschijnlijkheid zal assimilatie van lokale informatie vooral lokaal een gunstige invloed hebben op de voorspelling. Dit in tegenstelling tot assimilatie van globale informatie, waarbij verwacht mag worden dat door de assimilatie het golfveld globaal gecorrigeerd zal worden, waardoor lokale voorspellingen minder nauwkeurig zullen zijn. Daarentegen zal elders opgewekte deining niet met assimilatie van lokale gegevens 'opgepikt' worden, terwijl dit bij globale gegevens wel het

¹ de 'forecast' is eigenlijk een 'hindcast', aangezien er gerekend wordt met geanalyseerde windvelden.



geval kan zijn. Er zijn diverse assimilaties (A1 t/m A7) gedaan met verschillende combinaties van golfhoogtemetingen afkomstig van de boeien Scott en Haltenbanken (lokale informatie) en de ERS-1 satelliet (globale informatie), om te kunnen bepalen welke assimilatie van (combinatie van) gegevens uiteindelijk de beste voorspelling in de uitvoerlokaties tot gevolg had (zie TABEL III.1).

ass. nr.	assimilatie van H_s van satelliet en/of boei(en):
A1	ERS-1
A2	Scott
A3	Haltenbanken
A4	Scott + Haltenbanken
A5	ERS-1 + Scott
A6	ERS-1 + Haltenbanken
A7	ERS-1 + Scott + Haltenbanken

TABEL III.1

ASSIMILATIES VAN LOKALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN

3.5 INVLOED VAN DE GROOTTE VAN DE STANDAARD DEVIATIES

De standaard deviaties (s.d.'s) van de stuurvariabelen worden op een subjectieve manier bepaald. Indien men grote s.d.'s toestaat, zijn grote correcties op de stuurvariabelen mogelijk. Hierdoor krijgt het systeem een grote mate van vrijheid om een zo klein mogelijke waarde van het minimum van de kostfunctie te vinden. Het relatieve gewicht van de stuurvariabelen in de kostfunctie wordt kleiner t.o.v. dat van de metingen. Toepassing van de, na assimilatie, gecorrigeerde waarden van de stuurvariabelen in het, in de assimilatie lineair veronderstelde, model zal tot gevolg hebben dat het modelresultaat dichtbij de metingen komt te liggen. Een kleine fout tussen modelresultaat en meting is het gevolg. Echter, de gecorrigeerde waarden van de stuurvariabelen worden gebruikt in een aparte DOLPHIN-B run. Door het sterk niet-lineaire karakter van DOLPHIN-B zullen bij grote correcties van de stuurvariabelen juist grote afwijkingen tussen de nieuwe modelresultaten en de bij het minimum van de kostfunctie behorende modelresultaten ontstaan. Als gevolg hiervan zal de fout tussen de nieuwe modelresultaten en de metingen weer toenemen.

Het is dus moeilijk in te schatten of men grote, dan wel kleine waarden van de standaard



deviaties moet kiezen. In de assimilaties A1 t/m A7 waren de s.d.'s zeer groot gekozen (gelijk aan de waarden bij B1 in TABEL III.2), in de assimilaties B2 t/m B8 (assimilaties met boeimetingen van Haltenbanken) worden de s.d.'s vervolgens verkleind om te onderzoeken wat de invloed van de grootte van de s.d.'s op de correcties van de stuurvariabelen is (zie tabel III.2). Na de assimilaties worden nieuwe golfvoorspellingen gemaakt t.p.v. Haltenbanken om het effect op de nieuwe modelresultaten te bepalen.

	Standaard deviaties				
	σ_{xw0} (°)	σ_{yw0} (°)	$\sigma_{ \vec{w} }$ (%)	$\sigma_{\delta\vec{w}}$ (°)	σ_{Γ} (%)
B1	10	10	100	100	100
B2	2	2	100	100	100
B3	2	2	100	10	100
B4	1	1	100	10	100
B5	1	1	100	5	100
B6	1	1	50	5	100
B7	1	1	100	5	50
B8	10	10	50	10	100

TABEL III.2

ASSIMILATIES VAN H_s VAN DE BOEI BIJ HALTENBANKEN MET VARIATIE VAN DE STANDAARD DEVIATIES VAN DE STUURVARIABLEN



3.6 SCATTERINDEX

Teneinde op een kwantitatieve manier aan te kunnen geven hoeveel de golfvoorspelling na data assimilatie beter geworden is t.o.v. de first guess, is een 'scatterindex' gebruikt. Deze is gedefinieerd als de 'root mean square' van het verschil tussen gemeten en gemodelleerde waarden, genormeerd met het gemiddelde van de metingen. Uiteraard geldt: des te kleiner de scatterindex des te kleiner de fout.

$$\text{Scatterindex, } S.I. = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (O_i - H_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (3-7)$$

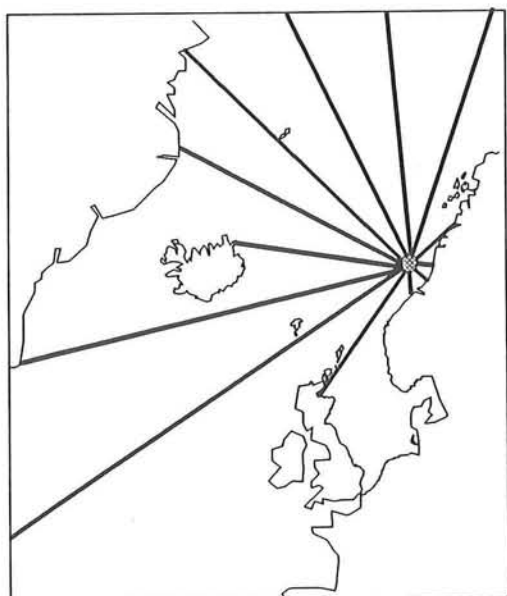
waarin:

- O_i = de gemeten waarde van H_s (boeien, ERS-1)
- H_i = de berekende waarde van H_s (DOLPHIN-B)
- N = het totaal aantal meetwaarden



3.7 HET GOLFMODEL DOLPHIN-B

DOLPHIN-B [Holthuijsen en de Boer, 1988] is een 1e/2e generatie diep water discreet spectraal golfmodel, dat het 2-dimensionale energiespectrum in één punt (x_0, y_0, t_0) berekent. Hiervoor worden vanuit dat punt stralen geschoten in een 'sprinkler' patroon naar de kust en/of de rand van het gemodelleerde gebied. Vervolgens wordt vanaf de kust en/of de rand van het gebied de energiebalans bijgehouden van de verschillende golfcomponenten, die zich met de groepssnelheid voortplanten langs de stralen in de richting van het voorspellingspunt (zie FIGUUR 3.3) en tegelijkertijd (op tijdstip t_0) aankomen in het voorspellingspunt (x_0, y_0) .



FIGUUR 3.3

'SPRINKLER' PATROON VAN STRALEN VANUIT HET VOORSPELLINGSPUNT

De energiebalans luidt:

$$\frac{dE(f,\theta)}{dt} = S(f,\theta) \quad (3-8)$$

waarin de bronfunctie voor groei door wind als volgt is geformuleerd:

$$S(f,\theta) = A(f,\theta,\vec{w}) \quad + \quad B(f,\theta,\vec{w}) \cdot E(f,\theta) \quad \text{voor } E \leq E_{\text{lim}} \quad (3-9)$$

\rightarrow *lineaire golfgroei* *exponentiele golfgroei*

met:

\vec{w} = wind (grootte en richting)

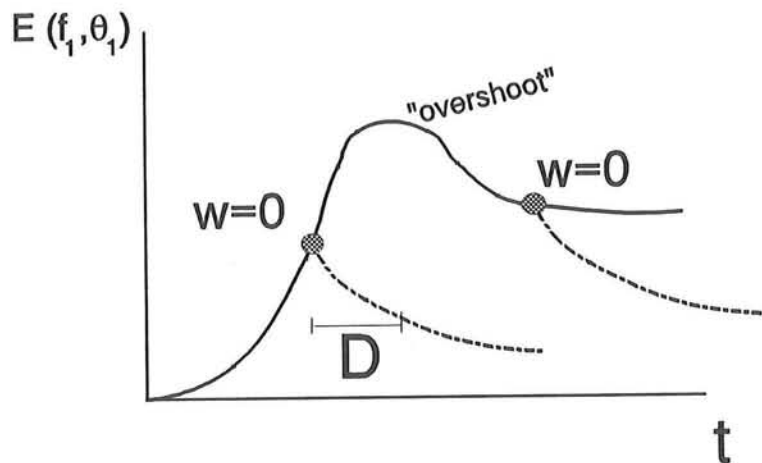
E_{lim} = limietwaarde voor de energiedichtheid



Zodra de berekende energiedichtheid groter wordt dan de in een bepaalde toestand maximale waarde, E_{lim} , doordat bijvoorbeeld ineens de wind wegvalt ($|\vec{w}|=0$, zie FIGUUR 3.4), treedt een dissipatie bronterm in werking met de volgende vorm:

$$S(f, \theta) = \frac{E_{\text{lim}} - E}{D} \quad \text{voor } E > E_{\text{lim}} \quad (3-10)$$

waarin D een dissipatie tijdschaal voorstelt. Als stuurvariabele in de assimilatie wordt gebruikt de dissipatie coëfficiënt Γ , welke omgekeerd evenredig is met D .



FIGUUR 3.4

GROEI VAN HET SPECTRUM IN EEN CONSTANT WINDVELD VOOR DE GOLFCOMPONENT (f_1, θ_1) . DE DISSIPATIE, MET TIJDSCHAAL D , TREEDT IN WERKING BIJ OverschRIJDING VAN E_{lim} DOOR BV. PLOTSSELINGE AFNAME VAN DE WIND ($w=0$)

De limietwaarde voor de spectrale energiedichtheid in deze uitdrukkingen is gegeven door het Pierson-Moskowitz spectrum:

$$E_{\text{lim}}(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-4} \right] \quad (3-11)$$

met hierin:

α = energieschaal parameter

g = zwaartekrachtsversnelling

f_m = frequentieschaal parameter



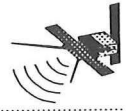
Ver weg van het voorspellingspunt werkt DOLPHIN-B als een 1e generatie golfmodel: de niet-lineaire wisselwerkingen worden niet meegenomen ($\alpha = \text{constant} = 0.0081$, en $f_m = 0.13$). In de buurt van het voorspellingspunt echter, worden deze wel meegenomen door daar de limietwaarde van de energiedichtheid afhankelijk te maken van de totale dimensieloze energiedichtheid ter plaatse van het voorspellingspunt:

$$\alpha = \alpha \left(\frac{g^2 E_{\text{tot}}}{|\vec{w}|^4} \right) \quad (3-12)$$

Hierin is E_{tot} de totale energie van het windzee gedeelte van het spectrum in het voorspellingspunt. DOLPHIN-B werkt hier dus als een 2e generatie golfmodel.

Na invoering van de windvelden ($\vec{w}_{10}(x,y,t)$: windvectoren met grootte en richting op 10 meter hoogte) en de kustlijn berekent DOLPHIN-B o.a. de volgende golfparameters in het voorspellingspunt:

- het 2-dimensionale energiedichtheidsspectrum
- het 1-dimensionale energiedichtheidsspectrum
- de gemiddelde golfrichting als functie van de frequentie
- de richtings spreiding als functie van de frequentie
- significante golfhoogte, gemiddelde frequentie en piekfrequentie



4. DATA



4.1 ALGEMEEN

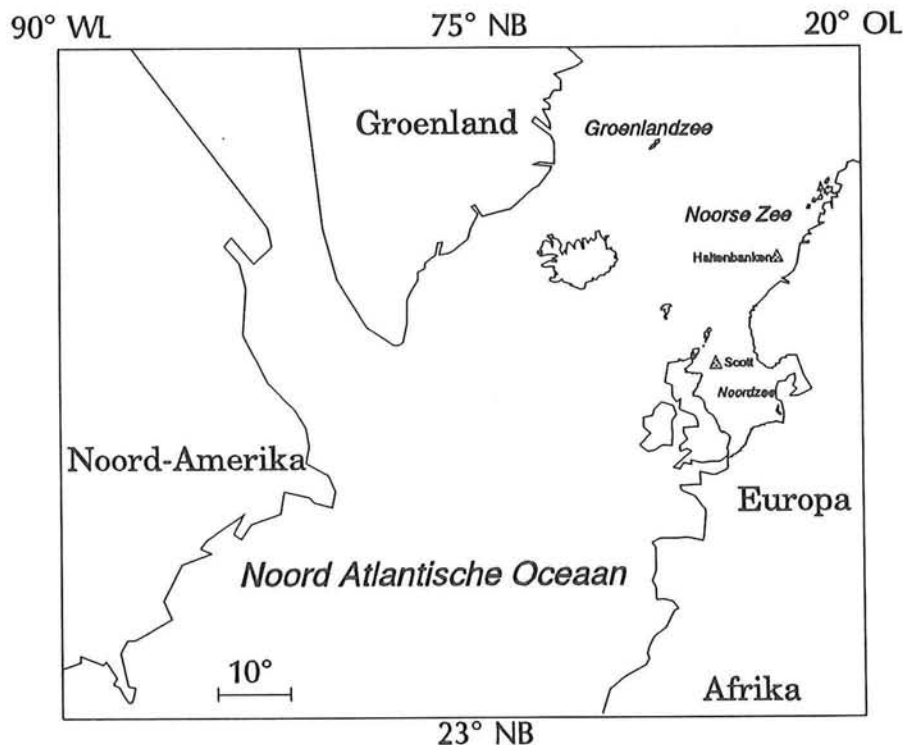
De berekeningen zijn gedaan voor de periode 1 tot en met 10 maart 1993. Het beschouwde gebied omvat de Noord Atlantische Oceaan, Noordzee en Noorse Zee :

23° NB - 75° NB

90° WL - 20° OL

De kaart in FIGUUR 4.1 geeft het gebied weer met de in het golfmodel gebruikte kustlijn. Hoewel de aandacht in dit onderzoek voornamelijk uitging naar de golven in de Noordzee en Noorse Zee, is tevens de Noord Atlantische Oceaan in de golfberekeningen meegenomen. De reden hiervoor is dat de golfenergie vanuit het (zuid)westen de Noorse Zee en de Noordzee in kan lopen, zodat het noodzakelijk is om goede randvoorwaarden op te leggen ook indien men alleen de Noorse Zee en de Noordzee modelleert.

In FIGUUR 4.1 is te zien dat de kustlijn rond de Noordzee meer in detail is gegeven dan de kust van bijvoorbeeld Noord-Amerika. Doordat de energiebalans wordt bijgehouden langs stralen, die uitwaaieren vanaf het voorspellingspunt, is de invloed van de exacte ligging van de kustlijn rondom de voorspellingspunten, Scott en Haltenbanken, groter dan die van ver weg gelegen oorden. In de Noordzee en Noorse Zee is de kustlijn dan ook in meer detail gegeven.



FIGUUR 4.1

KAART VAN HET BESCHOUWDE GEBIED (90°WL-20°OL, 23°NB-75°NB) MET DE LOKATIES VAN DE VOORSPELLINGSPUNTEN SCOTT EN HALTENBANKEN



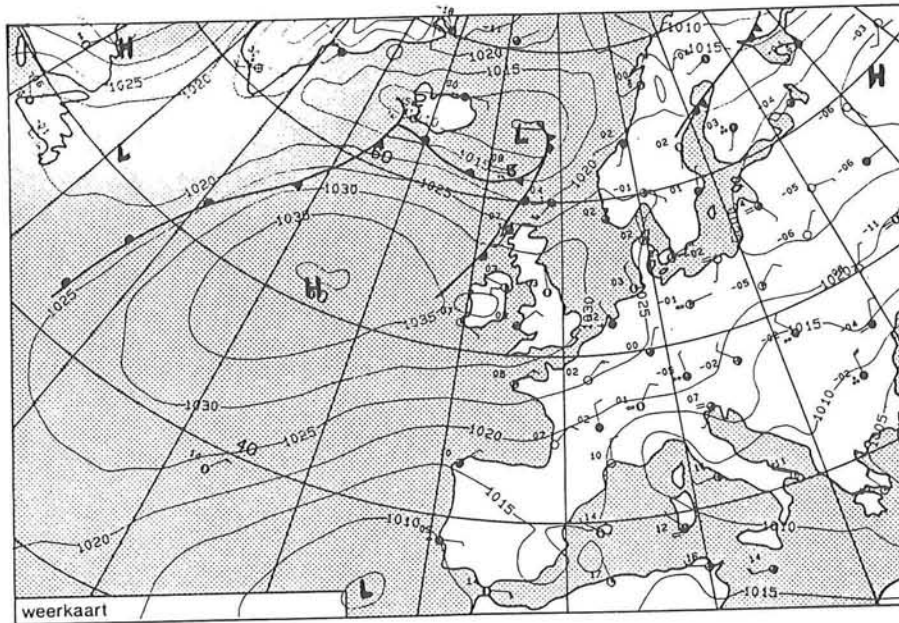
4.2 METEOROLOGISCHE GEGEVENS

In de periode van 1 tot 10 maart 1993 zijn er twee lagedrukgebieden vanuit de Atlantische Oceaan over de Groenlandzee en de Noorse Zee getrokken: rond 4-5 maart en 7-9 maart (zie de weerkaarten van 4 en 8 maart 12.00 UTC in FIGUUR 4.2, resp. FIGUUR 4.4). Door deze stormen waren er in die periode hoge golven in de Noordzee en Noorse Zee, en ook bleek er aardig wat deining opgewekt te zijn [*Delft Hydraulics report H1688*, 1994]. Dit was de reden om voor deze periode te kiezen in dit onderzoek.

De windvelden, die in dit afstudeerwerk zijn gebruikt, zijn gemaakt door het ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) in Reading, Engeland. In deze windvelden zijn de vectoren van de wind op 10 meter hoogte, \vec{w}_{10} , om de 6 uur gegeven op een rooster van $1^\circ \times 1^\circ$ in het gebied (23°NB - 75°NB , 90°WL - 20°OL). De windvelden behorende bij de weerkaarten van 4 en 8 maart zijn gegeven in FIGUUR 4.3 en FIGUUR 4.5. In bijlage I is een meer uitgebreide omschrijving gegeven van de stormen in de periode 1-10 maart 1993.

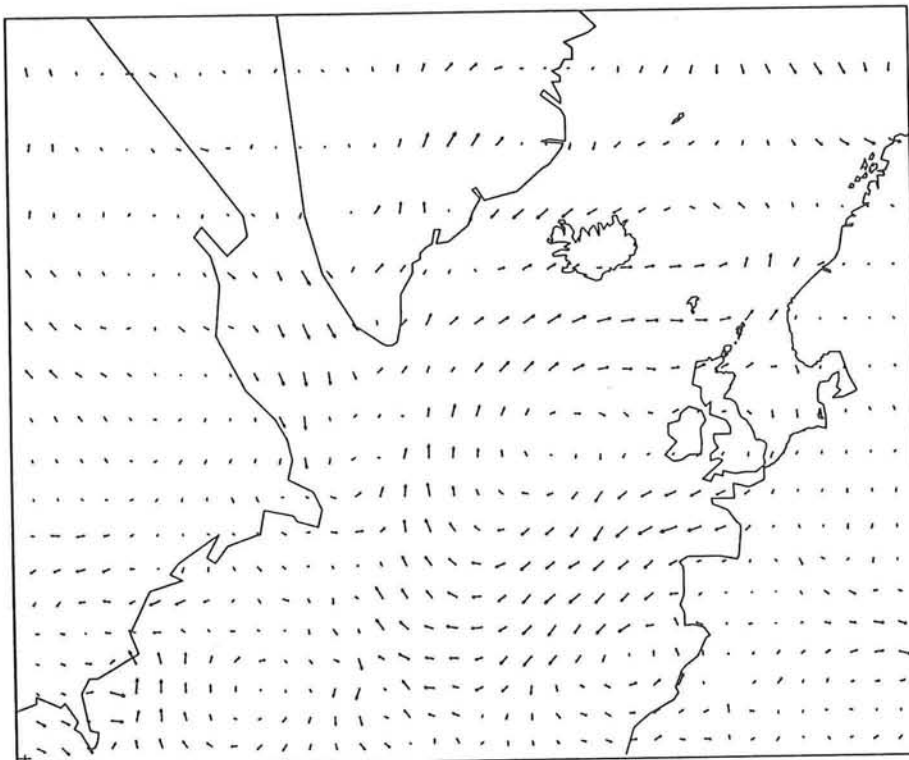
4.3 BOEIEN

De gebruikte boeigegevens zijn afkomstig van Waverider boeien bij Scott (0.2°OL , 58.2°NB) en Haltenbanken (7.6°OL , 65.1°NB). De 1-dimensionale energiespectra, $E(f)$, en de bijbehorende spectrale parameters, zoals de significante golfhoogte en gemiddelde periode, zijn berekend uit registraties met een duur van ca. 20 minuten. De spectra zijn weergegeven in FIGUUR 4.6 en FIGUUR 4.7. Aangezien de gegevens van Haltenbanken iedere 3 uur beschikbaar waren, zijn de significante golfhoogten van zowel Scott als Haltenbanken om de 3 uur geassimileerd (zie FIGUUR 4.8 en FIGUUR 4.9). Enkele gegevens van Scott ontbreken (nl. op 6, 8 en 10 maart 1993), welke in de figuren zijn weergegeven met $H_s = 0$ m. Deze waarden zijn uiteraard niet meegenomen in de assimilatie. Ondanks dat de metingen van H_s te Scott op 5 maart 21^{oo} en 7 maart 18^{oo} lagere waarden geven dan men zou verwachten, zijn deze in dit onderzoek toch meegenomen in de assimilaties. De boeigegevens van Scott zijn afkomstig van Heeremac V.O.F., de gegevens van Haltenbanken zijn beschikbaar gesteld door OCEANOR A/S.



FIGUUR 4.2

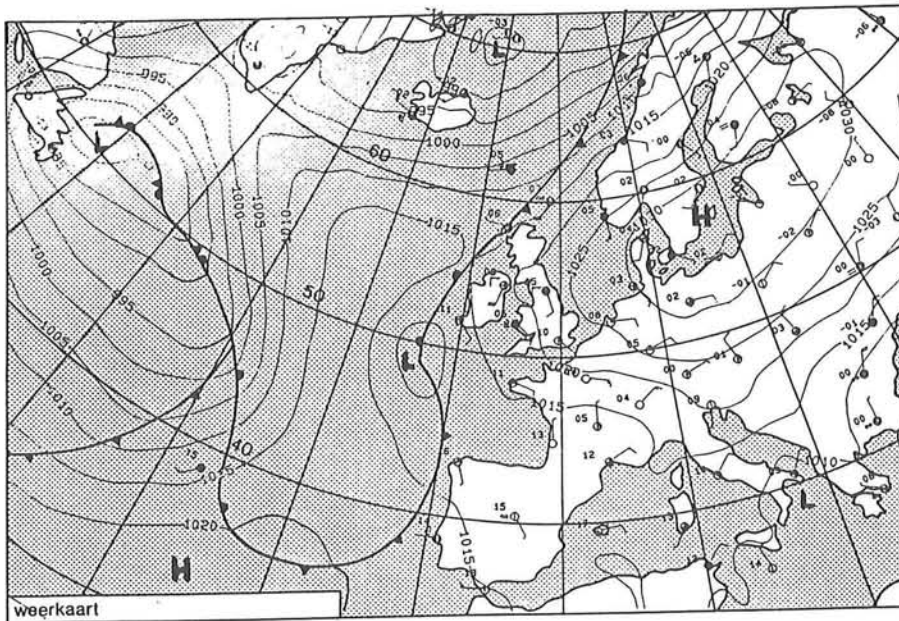
WEERKAART 4 MAART 1993, 12.00 UTC [BRON: KNMI]



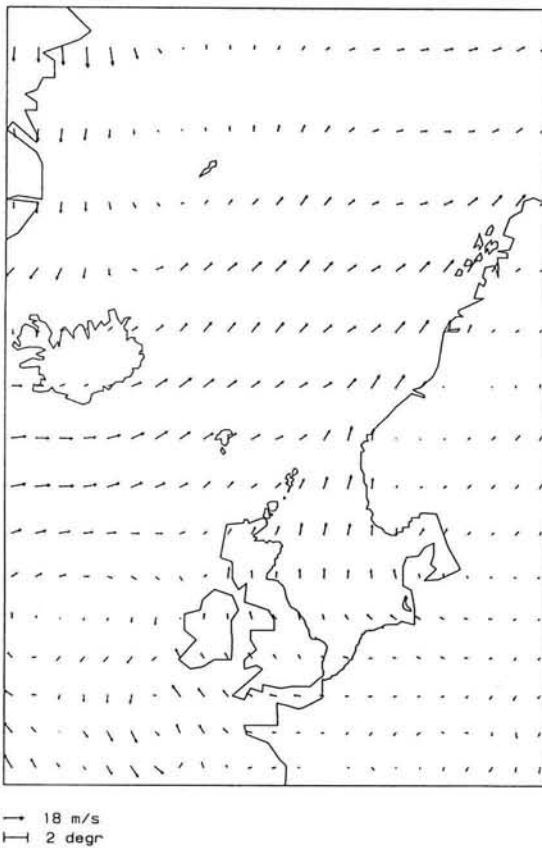
→ 18 m/s
 | 10 degra

FIGUUR 4.3

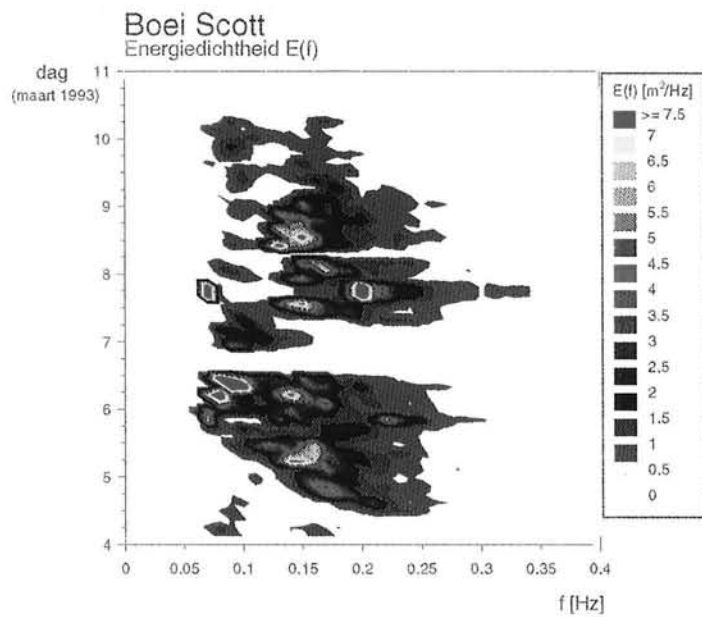
WINDVELD 4 MAART 1993, 12.00 UTC, \vec{W}_{10} GEGEVEN OP ROOSTER $1^\circ \times 1^\circ$, (GEHELE GEBIED, VANWEGE DE SCHAAL GEPLIT OP EEN ROOSTER VAN $3^\circ \times 3^\circ$) [BRON: ECMWF]



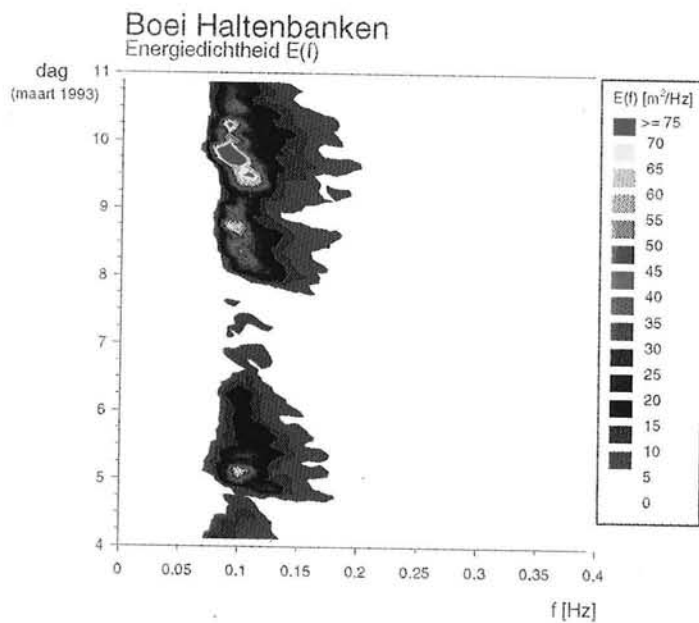
FIGUUR 4.4
 WEERKAART 8 MAART 1993, 12.00 UTC [BRON: KNMI]



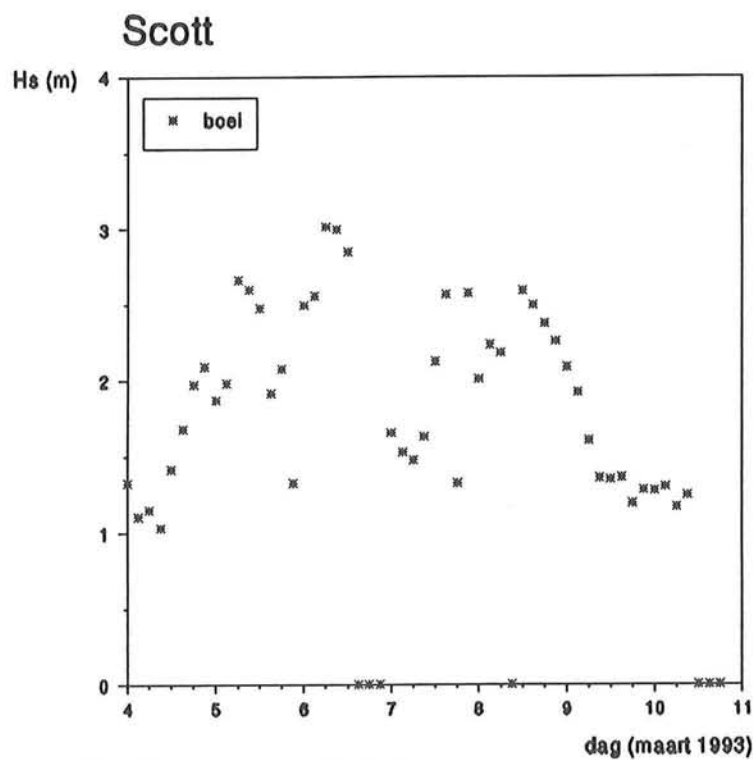
FIGUUR 4.5
 WINDVELD 8 MAART 1993, 12.00 UTC, \vec{w}_{10} GEGEVEN OP ROOSTER $1^\circ \times 1^\circ$, ('INGEZOOMD' OP DE NOORDZEE & NOORSE ZEE, VANWEGE DE SCHAAL GEPLIT OP EEN ROOSTER VAN $2^\circ \times 2^\circ$) [BRON: ECMWF]



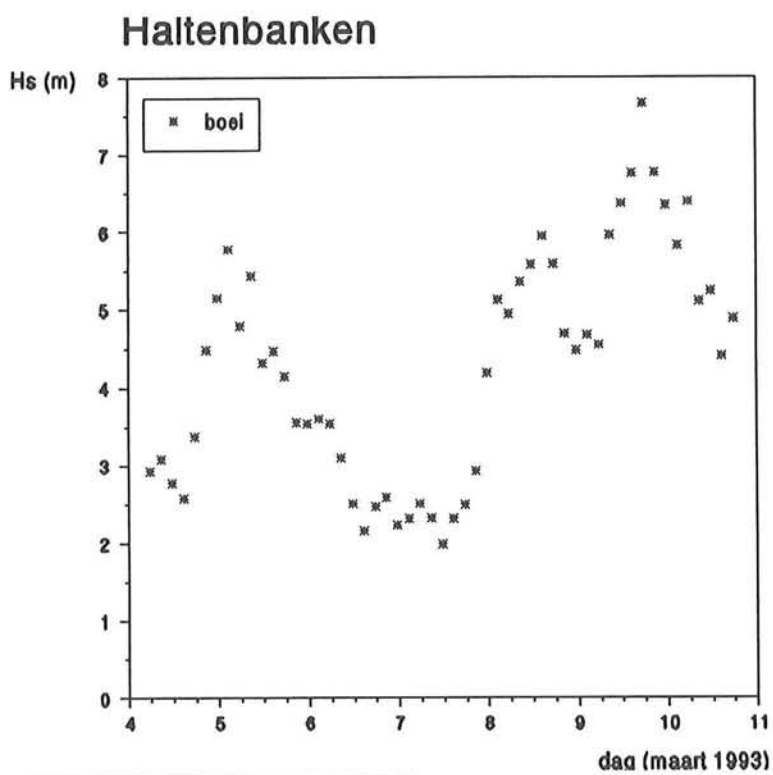
FIGUUR 4.6
 $E(f)$ BOEI SCOTT



FIGUUR 4.7
 $E(f)$ BOEI HALTENBANKEN



FIGUUR 4.8
 H_s BOEI SCOTT



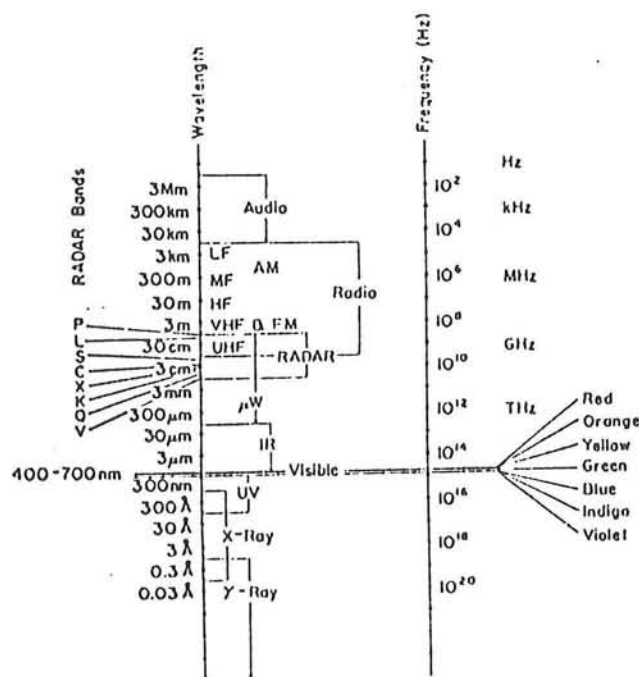
FIGUUR 4.9
 H_s BOEI HALTENBANKEN



4.4 ERS-1

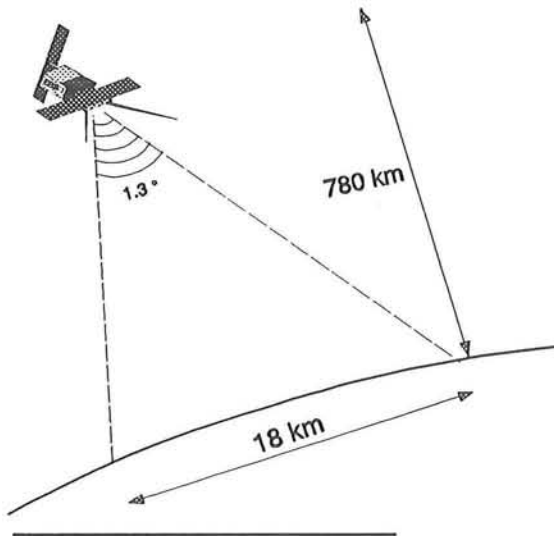
In juli 1991 bracht de ESA de remote sensing satelliet "ERS-1" in de ruimte, op ca. 785 km hoogte, met een 35-daagse herhalingscyclus (in de gekozen assimilatie periode van 1-10 maart 1993). Aan boord bevindt zich een radarhoogtemeter (altimeter), waarmee onder andere satelliet- en golfhoogte bepaald worden. De radar signalen worden ter plaatse van grondstations snel bewerkt tot hanteerbare golfgegevens. Deze snelle bewerking (enkele uren) levert 'fast delivery products' op, die meteen naar de gebruikers gezonden worden. Een meer uitgebreide (enkele weken durende) verwerking van de signalen levert de zogenaamde 'offline products' op. Deze zijn over het algemeen betrouwbaarder dan de 'fast delivery products'. Wegens het grote succes van de ERS-1 is in april 1995 haar opvolger, de ERS-2, gelanceerd, met eveneens een radarhoogtemeter aan boord.

De radartechniek maakt gebruik van radiogolven, die behoren tot het spectrum van de elektromagnetische golven, zie FIGUUR 4.10. De ERS-1 altimeter gebruikt een frequentie van 13.8 GHz. De radarantenne fungeert zowel als zender als ontvanger van EM-golven en is een richtingsantenne, waardoor de radargolven alleen in de gewenste richting worden uitgezonden, zie FIGUUR 4.11.



FIGUUR 4.10

HET ELECTROMAGNETISCH SPECTRUM [MAUL, 1985]



FIGUUR 4.11

ERS-1 MET GERICHTE SPHERISCHE EM-STRALING (NIET OP SCHAAL)

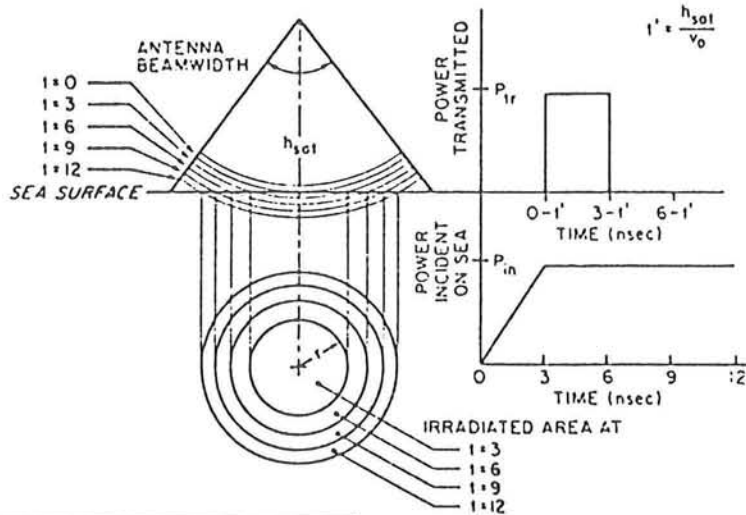
De EM-golven worden gepulseerd verzonden, en planten zich langs golfstralen en met spherische golffronten voort in de richting van de aarde. Zodra de EM-pulsen aankomen bij het zeeoppervlak 'bestralen' ze de plaats van inval en zullen deels gereflecteerd doordringen in het water en deels gereflecteerd worden. Wanneer een EM-golf in een geleider (zoals zeewater) loopt, wordt hij verzwakt doordat in de geleider een wisselstroom wordt opgewekt, die ten gevolge van de weerstand van de geleider aanleiding geeft tot warmteontwikkeling. De indringdiepte van de EM-straling in het zeewater blijkt omgekeerd evenredig te zijn met de elektrische geleiding van het zeewater en met de frequentie van de straling. Door gebruik van zeer hoge frequenties (ca. 14 GHz) is de indringdiepte van de hier beschouwde straling in het goed geleidende zeewater te verwaarlozen, zodat slechts een kleine fractie van de energie van de invallende golf in het water binnendringt. Hierdoor wordt de stralingsenergie dus voornamelijk gereflecteerd [Alonso en Finn, 1973].

Bij een glad grensvlak kan de groei van het bestraalde oppervlak, en hiermee dus het verloop van het invallend vermogen in de tijd ter plaatse van dit grensvlak, als volgt beschreven worden (zie FIGUUR 4.12): op $t=0$ komt de rechthoekige puls (met lengte τ) aan bij het grensvlak en bestraalt slechts 1 punt (nadir). Vanaf $t=0$ tot $t=\tau$ groeit de bestraalde cirkelvormige oppervlakte in de tijd. Vanaf $t=\tau$ wordt het bestraalde oppervlak een ring met steeds groter wordende diameter; de totale oppervlakte blijft hierbij constant, totdat de breedte van de antennestraal bereikt is. Het invallend vermogen blijft dus na $t=\tau$ nagenoeg gelijk. Door de karakteristieke vorm van de puls, het 'antenne patroon', dat een sterke intensiteit in het midden vertoont en een zwakkere aan de zijanten, neemt het invallend vermogen toch langzaam af naar mate de ring groter wordt.

Indien het oppervlak perfect glad zou zijn, dan zouden slechts de ter plaatse van nadir



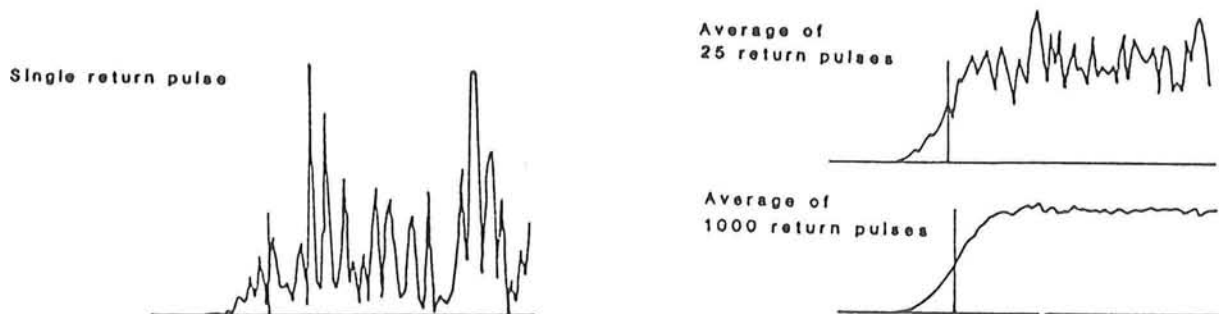
gereflecteerde pulsen de antenne weer bereiken. Echter, het zeeoppervlak met haar onregelmatigheden wordt als 'ruw' ervaren door de invallende straling en vele vlakjes van rimpelingen in het water zijn loodrecht op de straling georiënteerd. Hierdoor is reflectie mogelijk vanaf een groter oppervlak dan alleen vanaf nadir.



FIGUUR 4.12

INVALLENDE STRALING OP EEN GLAD OPPERVLAK [MAUL, 1985]

Indien een EM-puls invalt op een golvend zeeoppervlak zal er eerst reflectie vanaf de golftoppen plaatsvinden, en daarna vanaf de golfdalen. Hierdoor zal er eerder reflectie optreden dan bij een glad oppervlak, en tevens zal het invallend vermogen pas veel later dan na $t=\tau$ zijn maximum bereiken, nl. pas wanneer de staart van de puls bij het golfdal t.p.v. nadir is aangekomen. Dit gaat alleen op wanneer de pulslengte voldoende klein is ten opzichte van de golfhoogte. De puls wordt dus vervormd en uitgerekt tijdens de reflectie. Om een realistisch beeld te verkrijgen van de vorm van een gereflecteerde puls is het noodzakelijk om meerdere pulsen te middelen, aangezien het signaal van één enkele puls aanzienlijk verstoord wordt door ruis, zie FIGUUR 4.13.

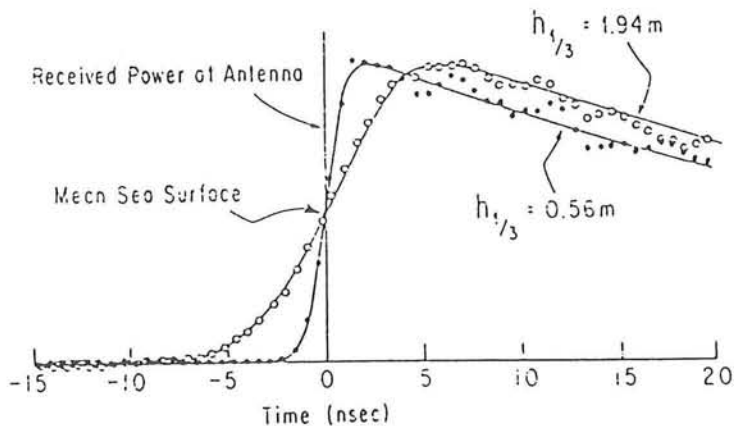


FIGUUR 4.13

PULSMIDDELING [ROBINSON, 1985]



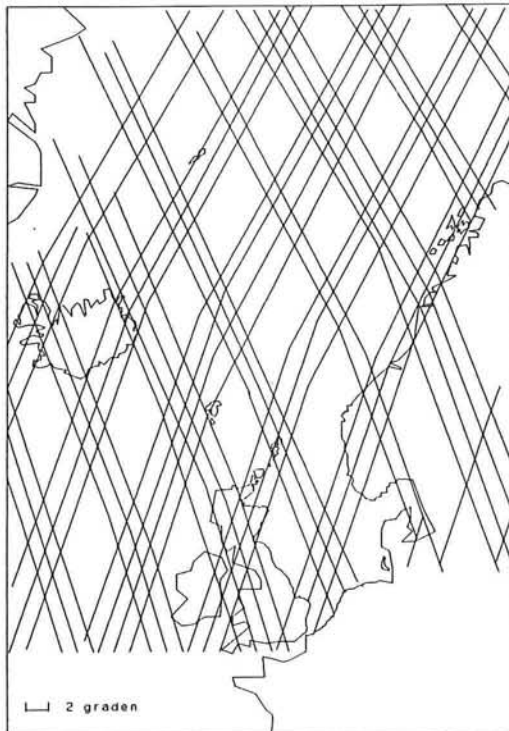
Uit de middeling van 1000 pulsen blijkt dat de voorste rand van de puls een helling heeft gekregen, conform de theorie dat het invallend vermogen langzamer toeneemt naar mate de golven hoger zijn. Deze helling is gerelateerd aan de standaard deviatie van de (Gaussische) zeeoppervlak hoogteverdeling, en dus tevens aan de significante golfhoogte: hoe groter de significante golfhoogte, des te flauwer de voorste helling van de (gemiddelde) puls, zie FIGUUR 4.14.



FIGUUR 4.14

PULSHELLING: BIJ HOGERE GOLVEN VERTOONT DE (GEMIDDELDE) PULS EEN FLAUWERE VOORSTE HELLING [MAUL, 1985]

De 'offline' gegevens van de ERS-1 altimeter zijn beschikbaar gesteld door de faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek van de Technische Universiteit Delft. De bestanden bevatten de metingen van de significante golfhoogte over 1 seconde gemiddeld over een zeeoppervlak van ca. $(18 \text{ km})^2$, zie FIGUUR 4.11. Gezien de grote hoeveelheden aan data zijn voor de assimilatie alleen satellietmetingen boven de Noordzee en Noorse Zee gebruikt ($25^\circ \text{WL}-20^\circ \text{OL}$, $50^\circ \text{NB}-75^\circ \text{NB}$). Per dag komt de ERS-1 ongeveer drie maal over dit gedeelte van het beschouwde gebied. De geschematiseerde banen van de ERS-1 in de periode 1-10 maart 1993 staan weergegeven in FIGUUR 4.15. Met een snelheid van de satelliet van ongeveer 100 minuten per orbit ($\approx 7.5 \text{ km/s}$) duurt een gemiddelde satellietbaan over het gebied ca. 6 minuten. Bij assimilatie gedurende 5 dagen (4-8 maart 1993) levert dat dus $(5 \text{ dagen} \times 3 \text{ banen/dag} \times 6 \text{ minuten/baan} \times 1 \text{ meetwaarde/s} \times 60 \text{ s/min})$ 5400 meetwaarden voor de significante golfhoogte op. Om deze grote hoeveelheid aan gegevens te reduceren tot hanteerbare hoeveelheden is iedere 40° waarde gebruikt, wat neerkomt op 1 meetwaarde per 260 km langs een baan. De metingen boven land zijn eruit gehaald, waarna uiteindelijk in totaal 108 H_s -meetwaarden overblijven, die in de assimilaties zijn gebruikt.



FIGUUR 4.15

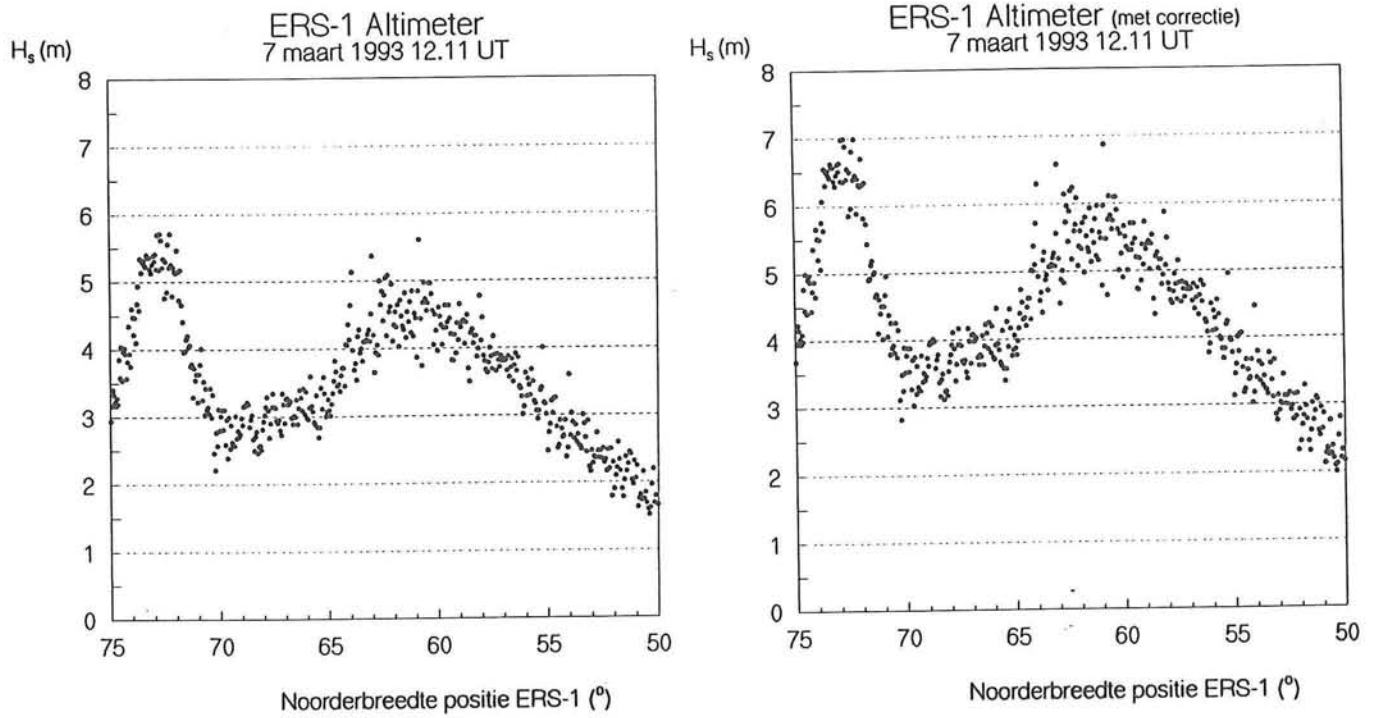
BANEN VAN DE ERS-1 BOVEN DE NOORDZEE EN NOORSE ZEE, 1-10 MAART 1993

Aanvankelijk is er een groot aantal assimilaties uitgevoerd met de 'offline' ERS-1 data, zoals die verkregen waren. De resultaten van deze assimilaties waren teleurstellend en zijn niet in dit rapport opgenomen. Toen bleek uit de literatuur, *Queffeuou, 1994* en *Cotton en Carter, 1994*, dat het algoritme, waarmee de data worden gegenereerd uit het radarsignaal, een aanzienlijke 'bias' veroorzaakt. Hierdoor is een correctie benodigd. Voor 'offline' data luidt deze correctie volgens *Queffeuou, 1994*, als volgt:

$$H_{s, \text{offline}} = 1.19 \cdot H_s + 0.19 \text{ m} \quad (0.5 \text{ m} < H_s < 6 \text{ m}) \quad (4-1)$$

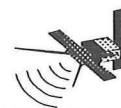
De resultaten van de assimilaties met de gecorrigeerde ERS-1 meetwaarden waren zodanig veel beter dan die met de ongecorrigeerde meetwaarden, dat alle assimilaties (ook degenen die voor dit onderzoek reeds uitgevoerd waren) met deze gecorrigeerde meetwaarden zijn uitgevoerd.

Een weergave van zowel de gecorrigeerde als de oorspronkelijke significante golfhoogten langs een satellietbaan op 7 maart 1993 is te zien in FIGUUR 4.16. In deze figuur is tevens de lokatie van het centrum van de depressie duidelijk te herkennen, namelijk tussen 65°NB en 70°NB: de windsnelheden, en dus ook de golfhoogten, nemen toe vanuit het centrum van de depressie.



FIGUUR 4.16

ALTIMETER WAARDEN VAN H_s , ZONDER (LINKS) EN MET (RECHTS) CORRECTIE VOLGENS *QUEFFEULOU*, 1994



5. RESULTATEN



In dit hoofdstuk worden allereerst in paragraaf 5.1 de resultaten van de 'first guess' runs op de verschillende lokaties gegeven. Deze first guess resultaten worden vergeleken met de golfhoogtemetingen. Vervolgens komen de correcties op de stuurvariabelen aan bod, zoals die volgen uit de diverse assimilaties, tezamen met de geassimileerde resultaten van DOLPHIN-B. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen het geval van assimilatie van (combinaties van) lokale en globale meetgegevens (paragraaf 5.2.) en het geval van assimilatie van boeimetingen van Haltenbanken met variatie van de standaard deviaties (paragraaf 5.3.). De scatterindices staan in de figuren bijgeschreven voor de assimilatieperiode 4-8 maart en de 'forecast' periode 9-10 maart. Een overzicht van de scatterindices wordt gegeven in TABEL V.2 en TABEL V.4. Aansluitend volgen in paragraaf 5.4 de resultaten en scatterindices van de deiningshoogte.

5.1 'FIRST GUESS' RESULTATEN

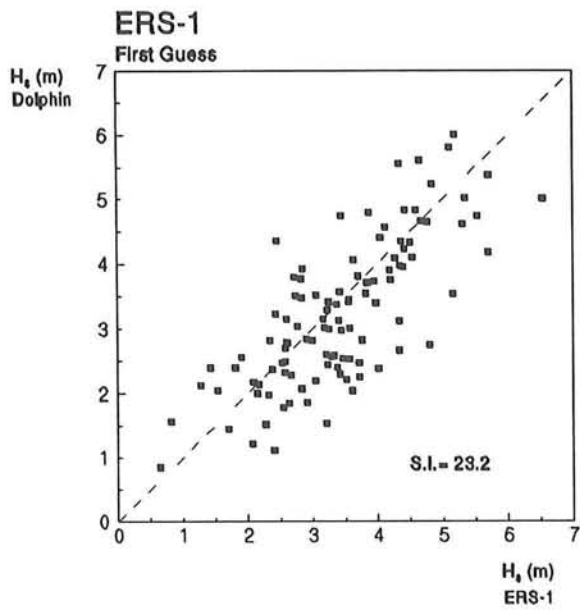
ERS-1 (FIGUUR 5.1): Vanwege de grote hoeveelheid, tamelijk ongecorrelleerde, meetpunten langs de ERS-1 banen zijn de resultaten ter plaatse van de ERS-1 banen in een scatterdiagram weergegeven. In dit diagram is te zien dat op punten waar de ERS-1 golfhoogten < 2 m meet, de DOLPHIN-B waarden van H_s groter zijn dan de gemeten waarden. Daarentegen worden voor de ERS-1 golfhoogten > 2 m door DOLPHIN-B voornamelijk kleinere waarden gevonden dan de gemeten H_s waarden. Deze verschillen tussen de gemeten en berekende golfhoogten kunnen het gevolg zijn van fouten in het windveld of het golfmodel, maar tevens moet men zich bewust zijn van het feit dat de significante golfhoogten van de ERS-1 niet direct zijn gemeten, maar zijn bepaald aan de hand van een algoritme. Het feit dat er correcties op dit algoritme nodig blijken te zijn [bv. *Queffelec*, 1994, *Cotton en Carter*, 1994] geeft aan dat het verschil tussen berekende en gemeten H_s ook aan de satellietmetingen kan liggen.

Scott (FIGUUR 5.2): De first guess benadert redelijk de gemeten waarden, op de lokale maxima en de minima na. Deze worden zowel overschat als onderschat op de diverse plaatsen. Gezien de 'spin-up' periode van 3 dagen is de onderschatting van de golfhoogte op 4 maart waarschijnlijk niet het gevolg van eventuele inspeelverschijnselen van het model, maar veroorzaakt door het wegvallen van de wind op 3 maart. Het is mogelijk dat in het model de golfenergie te snel gedissipeerd wordt bij afname van de wind, maar het is ook mogelijk dat de werkelijke wind minder snel afneemt dan de modelwind. Ditzelfde fenomeen treedt op 7 maart en halverwege 9 maart ook op. In de 'forecast' periode zijn de berekende golfhoogten aanzienlijk kleiner dan de metingen, wat tot uiting komt in de grote scatterindex, 36.8%, tegenover 24.0% in de assimilatieperiode.

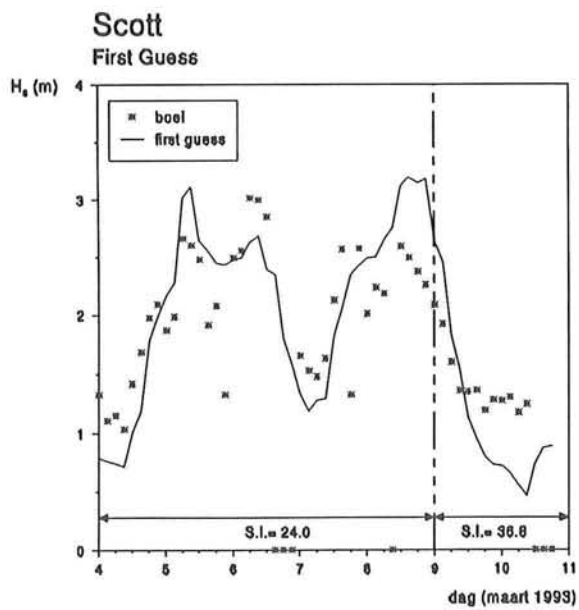


Haltenbanken (FIGUUR 5.3): Op 4 maart wordt de significante golfhoogte sterk onderschat door het model: het verschil tussen model en meting bedraagt ongeveer 2 m. Door het hogedrukgebied boven Haltenbanken staat daar begin maart vrijwel geen wind en zal de in het spectrum aanwezige energie dus voornamelijk deiningenergie zijn. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn, zie FIGUUR 4.7. Deze deining wordt door het golfmodel onderschat, waarschijnlijk omdat deze deining vóór 1 maart elders is opgewekt en uiteindelijk op 4 maart bij Haltenbanken aankomt. Dit is dus een 'spin-up' probleem in het systeem, wat vermeden zou kunnen worden door de spin-up periode anders te kiezen. Het grote verschil tussen de first guess en de metingen op 6 en 7 maart is, net als bij Scott op 7 maart, het gevolg van het afnemen van de wind.

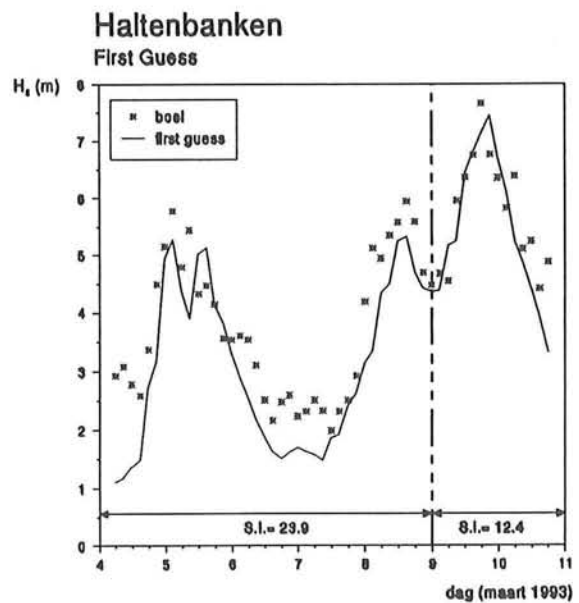
Verder volgt de first guess redelijk de gemeten waarden van de golfhoogte al worden de pieken hier en daar onder- dan wel overschreden. De first guess golfhoogten in de 'forecast' periode van 9-10 maart wijken maar weinig af van de gemeten waarden, wat resulteert in een kleine scatterindex: 12.4% in de 'forecast' periode tegenover 23.9% in de assimilatieperiode.



FIGUUR 5.1



FIGUUR 5.2



FIGUUR 5.3

FIGUUR 5.1 T/M FIGUUR 5.3
FIRST GUESS RESULTATEN



5.2 RESULTATEN ASSIMILATIE VAN LOKALE EN/OF GLOBALE GEGEVENS.

De waarden van de standaard deviaties van de stuurvariabelen is in eerste instantie vrij groot genomen, om te kijken hoe het systeem zich zou gedragen bij assimilatie van lokale (boeien) en/of globale (satelliet) informatie. De first guess waarden en de gecorrigeerde waarden van de stuurvariabelen, zoals die volgen uit de verschillende assimilaties, worden in TABEL V.1 gegeven. Hierbij is de volgorde aangehouden van de assimilaties in TABEL III.1.

		x_{w0} (°WL)	y_{w0} (°NB)	factor $ \vec{w} $	θ_w (°)	Γ ($\cdot 10^{-4}$)
	First guess	90.0	23.0	1.00	0.0	40.0
A1.	ERS1	89.5	23.0	0.89	-4.2	10.8
A2.	Scott	89.6	23.0	0.87	-20.2	9.2
A3.	Halt. ²	89.0	23.1	0.96	-39.6	12.1
A4.	Scott+Halt.	88.9	23.4	0.95	-25.4	11.2
A5.	ERS1+Scott	89.6	23.0	0.88	-13.7	10.1
A6.	ERS1+Halt.	89.0	23.0	0.92	-21.2	10.8
A7.	ERS1+Scott+Halt	89.1	23.1	0.91	-20.6	10.2

TABEL V.1

WAARDEN VAN DE STUURVARIABLEN IN DE FIRST GUESS EN NA DE ASSIMILATIES (A1-A7) VAN LOKALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN

Uit TABEL V.1 volgt dat er grote correcties toegepast worden op zowel de draaiing van de windvectoren als op de dissipatie coëfficiënt. Opvallend is dat bij de assimilaties van alleen satellietgegevens een kleinere draaiing van de windvectoren plaatsvindt dan bij assimilaties met boeigegevens. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het globale karakter van de satellietgegevens. De grote correcties op de dissipatie coëfficiënt in alle assimilaties geven aan dat de first guess waarde van deze coëfficiënt niet geheel betrouwbaar is, of dat een te snelle afname van de modelwind (t.o.v. de werkelijke wind) wordt gecompenseerd door een langzame dissipatie. De waarde van de dissipatie coëfficiënt is in het verleden bepaald aan de hand van slechts 1 experiment, en zal nader bekeken moeten worden.

² Halt. = Haltenbanken



DOLPHIN-B resultaten na assimilaties A1-A7

Significante golfhoogte ter plaatse van de ERS-1 banen (FIGUUR 5.4 en FIGUUR 5.5)

Een vergelijking met FIGUUR 5.1 toont aan dat bij beide assimilaties (assimilatie met alleen ERS-1 metingen en met ERS-1 metingen plus beide boeien) er duidelijk sprake is van een bandbreedte die na assimilatie smaller wordt t.o.v. de first guess, in de buurt van een gemeten significante golfhoogte van 2-5 m (N.B. ook de meeste waarnemingen bevinden zich in de buurt van 2-5 m). Toch neemt de scatterindex slechts gering af (zie TABEL V.2): van 23.2% in de first guess naar 20.3% resp. 20.1%. Assimilatie met alleen de ERS-1 metingen levert een grotere fout op dan de combinatie van de ERS-1- met de boeigegevens. Het verschil is echter gering. Wel is te zien dat bij assimilatie van alleen de ERS-1 metingen de gemeten golfhoogten > 2 m nog steeds voornamelijk onderschat worden door het model. Dit in tegenstelling tot de assimilatie van de combinatie van gegevens, waar de afwijkingen zich nu ongeveer evenveel boven als onder de lijn van gelijke golfhoogte bevinden. De metingen van de boeien 'trekken' als het ware de resultaten omhoog. De lagere golfhoogten (< 2 m) worden nog steeds overschat door het golfmodel.

Significante golfhoogte ter plaatse van Scott (FIGUUR 5.6 t/m FIGUUR 5.10)

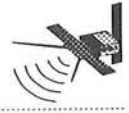
Men ziet dat door alle assimilaties de minima op 4, 7 en 9/10 maart 'omhoog getrokken' worden. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de verkleining van de dissipatie coëfficiënt. De overschatting van de golfhoogte op 5 maart door de first guess verdwijnt bij alle assimilaties, behalve bij assimilaties met boeigegevens van Haltenbanken, waar op dat moment hoge golven zijn: $H_s = 5$ à 6 m. Ditzelfde fenomeen treedt op bij het minimum op 10 maart, waar door assimilatie van de hoge golven bij Haltenbanken een klein lokaal maximum ontstaat. In alle gevallen blijkt de 'forecast' veel beter te worden dan de first guess 'forecast': de scatterindex (zie TABEL V.2) gaat van 36% in de first guess naar ca. 18% in de diverse assimilaties. Uit de scatterindices blijkt tevens dat assimilatie met alleen de boeimetingen van Scott het beste resultaat oplevert, zowel in de assimilatieperiode als in de 'forecast'. Assimilatie met de ERS-1 metingen geeft ook goede resultaten in de 'forecast'. Combinatie van de diverse informatiebronnen, echter, leidt tot minder goede voorspellingen bij Scott.

Significante golfhoogte ter plaatse van Haltenbanken (FIGUUR 5.11 t/m FIGUUR 5.15)

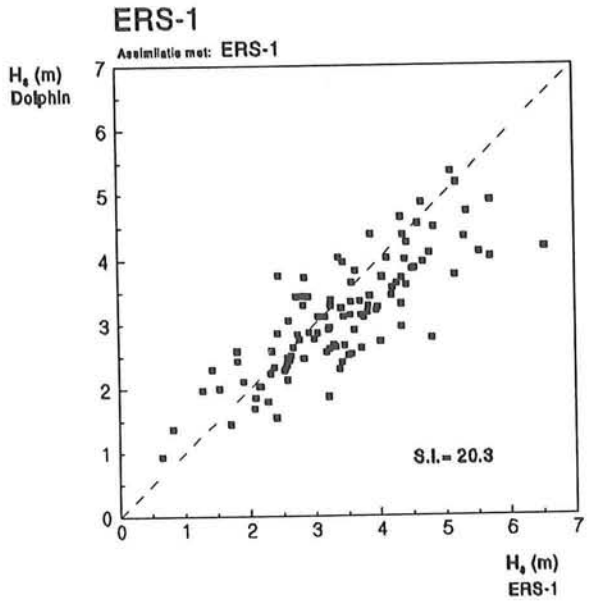
Net als bij Scott worden ook hier alle minima van 4, 7 en 10 maart 'omhoog getrokken'. Alleen bij assimilatie van de ERS-1 gegevens wordt het minimum op 4 maart niet zo goed gecorrigeerd. Dit is waarschijnlijk te wijten aan een kleinere correctie op de richting van de windvectoren. De onderschatting van de pieken op 5 maart (06 uur) en 8 maart (12 uur) wordt door assimilatie van ERS-1 metingen nog groter. Assimilatie van de ERS-1 metingen verkleinen blijkbaar de golfhoogten in Haltenbanken en verstoren in deze periode van hoge golven dus het golfveld.



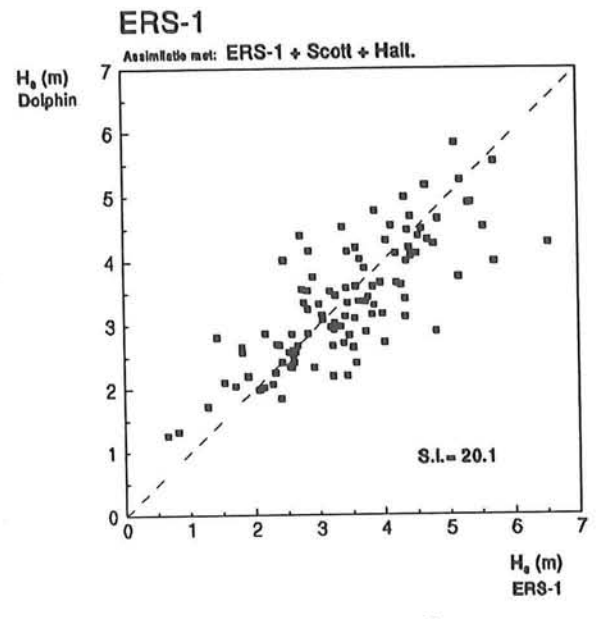
De scatterindices geven eenzelfde beeld: Assimilaties met alleen boeigegevens bij Haltenbanken leveren de kleinste fouten op (gemiddeld 11.6% resp. 9.2% in de assimilatieperiode resp. de 'forecast' tegenover 23.9% resp. 12.4% in de first guess, zie TABEL V.2). Zodra de ERS-1 golfhoogte metingen worden geassimileerd wordt de scatterindex een stuk groter (22.9% resp. 14.2%). Ook combinaties van ERS-1 metingen met boeimetingen leveren grotere fouten op dan assimilaties van alleen boeigegevens.



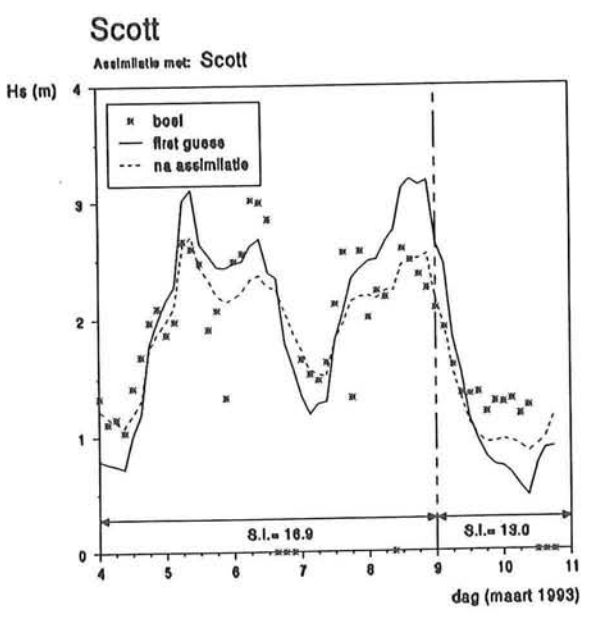
5. RESULTATEN



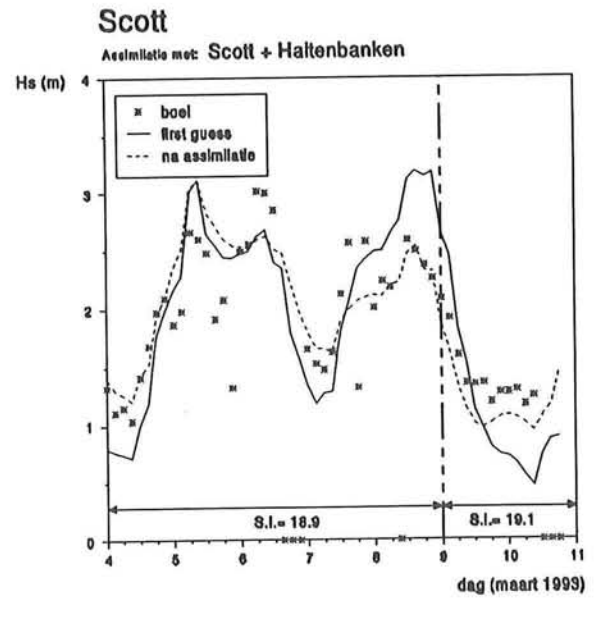
FIGUUR 5.4



FIGUUR 5.5



FIGUUR 5.6



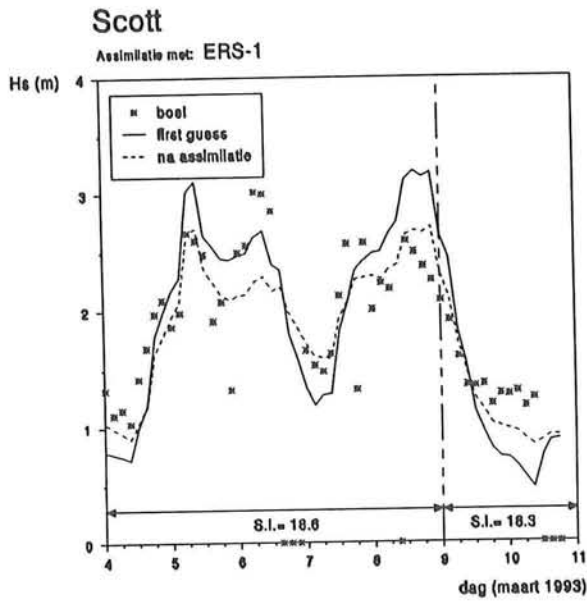
FIGUUR 5.7

FIGUUR 5.4 T/M FIGUUR 5.15

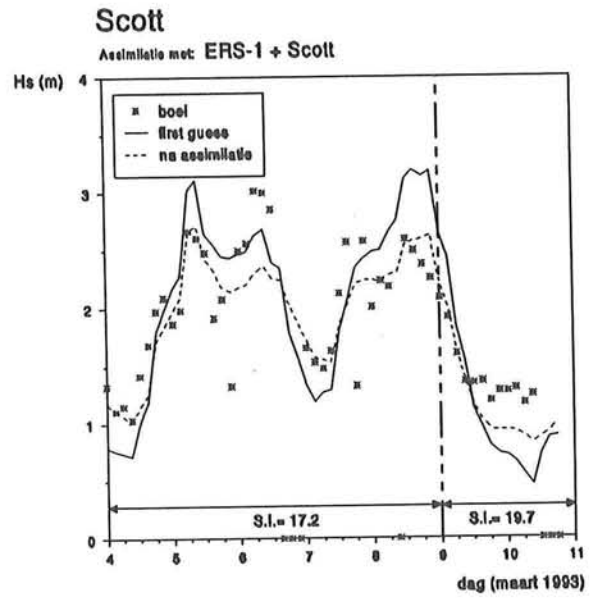
DOLPHIN-B SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN OP DE VERSCHILLENDE UITVOERLOKATIES NA ASSIMILATIES (A1-A7) VAN LOCALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) H_s METINGEN, VERGELEKEN MET BOEIMETINGEN EN FIRST GUESS WAARDEN VAN H_s



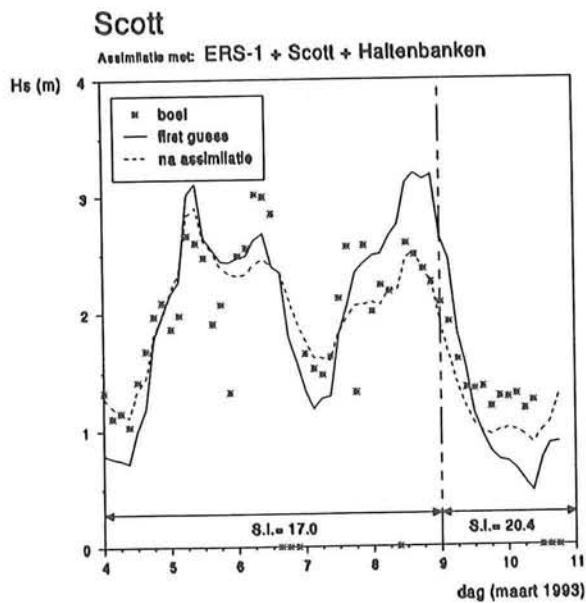
5. RESULTATEN



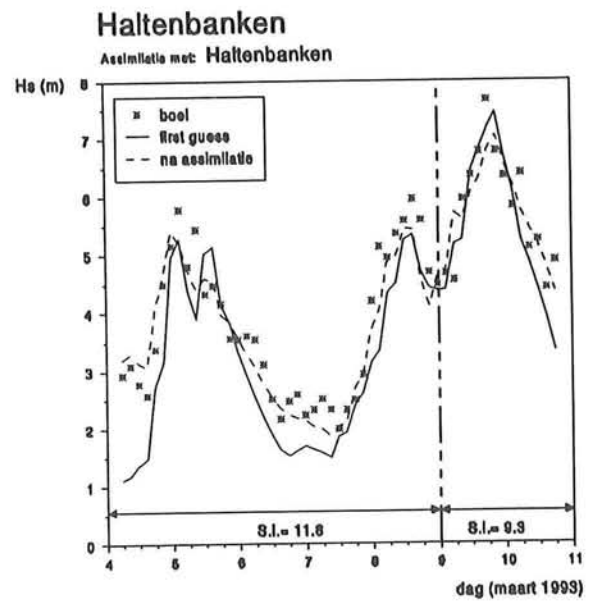
FIGUUR 5.8



FIGUUR 5.9



FIGUUR 5.10



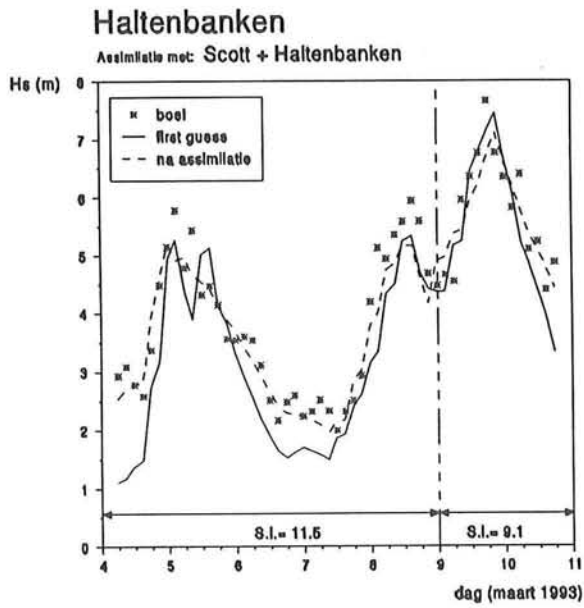
FIGUUR 5.11

FIGUUR 5.4 T/M FIGUUR 5.15

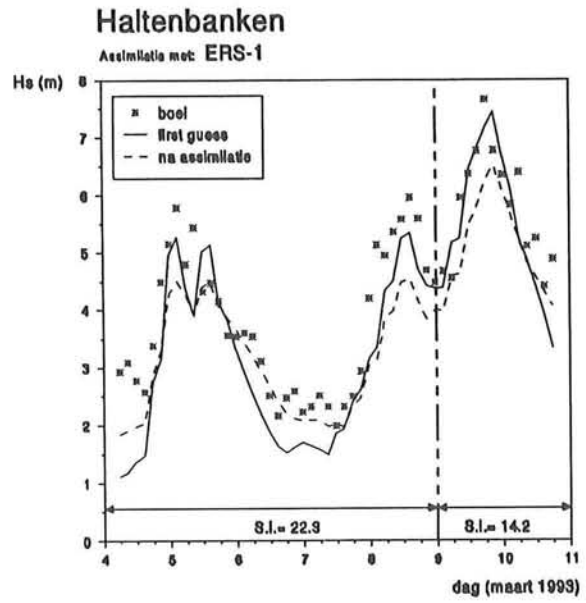
DOLPHIN-B SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN OP DE VERSCHILLENDE UITVOERLOKATIES NA ASSIMILATIES (A1-A7) VAN LOCALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) H_s METINGEN, VERGELEKEN MET BOEIMETINGEN EN FIRST GUESS WAARDEN VAN H_s



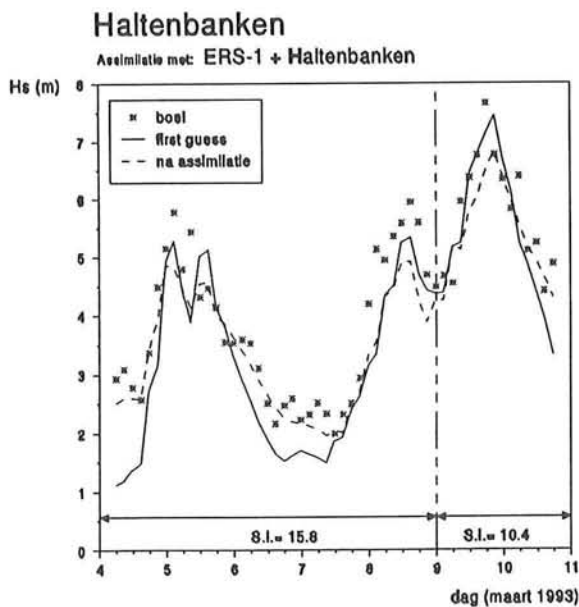
5. RESULTATEN



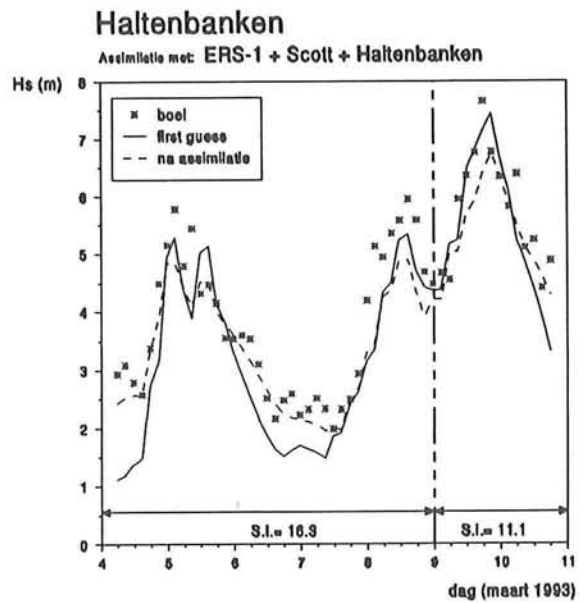
FIGUUR 5.12



FIGUUR 5.13



FIGUUR 5.14



FIGUUR 5.15

FIGUUR 5.4 T/M FIGUUR 5.15

DOLPHIN-B SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN OP DE VERSCHILLENDE UITVOERLOKATIES NA ASSIMILATIES (A1-A7) VAN LOKALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) H_s METINGEN, VERGELEKEN MET BOEIMETINGEN EN FIRST GUESS WAARDEN VAN H_s



In onderstaande TABEL V.2 staan nogmaals de scatterindices van de DOLPHIN-B significante golfhoogten na assimilaties A1-A7:

Voorspellings- lokatie		4-8 maart '93 ass.periode	9-10 maart '93 'forecast'
ERS-1 tracks	First Guess	23.2	
	Assimilatie A1: ERS-1	20.3	
	„ A7: ERS-1 + Scott + Halt	20.1	
Scott	First Guess	24.0	36.8
	Assimilatie A2: Scott	16.9	13.0
	„ A4: Scott + Halt	18.9	19.1
	„ A1: ERS-1	18.6	18.3
	„ A5: ERS-1 + Scott	17.2	19.7
	„ A7: ERS-1 + Scott + Halt	17.0	20.4
	Haltenbanken	First Guess	23.9
Assimilatie A3: Halt.		11.8	9.3
„ A4: Scott + Halt		11.5	9.1
„ A1: ERS-1		22.3	14.2
„ A6: ERS-1 + Halt		15.8	10.4
„ A7: ERS-1 + Scott + Halt		16.3	11.1

TABEL V.2

SCATTERINDICES VAN DE GOLFMODEL SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN IN DE FIRST GUESS EN NA DE ASSIMILATIES (A1-A7) MET LOKALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN OP DE DIVERSE UITVOERLOKATIES. ER IS ONDERSCHIED GEMAAKT TUSSEN DE ASSIMILATIEPERIODE (4-8 MAART) EN DE FORECAST (9-10 MAART)



5.3 RESULTATEN BIJ VARIATIE VAN DE GROOTTE VAN DE STANDAARD DEVIATIES

Om de invloed van de keuze van de grootte van de standaard deviaties te bepalen is met de gegevens van de boei bij Haltenbanken een aantal assimilaties uitgevoerd (B1 t/m B8). TABEL V.3 toont de gekozen waarden voor de standaard deviaties en de resulterende correcties op de stuurvariabelen. Hierbij is dezelfde volgorde aangehouden als in TABEL III.2.

	Standaard deviaties					Stuurvariabelen				
	$\sigma_{x_{w0}}$ (°)	$\sigma_{y_{w0}}$ (°)	$\sigma_{ \vec{w} }$ (%)	$\sigma_{\theta_{\vec{w}}}$ (°)	σ_{Γ} (%)	x_{w0} (°WL)	y_{w0} (°NB)	factor $ \vec{w} $	$\theta_{\vec{w}}$ (°)	Γ ($\cdot 10^{-4}$)
F.G. ³						90.00	23.00	1.00	0.0	40.0
B1 ⁴	10	10	100	100	100	89.00	23.10	0.96	-39.6	12.1
B2	2	2	100	100	100	89.74	22.94	0.96	-41.7	12.4
B3	2	2	100	10	100	89.70	23.05	0.98	-27.7	13.2
B4	1	1	100	10	100	89.85	23.13	0.98	-27.8	13.0
B5	1	1	100	5	100	89.84	23.30	0.99	-12.9	13.9
B6	1	1	50	5	100	89.84	23.30	0.99	-12.9	13.9
B7	1	1	100	5	50	89.84	23.25	1.00	-12.7	15.0
B8	10	10	50	10	100	88.98	23.05	0.96	-39.8	12.1

TABEL V.3

WAARDEN VAN DE STUURVARIABLEN IN DE FIRST GUESS EN NA DE ASSIMILATIES (B1-B8) VAN H_s VAN DE BOEI BIJ HALTENBANKEN MET VARIATIE VAN DE STANDAARD DEVIATIE VAN DE STUURVARIABLEN.

Uit TABEL V.3 volgt:

- door verkleining van $\sigma_{x_{w0}}$ worden in alle gevallen de correcties op x_{w0} kleiner. Dit geldt niet voor $\sigma_{y_{w0}}$ en y_{w0} .
- de verkleining van $\sigma_{\theta_{\vec{w}}}$ heeft in alle gevallen een verkleining van de draaiing van de windvectoren tot gevolg. Toch blijven de waarden voor de draaiing van de windvectoren (ca. 13°) te groot om fysisch realistische windvelden op te leveren.
- de halvering van $\sigma_{|\vec{w}|}$ in B6 t.o.v. B5 blijkt totaal geen verandering van de correctie op de stuurvariabelen tot gevolg te hebben. Ditzelfde is ook op te maken uit de vergelijking tussen B1 en B8.
- in alle gevallen resulteert een grote correctie op de dissipatie coëfficiënt Γ . Ook als de standaard deviatie wordt gehalveerd, blijft de correctie zeer groot: zie assimilatie B7.

³ F.G. = First Guess

⁴ Assimilatie B1 is gelijk aan assimilatie A3



DOLPHIN-B resultaten na assimilaties B1-B8

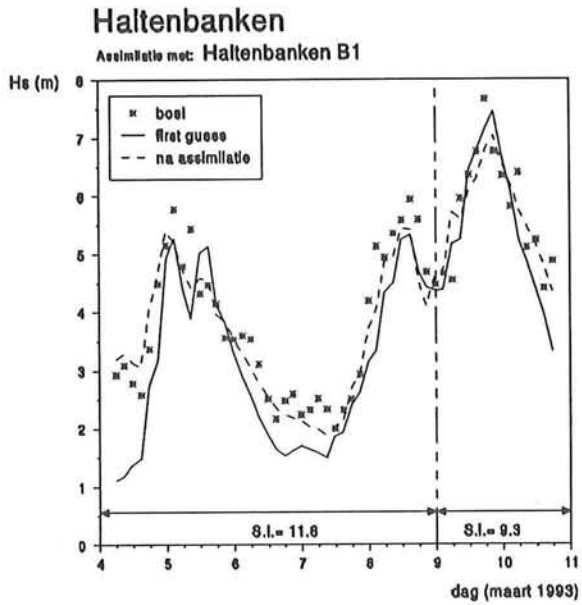
In FIGUUR 5.16 tot en met FIGUUR 5.23 worden de significante golfhoogten bij Haltenbanken na assimilaties B1 t/m B8 weergegeven met daarin bijgeschreven de scatterindices. In TABEL V.4 staan de scatterindices nogmaals overzichtelijk bij elkaar. Uit de figuren blijkt het volgende:

- de invloed van de grootte van de verschillende standaard deviaties op de geassimileerde golfhoogte is niet erg groot. Er zijn maar kleine verschillen tussen de grafieken waar te nemen. Dit uit zich ook in de waarden van de scatterindices, die maar weinig van elkaar verschillen. Zie TABEL V.4.
- zodra de draaiing van de windvectoren klein wordt, $\theta_{\bar{v}} = -13^\circ$ in assimilaties B5, B6 en B7, wordt de golfhoogte in het begin van 4 maart minder gecorrigeerd dan bij de overige assimilaties. Dit was ook al geconstateerd in de vorige paragraaf, waar een kleine draaiing van de windvectoren door assimilatie van de ERS-1 metingen hetzelfde effect opleverde.

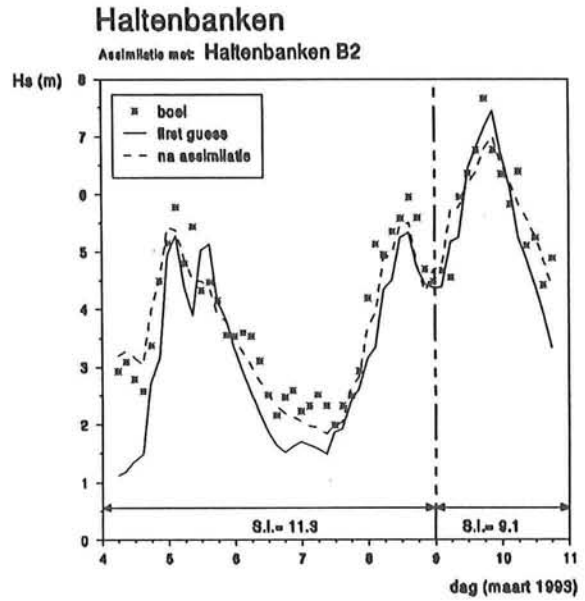
Assimilatie	Scatterindex 4-8 maart '93 ass.periode	Scatterindex 9-10 maart '93 'forecast'
B1	11.8	9.3
B2	11.3	9.1
B3	10.1	9.4
B4	10.0	9.5
B5	11.9	9.5
B6	11.9	9.7
B7	11.8	10.2
B8	12.0	9.3

TABEL V.4

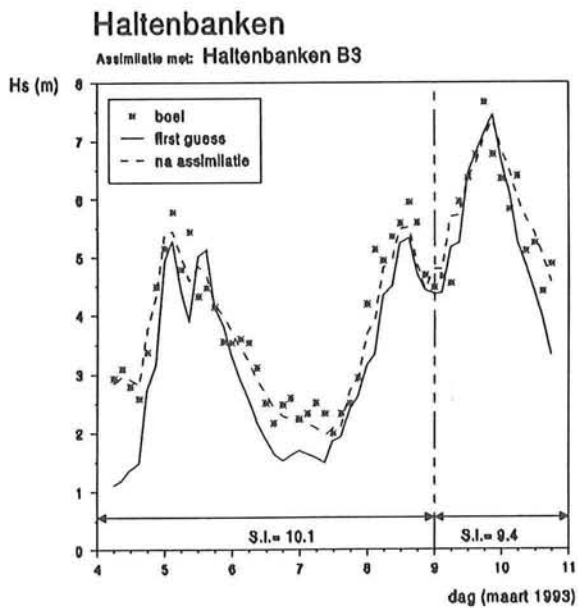
SCATTERINDICES VAN DE SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN BIJ HALTENBANKEN NA DE ASSIMILATIES (B1-B8) MET H_s VAN DE BOEI BIJ HALTENBANKEN MET VARIATIE VAN DE STANDAARD DEVIATIE VAN DE STUURVARIABLEN. ER IS ONDERSCHIED GEMAAKT TUSSEN DE ASSIMILATIEPERIODE (4-8 MAART) EN DE 'FORECAST' (9-10 MAART).



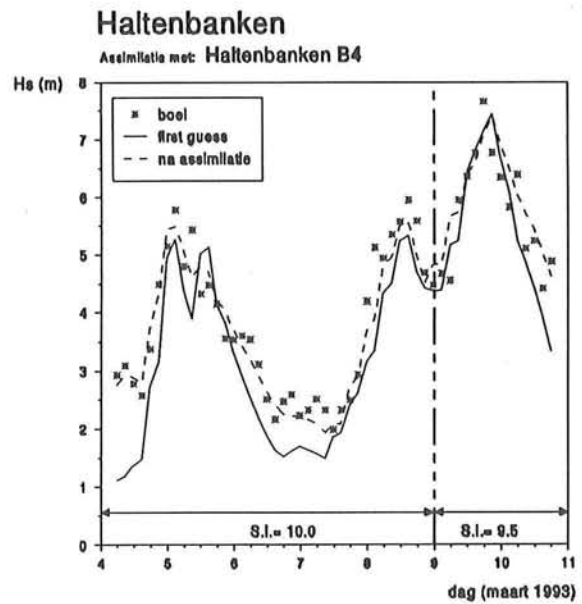
FIGUUR 5.16



FIGUUR 5.17



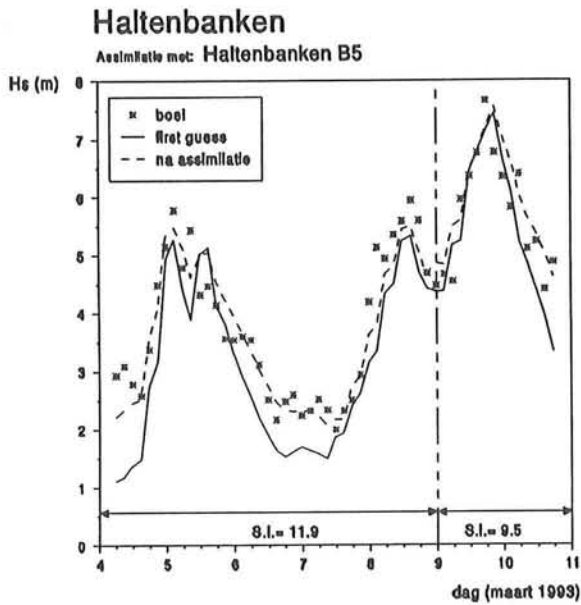
FIGUUR 5.18



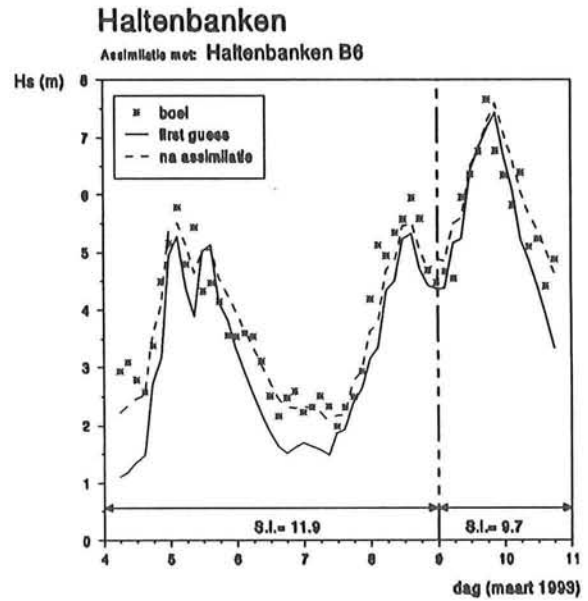
FIGUUR 5.19

FIGUUR 5.16 T/M FIGUUR 5.23

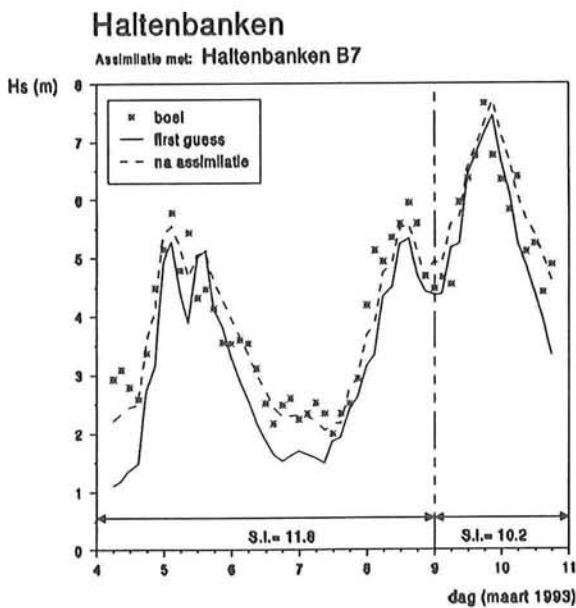
DOLPHIN-B SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN BIJ HALTENBANKEN NA ASSIMILATIES (B1-B8) VAN H_s METINGEN VAN DE BOEI BIJ HALTENBANKEN, BIJ VARIATIE VAN DE STANDAARD DEVIATIE VAN DE STUURVARIABLEN, VERGELEKEN MET BOEIMETINGEN EN FIRST GUESS WAARDEN VAN H_s .



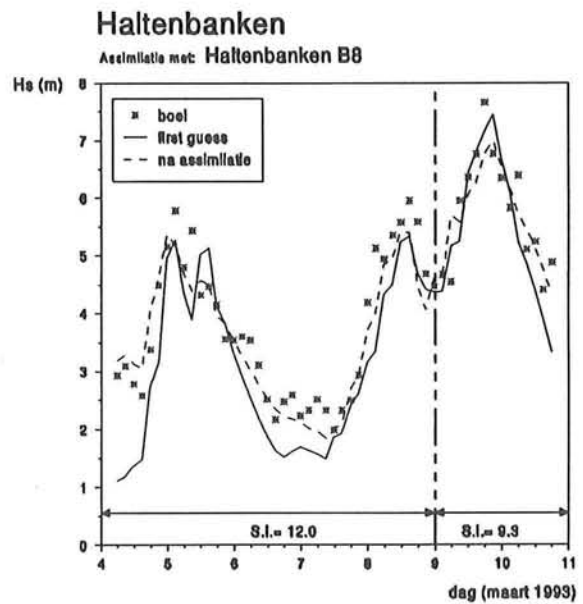
FIGUUR 5.20



FIGUUR 5.21



FIGUUR 5.22



FIGUUR 5.23

FIGUUR 5.16 T/M FIGUUR 5.23

DOLPHIN-B SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN BIJ HALTENBANKEN NA ASSIMILATIES (B1-B8) VAN H_s METINGEN VAN DE BOEI BIJ HALTENBANKEN, BIJ VARIATIE VAN DE STANDAARD DEVIATIE VAN DE STUURVARIABLEN, VERGELEKEN MET BOEIMETINGEN EN FIRST GUESS WAARDEN VAN H_s



5.4 RESULTATEN DEININGSHOOGTE

In FIGUUR 5.24 en FIGUUR 5.25 zijn de deiningshoogten gegeven voor Scott en Haltenbanken, zowel de first guess resultaten als de resultaten na de assimilaties met metingen van de significante golfhoogte H_s (de deiningshoogte H_{d0} zelf is NIET geassimileerd!). De assimilaties zijn uiteraard dezelfde als assimilaties A1 t/m A7 die in hoofdstuk 3 beschreven zijn. In TABEL V.5 staan de scatterindices voor de deiningshoogte.

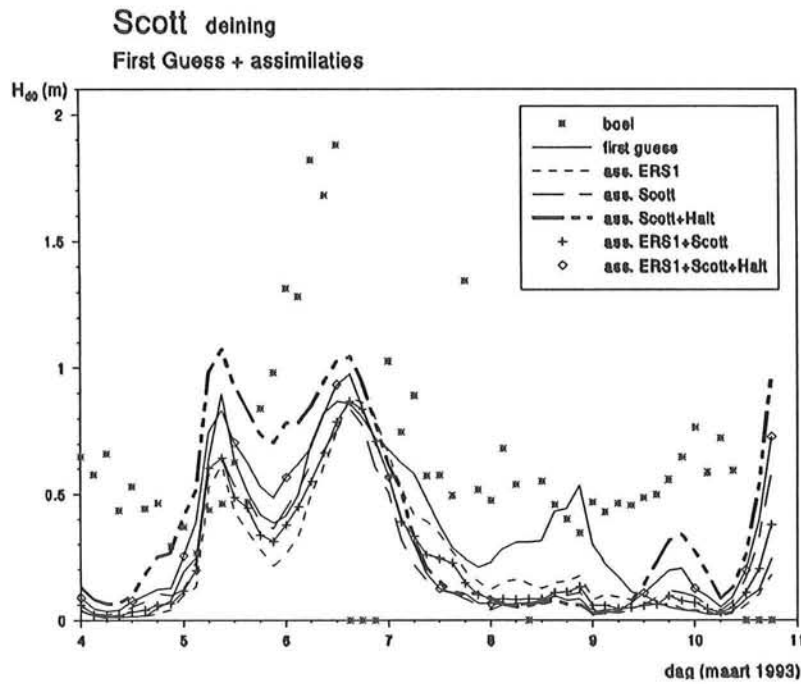
Scott (FIGUUR 5.24):

De berekende deiningshoogte is in alle gevallen en over vrijwel de gehele periode veel kleiner dan de gemeten waarde. Dit blijkt ook uit de scatterindices, variërend van 70% tot 100% (zie TABEL V.5). Toch schijnen deze waarden voor deining niet zo slecht te zijn, men vindt vaak afwijkingen van enkele honderden procenten. In FIGUUR 5.26 is te zien dat het golfmodel de deiningsenergie op 10 maart om 00^{oo} uur in de first guess niet goed berekent. Assimilatie van de H_s metingen van de boeien bij Scott en Haltenbanken verbetert zowel de significante golfhoogte (zie FIGUUR 5.7) als de deiningshoogte (zie FIGUUR 5.24). In FIGUUR 5.26 kan men wel zien dat het gehele spectrum wordt 'opgeblazen' en dat de vorm van het spectrum nauwelijks verandert. Het berekende spectrum na assimilatie lijkt niet veel op het duidelijk dubbelpiekige spectrum van de meting.

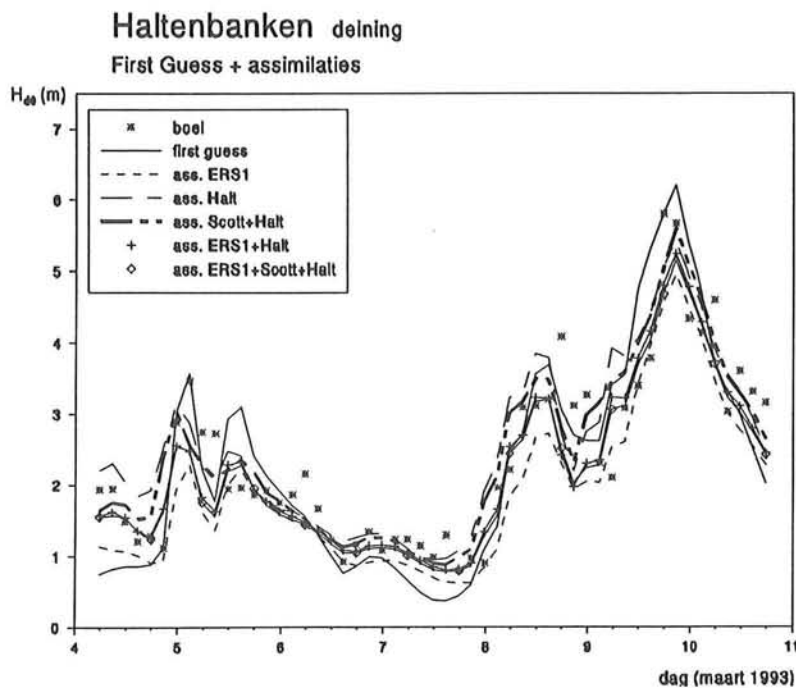
Een periode waarin de berekening van de deiningshoogte in de first guess wel goed gaat is de tweede helft van 8 maart (zie FIGUUR 5.27). Dit is tevens een periode, waarin de gemeten waarde van de significante golfhoogte veel kleiner is dan de first guess waarde. Het totale oppervlak onder het spectrum wordt door de assimilaties met metingen van H_s dan ook verkleind, zodat ook de deiningshoogte veel kleiner wordt na de assimilaties (zie FIGUUR 5.24) en dan niet meer overeenkomt met de gemeten deiningshoogte.

Haltenbanken (FIGUUR 5.25)

De deiningshoogte ter plaatse van Haltenbanken wordt, voor deining, zeer goed berekend door het golfmodel, zowel in de first guess als na de assimilaties. De scatterindices variëren tussen 40% en 15%. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat in deze periode bij Haltenbanken de spectra smal zijn met piekfrequenties rond 0.1 Hz (zie ook FIGUUR 4.7). Aangezien door de assimilaties van H_s de significante golfhoogte, en dus het totale oppervlak onder het spectrum wordt aangepast, is in dit geval het effect op de deiningshoogte erg groot: zie FIGUUR 5.28, waar de spectra van 10 maart om 12^{oo} staan afgebeeld.



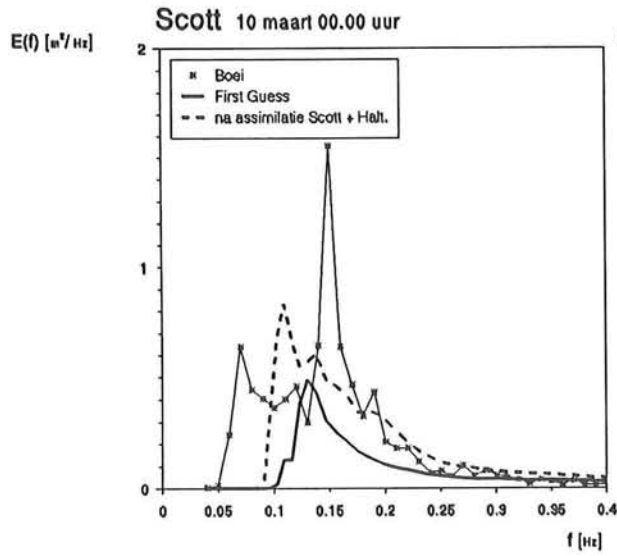
FIGUUR 5.24



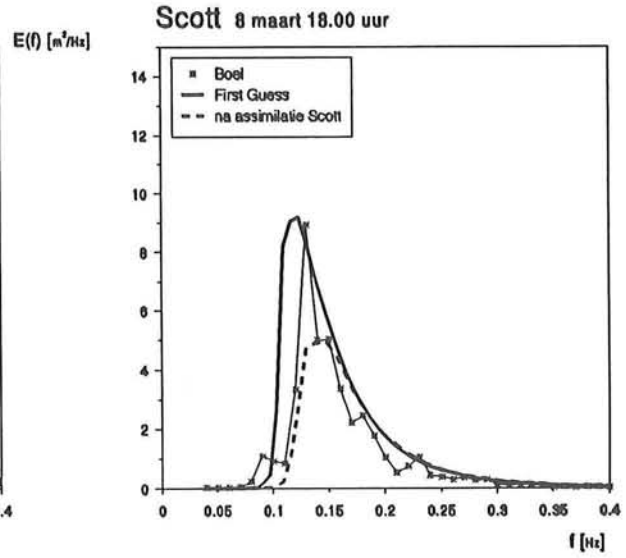
FIGUUR 5.25

FIGUUR 5.24 EN FIGUUR 5.25

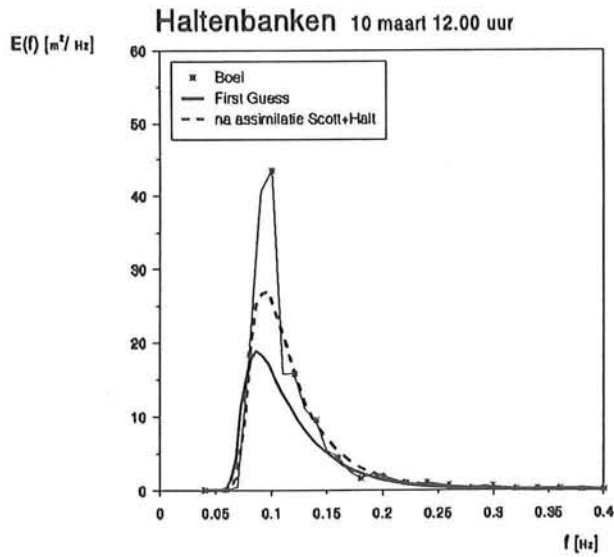
DOLPHIN-B DEININGSHOOGTEN BIJ SCOTT EN HALTENBANKEN NA ASSIMILATIES (A1-A7) VAN LOKALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) H_s METINGEN, VERGELEKEN MET BOEIMETINGEN EN FIRST GUESS WAARDEN VAN H_{DO}



FIGUUR 5.26



FIGUUR 5.27



FIGUUR 5.28

FIGUUR 5.26 T/M FIGUUR 5.28

1-D ENERGIEDICHTHEIDSSPECTRA SCOTT EN HALTENBANKEN NA ASSIMILATIE VAN BOEIMETINGEN VAN H_s , VERGELEKEN MET DE GEMETEN EN FIRST GUESS SPECTRA.

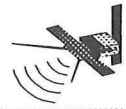


In onderstaande TABEL V.5 zijn nogmaals de scatterindices van de deiningshoogte verzameld:

Voorspellings- lokatie		4-8 maart '93 ass.periode	9-10 maart '93 'forecast'
Scott	First Guess	70.8	92.1
	Assimilatie A2: Scott	81.1	94.1
	„ A4: Scott + Halt	70.6	77.9
	„ A1: ERS-1	81.3	96.3
	„ A5: ERS-1 + Scott	80.4	95.7
	„ A7: ERS-1 + Scott +Halt	75.3	87.7
	Haltenbanken	First Guess	30.8
Assimilatie A3: Halt.		29.5	20.4
„ A4: Scott + Halt		25.0	18.1
„ A1: ERS-1		36.0	18.0
„ A6: ERS-1 + Halt		27.8	16.3
„ A7: ERS-1 + Scott + Halt		28.0	16.3

TABEL V.5

SCATTERINDICES VAN DE DEININGSHOOGTE IN DE FIRST GUESS EN NA DE ASSIMILATIES (A1-A7) MET LOCALE (BOEI) EN/OF GLOBALE (ERS-1) SIGNIFICANTE GOLFHOOGTEN OP DE DIVERSE UITVOERLOKATIES. ER IS ONDERSCHIED GEMAAKT TUSSEN DE ASSIMILATIEPERIODE (4-8 MAART) EN DE 'FORECAST' (9-10 MAART).



6. CONCLUSIES



- De gebruikte methode werkt goed voor verbetering van de voorspelling van de significante golfhoogte: de scatterindex in de 'forecast' periode neemt bij de lokatie Scott af van 36.8% in de first guess naar 13.0% na assimilatie. Bij Haltenbanken neemt deze af van 12.4% naar 9.1%.
- Het golfmodel-assimilatie systeem heeft per assimilatie enkele uren gedraaid op een 'stand alone' computer (486) en is dus geschikt voor operationele doeleinden en vrij goedkoop.
- De aanwezigheid van enkele dagen oude deiningenergie in de spin-up periode van het model zorgt voor een slechte kwaliteit van de first guess golfvoorspellingen bij Haltenbanken op 4 maart. Een andere keuze van de spin-up periode kan een verbetering in de resultaten teweeg brengen.
- Bij het wegvallen van de wind wordt de golfhoogte systematisch kleiner berekend dan de metingen aangeven. Dit kan veroorzaakt worden doordat de energiedissipatie in het golfmodel in deze experimenten niet voldoet: de model dissipatie coëfficiënt wordt bij alle assimilaties vrij ingrijpend gecorrigeerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat òfwel de waarde van de dissipatie coëfficiënt nader bekeken zal moeten worden, òfwel het windveld een grotere afname van de wind geeft dan in werkelijkheid het geval is geweest.
- Assimilatie van alleen boeimetingen levert in bijna alle gevallen in de forecast de beste resultaten voor de significante golfhoogte op. Assimilatie met combinaties van boei- en satellietmetingen leveren daarentegen ook redelijke resultaten: zowel bij Scott als bij Haltenbanken worden in de meeste gevallen na assimilatie betere voorspellingen van H_s verkregen dan in de first guess.
- Bij voorspelling van de significante golfhoogte in 1 punt is assimilatie van lokale metingen van H_s effectiever dan assimilatie van globale gegevens, aangezien bij assimilatie van globale gegevens de golfhoogten over een groot gebied worden aangepast. In dat ene punt resulteert dus een soort van 'gemiddelde correctie'. Daarentegen is voor het voorspellen van deining het gebruik van metingen, die verspreid zijn over een groot gebied, wenselijk om elders opgewekte deining te kunnen lokaliseren. Echter, in dat geval is informatie in de vorm van H_s alleen niet voldoende, maar is tevens informatie over het gehele spectrum van belang.
- Assimilatie van enkel en alleen lokale of globale gegevens resulteert in bijna alle gevallen in een betere golfvoorspelling dan assimilatie van een combinatie van lokale en globale metingen.



- De grootte van de standaard deviatie van de draaiing van de windvectoren heeft grote invloed op de correctie van die stuurvariabele: hoe kleiner de standaard deviatie, des te kleiner is de correctie. Ook de correctie op de plaats van de oorsprong van het windveld in oost-west richting vertoont hetzelfde beeld.
De keuze van de grootte van de standaard deviaties van de overige stuurvariabelen heeft geen duidelijke consequenties voor de correctie ervan.
- Het draaien van alle windvectoren over dezelfde hoek heeft tot gevolg dat er fysisch onrealistische windvelden ontstaan zodra deze hoek groter wordt dan een paar graden. In dit onderzoek, waar correcties tot 40° benodigd blijken te zijn, is het gebruik van deze stuurvariabele op deze manier fysisch gezien dus niet acceptabel. Een mogelijke verbetering is te verwachten indien men het windveld alleen in de omgeving van de depressie aanpast, aangezien in dat geval kleine correcties op de grootte en de richting van de windvectoren reeds van grote invloed zijn op de resulterende golven.
- Er is geen duidelijk verband aan te geven tussen de grootte van de standaard deviaties van de stuurvariabelen enerzijds en de fout tussen de gemeten en de berekende golfhoogten ter plaatse van Haltenbanken anderzijds.
- De methode, toegepast op assimilatie van alleen H_s , werkt minder goed voor voorspelling van de deiningshoogte dan van de significante golfhoogte. Om de deiningshoogte goed te voorspellen is assimilatie van alleen H_s blijkbaar niet genoeg, aangezien het totale oppervlak van het spectrum wordt gecorrigeerd. Indien er hoofdzakelijk deiningsenergie in het first guess spectrum aanwezig is, wordt de voorspelling van de deiningshoogte wèl significant verbeterd bij assimilatie van H_s . Dit is het geval bij Haltenbanken, waar de scatterindex van de deiningshoogte afneemt van 24.7% in de 'forecast' van de first guess naar 16.3% in de 'forecast' na assimilatie van ERS-1- en boeigegevens. In het geval van een door deining gedomineerd first guess energiespectrum resulteert de assimilatie van de ERS-1 metingen in een betere voorspelling van de deiningshoogte dan de assimilatie met boeimetingen. Dit is het gevolg van het globale karakter van de ERS-1 metingen, waardoor informatie over elders op de oceaan opgewekte deining wordt meegenomen.
Aanbevolen wordt om tevens de deiningshoogten zèlf en andere spectrale informatie, zoals golfperioden en de vorm van het spectrum, te assimileren. In de opzet zoals die gebruikt is in dit onderzoek zijn alleen de boeimetingen hiervoor geschikt, aangezien de radaraltimeter slechts in staat is H_s te meten. In de toekomst echter zal door het toepassen van SAR-spectra (SAR = Synthetic Aperture Radar) ook frequentie- en richtingsinformatie van het spectrum in de assimilatie met satellietgegevens meegenomen kunnen worden.



DANKWOORD

Allereerst wil ik mijn grote dank uitspreken voor de plezierige begeleiding, die ik heb gekregen van de leden van mijn afstudeercommissie. Het was een periode van intensief contact met mensen die hun enorme kennis van, en enthousiasme voor golven op mij hebben trachten over te brengen. Jullie enthousiasme is zozeer op me overgeslagen, dat ik na dit afstudeerwerk nog dieper in de golven ga duiken bij het RIKZ. De goede sfeer in de sectie Vloeistofmechanica, en dan met name in de computer-koffie-schaak-kamer, heeft over mijn afstudeerperiode behalve grote hoeveelheden koffie ook nog een grote dosis gezelligheid gegoten. Dankjulliewel!

Hierbij wil ik de volgende personen bedanken voor de hulp die ik gekregen heb bij het verzamelen van de benodigde gegevens:

- De heer Wensink (Waterloorkundig Laboratorium) voor de gegevens van de Waverider boei bij Scott.⁵
- De heer Barstow (OCEANOR) voor de gegevens van de Waverider boei bij Haltenbanken.⁶
- De heer Kruizinga (KNMI) voor de windvelden van het ECMWF.
- De heren Wisse en Scharroo (Fac. der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TU Delft) voor de radar altimeter gegevens van de satelliet ERS-1.

Mijn dank ook aan allen die mij geholpen hebben bij de onvermijdelijke afstudeerperikelen, zoals ruzies met de computer en de bij het afstuderen behorende mentale dipjes. Ik ben erg dankbaar voor alle liefdevolle steun, die ik hierbij gekregen heb van mijn moeder, m'n zussen Marthe en Esther, Martine en Wino, en vele andere dierbare vrienden en vriendinnen.

M'n huisgenoten Wai-Han en Jan-Dik wil ik ook nog extra bedanken voor het beschikbaar stellen van hun computers, waardoor ik in de laatste fase van m'n afstuderen thuis in een rustige omgeving mijn verslag heb kunnen typen.

Allemaal enorm bedankt!

Miriam.

⁵ De Scott data zijn beschikbaar gesteld door HeereMac V.O.F.

⁶ De Haltenbanken data zijn verzameld als onderdeel van het SEAWATCH Europe project en zijn ter beschikking gesteld door OCEANOR A/S in het kader van het MAST II project 'WAVEMOD' Contract n° CT92/0025



LITERATUURLIJST (INCLUSIEF DE REFERENTIES IN DE TEKST VAN DIT RAPPORT)

- Alonso, M., E.J. Finn, Fundamentele natuurkunde deel 3: Golven, 1973, ISBN 90-10-10445-1
- Battjes, J.A., Windgolven, collegehandleiding B78, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft, november 1992
- Booij, N., The ARCADIA system, User Manual version 30.04, Digital Hydraulics Holland bv., Zwijndrecht, juli 1993
- Burt, J.E., Nonlinear models and methods, *Spatial statistics and models*, 173-190, 1984
- Cotton, P.D., D.J.T. Carter, Cross calibration of TOPEX, ERS-1, and Geosat wave heights, *J. of Geophysical Res.*, Vol. 99, No. C12, p.25,025-25,033, Dec. 1994
- Delft Hydraulics report H 1688, ERS-1 pilot project WAVEWATCH, Phase I, Heere-Mac/Shell/MeteoConsult/Delft Hydraulics, mei 1994
- DOLPHIN-B, User manual, Digital Hydraulics Holland bv., Zwijndrecht, april 1993
- Eaves, J.L., E.K. Reedy, Principles of modern radar, 1987, ISBN 0-442-22104-5
- ERS-1 Special Issue, *ESA Bulletin* No.65, februari 1991, ISBN 0376-4265
- Gower, J.F.R., ed., Oceanography from space, 1981, ISBN 0-306-40808-2
- Hasselmann et al., Development of a satellite SAR image spectra and altimeter wave height data assimilation system for ERS-1, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 19, 1988
- Heras Caballero, M.M. de las, On variational data assimilation in ocean wave models, Proefschrift Universiteit Utrecht, mei 1994, ISBN 90-393-0511-0
- Holthuijsen, L.H., Methoden voor golfvoorspelling, Rapport Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1980
- Holthuijsen, L.H., S. de Boer, Wave forecasting for moving and stationary targets, Proc. Computer Modelling in Ocean Engineering, Eds. B.A. Schrefler en O.C. Zienkiewicz, Venice 1988, p.231-234



- Janssen, P.A.E.M, P. Lionello, M. Reistad en A. Hollingsworth, A study of the feasibility of using sea and wind information from the ERS-1 satellite. Part 2: use of scatterometer and altimeter data in wave modelling and assimilation, ECMWF contract report to ESA, No.6297/86/HGE-I(SC), 1987
- Janssen, P.A.E.M., P. Lionello, M. Reistad en A. Hollingsworth, Hindcasts and data assimilation studies with the WAM model during the SEASAT period, *J. of Geophysical Res.* No.94, 1989, p.973-993
- Janssen P.A.E.M., G.J. Komen en W.P.J. de Voogt, An operational coupled hybrid wave prediction model, *J. of Geophysical Res.* No.89, 1984, p.3635-3654
- Komen, G.J., Introduction to wave models and assimilation of satellite data in wave models, Proceedings of the Alpbach Conference, 1985, *ESA special publication*, ESA SP-244, p. 21-25
- Komen, G. et al., Dynamics and modelling of ocean waves, Cambridge 1994, ISBN 0-521-43291
- Lionello P., H. Günther en P.A.E.M. Janssen, Assimilation of altimeter in a global third generation wave model, *ECMWF Technical Report No. 67*, 1992
- Lionello, P., H. Günther en B. Hansen, A sequential assimilation scheme applied to global wave analysis and prediction, *J. of Marine Systems* No.6, 1995, p.87-107
- Maul, G.A., Introduction to satellite oceanography, Martinus Nijhoff Publ. Dordrecht 1985, ISBN 90-247-3096-1
- Proud, L., B. Battrick, ERS-1 User handbook, *ESA Special Publication SP-1148*, Noordwijk, Nederland, 1992, ISBN 92-9092-029-7
- Robinson, I.S., Satellite oceanography, Engeland 1985, ISBN 0-85312-598-8
- Stewart, R.H., Methods of satellite oceanography, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego and Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, University of California Press, 1985, ISBN 0-520-04226-3
- Valk, C.F. de, G.J. Wensink, R.W. van Swol, J.C. Venema, Extraction of marketable information from ERS-1 data, Rapport Beleids Commissie Remote Sensing, BCRS 90-03, Nederland, 1990.



Vass, P., B. Battrick, ERS-1 system, *ESA Special Publication SP-1146*, Noordwijk, Nederland, 1992, ISBN 92-9092-021-1

Vooren, M.A. van der, Application of hierarchical control theory to wave-data assimilation, Proefschrift Technische Universiteit Twente, 1994, ISBN 90-9006788-4

WAMDIG, The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, *J. of Physical Oceanography* No.18, 1988, p.1775-1810



BIJLAGE I

BESCHRIJVING STORMEN 1-10 MAART 1993 (zie FIGUUR I.1 t/m FIGUUR I.7)

1 maart: Een depressie boven het Europese vasteland zorgt voor (zuid)oostelijke wind van 11 m/s bij Scott. De wind waait over de gehele breedte van de Noordzee, waardoor er veel golfenergie uit de richting van Denemarken Scott bereikt. Boven de kust van Noorwegen ligt een hogedrukgebied, waardoor er ter plaatse van Haltenbanken vrijwel geen wind staat.

2 maart: Het trage koudefront boven Europa laat de depressie ongeveer op dezelfde plaats liggen als op 1 maart. Het hogedrukgebied trekt langzaam richting de Baltische Staten en een nieuw koudefront nadert vanaf Groenland de Noorse Zee.

3 maart: Rond Spitsbergen ligt een diepe depressie, met stevige westenwinden (20-25 m/s) in het noorden van Noorwegen, maar deze depressie trekt snel weg over de Barentszee. Boven de Atlantische Oceaan ligt een uitgebreid hogedrukgebied, met een uitloper boven het noordelijke deel van de Noordzee, waardoor de wind bij Scott naar het noordoosten draait. De wind is echter zwak. Bij Haltenbanken waait een matige westelijke wind.

4 maart: Een warmtefront trekt vanuit de Atlantische Oceaan tussen IJsland en Schotland over de Noorse Zee en Noordzee, met aan de noordelijke staart bij de Fäeröer een koudefront, gevolgd door een lagedrukgebied. Dit lagedrukgebied (ca. 1005 mBar) zorgt bij Scott en Haltenbanken voor west- zuidwestelijke wind, met een snelheid rond 10 m/s.

5 maart: De depressie wordt dieper, ca. 990 mBar, en trekt weg over Scandinavië. Hierdoor draait de wind bij Haltenbanken naar het noorden en wordt krachtiger, ca. 15 m/s. Er worden hoge golven opgewekt. Het warmtefront heeft zich uitgebreid over de Noordzee en het hogedrukgebied (1030 mBar) nadert vanuit de Atlantische Oceaan. Hierdoor wordt bij Scott een noordwestelijke wind veroorzaakt, ca. 10 m/s. Doordat de wind precies tussen Schotland en de Shetlands door waait, kunnen er hoge golven ontstaan.

6 maart: Het weer in de Noordzee en Noorse zee wordt bepaald door het hogedrukgebied boven Ierland en Engeland. Bij Scott heeft de wind een noordwestelijke richting en een snelheid van ca. 10 m/s. In de loop van de dag verplaatst het centrum van het hogedrukgebied zich meer richting Scott, waardoor de wind sterk afneemt van 11 m/s naar 4 m/s. De grens tussen het hogedrukgebied boven Scott en een uitloper van een hogedrukgebied boven Spitsbergen ligt boven Haltenbanken en de wind is daar dan ook afgenomen tot 3-5 m/s en draait van noordwest naar noord-oost.



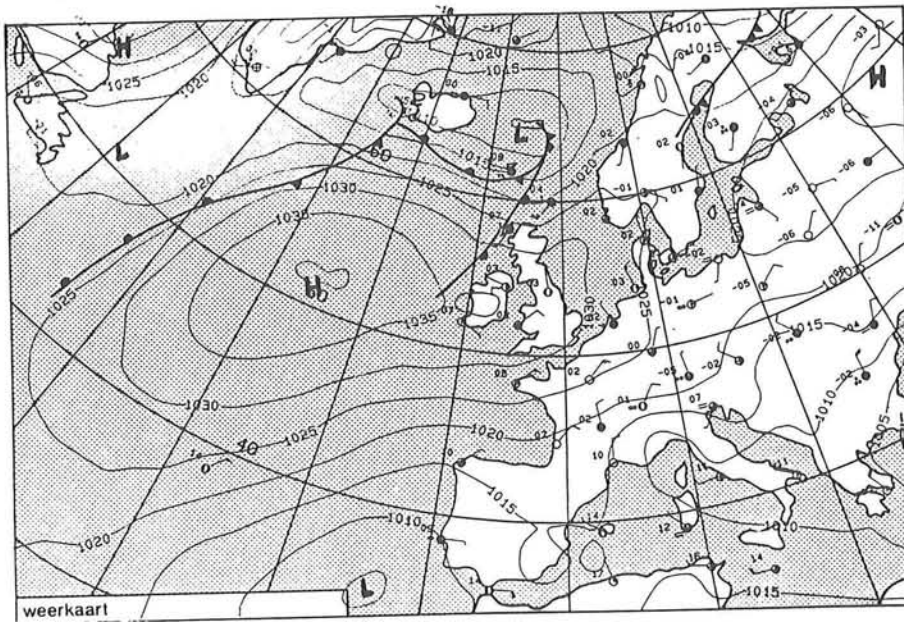
7 maart: Het hogedrukgebied boven Engeland heeft zich uitgebreid over heel Noordwest Europa, maar wordt vanuit het westen genaderd door een koudefront. In het noorden achter dit front, boven de Groenlandse Zee, bevindt zich een zeer diepe depressie, ca. 980 mBar,

met erg dicht bij elkaar gelegen isobaren, wat in de loop van de dag hoge windsnelheden veroorzaakt evenwijdig aan deze isobaren: bij het relatief ver van de depressie weg gelegen Scott komen nog snelheden voor van 12 m/s, bij het dichterbij de depressie gelegen Haltenbanken zelfs 15-17 m/s. Op beide lokaties komt de wind uit het zuid-zuidwesten. Voor Haltenbanken is dit afluiddige wind, dus ondanks de hoge windsnelheden zullen er geen hoge golven ontstaan.

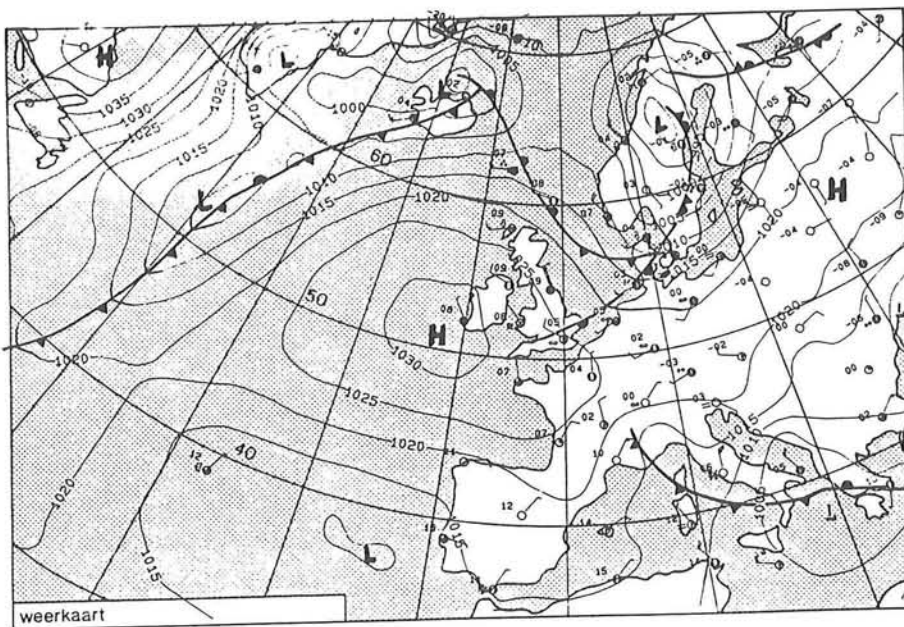
8 maart: Het samenspel tussen het hoge- en lagedrukgebied, boven de Oostzee resp. de Groenlandzee, veroorzaakt nog steeds hoge windsnelheden uit het zuid-zuidwesten bij Scott en uit het zuidwesten bij Haltenbanken. Doordat de wind bij Haltenbanken iets naar het westen is gedraaid zijn er ook hogere golven te verwachten dan op 7 maart. Echter nu heeft een nieuw koudefront de Noorse Zee bereikt, die het hogedrukgebied verder naar het oosten zal verdringen.

9 maart: Het lagedrukgebied boven de Groenlandzee heeft zich verdiept tot 975 mBar en is naar het oosten verplaatst, waardoor de wind (15-20 m/s) bij Haltenbanken is gedraaid naar het west-noordwesten. Bij Scott is de wind ineens sterk afgenomen, 2-5 m/s, zuidwest. Er ontwikkelt zich een hogedrukgebied tussen Schotland en IJsland en een lagedrukgebied ten zuidwesten van Ierland.

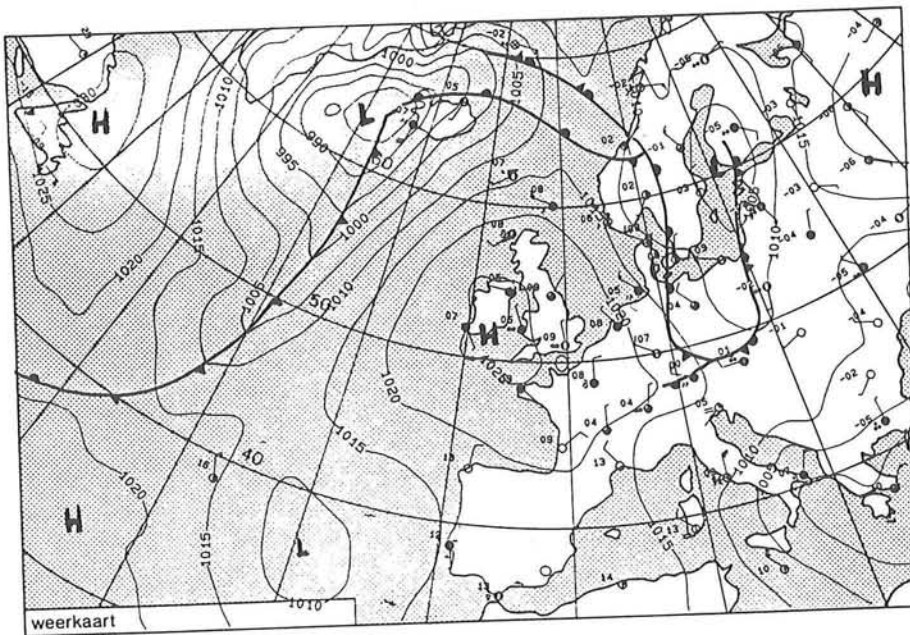
10 maart: Het hogedrukgebied (1030 mBar) tussen Schotland en IJsland heeft zich boven de Noorse Zee en Noordzee geplaatst. De diepe depressie verplaatst zich richting Finland maar zorgt samen met het hogedrukgebied in het begin van de dag nog voor een stevige wind bij Haltenbanken, 13-15 m/s uit het noordwesten. Later op de dag neemt de wind af tot ca. 10 m/s. Scott ligt ten zuiden van het hogedrukgebied waardoor er ter plaatse een wind waait uit het oosten; deze wind is zwak, slechts 3-6 m/s.



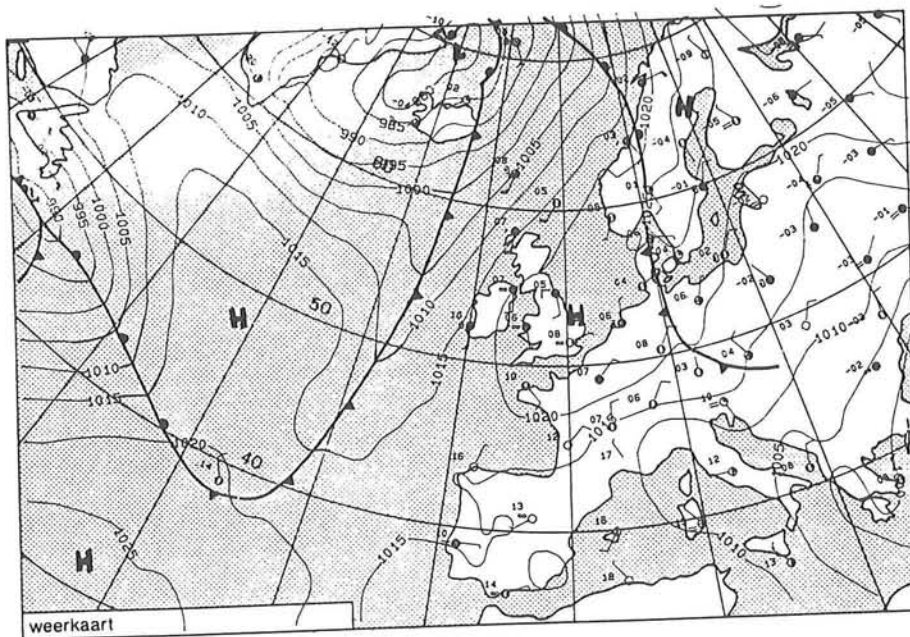
FIGUUR I.1
WEERKAART 4 MAART 1993 [BRON: KNMI]



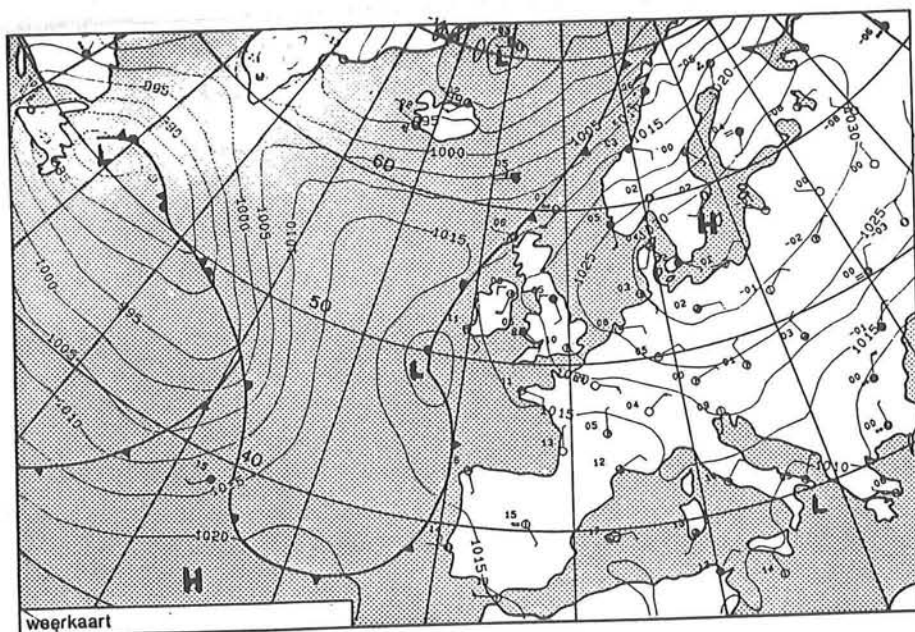
FIGUUR I.2
WEERKAART 5 MAART 1993 [BRON: KNMI]



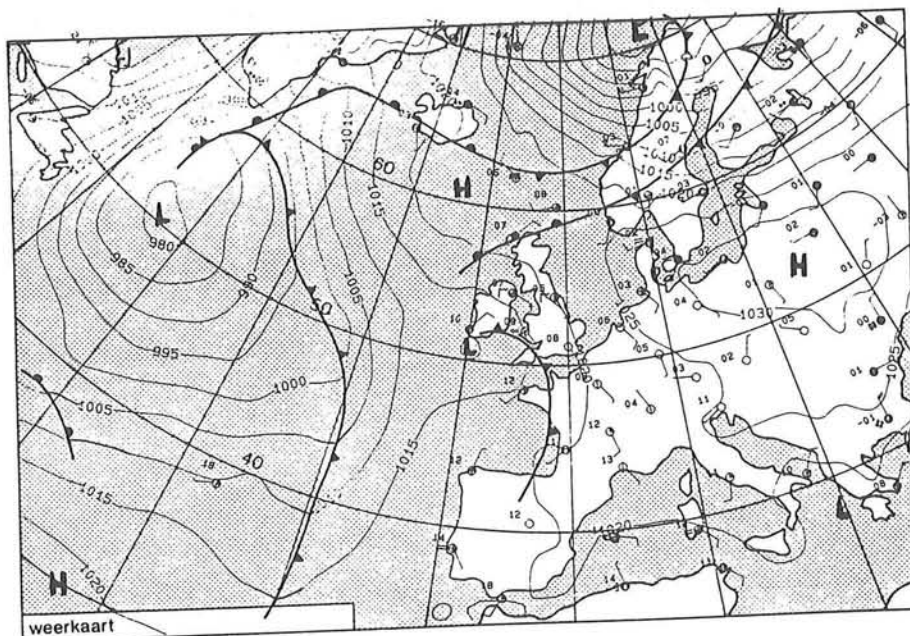
FIGUUR I.3
WEERKAART 6 MAART 1993 [BRON: KNMI]



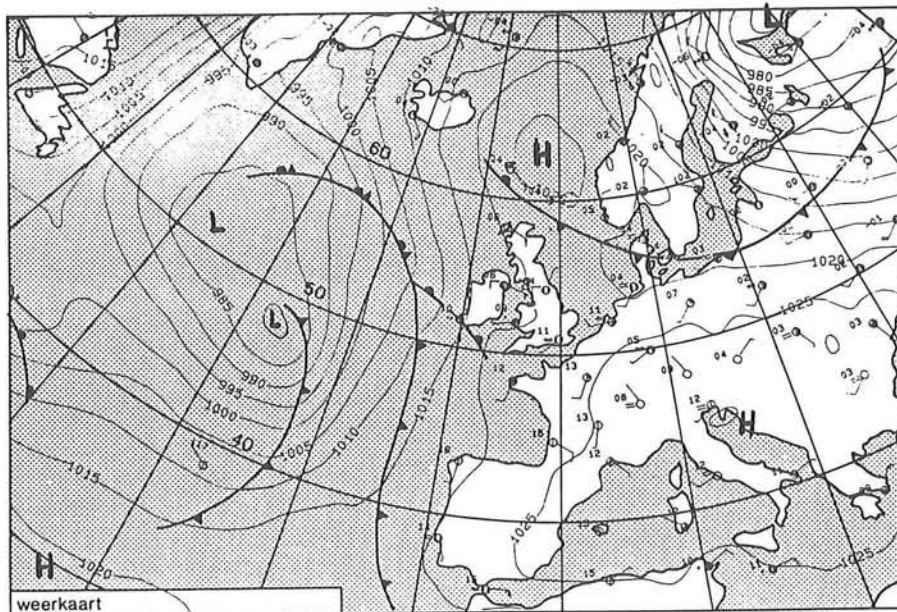
FIGUUR I.4
WEERKAART 7 MAART 1993 [BRON: KNMI]



FIGUUR I.5
WEERKAART 8 MAART 1993 [BRON: KNMI]



FIGUUR I.6
WEERKAART 9 MAART 1993 [BRON: KNMI]



FIGUUR I.7
WEERKAART 10 MAART 1993 [BRON: KNMI]



Lijst 1: Figuren

figuur 2.1 Energieverdeling binnen het groeiende spectrum

figuur 2.2 m_0 en d_0

figuur 2.3 Data assimilatie schema

figuur 3.1 Lineaire benadering van de verandering van het modelresultaat H_i bij verandering van de stuurvariabele p_i in het punt H_i^{fg}

figuur 3.2 Assimilatie tijdschema: 3 dagen 'spin-up', 5 dagen assimilatie, 2 dagen 'forecast'.

figuur 3.3 'Sprinkler' patroon van stralen vanuit het voorspellingspunt

figuur 3.4 Groei van het spectrum in een constant windveld voor de golfcomponent (f_1, θ_1)

figuur 4.1 Kaart van het beschouwde gebied ($90^\circ\text{WL}-20^\circ\text{OL}$, $23^\circ\text{NB}-75^\circ\text{NB}$)

figuur 4.2 Weerkaart 4 maart 1993, 12.00 UTC

figuur 4.3 Windveld 4 maart 1993, 12.00 UTC

figuur 4.4 Weerkaart 8 maart 1993, 12.00 UTC

figuur 4.5 Windveld 8 maart 1993, 12.00 UTC

figuur 4.6 $E(f)$ boei Scott

figuur 4.7 $E(f)$ boei Haltenbanken

figuur 4.8 H_s boei Scott

figuur 4.9 H_s boei Haltenbanken

figuur 4.10 Het electromagnetisch spectrum

figuur 4.11 ERS-1 met gerichte spherische EM-straling

figuur 4.12 Invallende straling op een glad oppervlak

figuur 4.13 Pulsmiddeling

figuur 4.14 Pulshelling: bij hogere golven vertoont de (gemiddelde) puls een flauwere voorste helling

figuur 4.15 Banen van de ERS-1 boven de Noordzee en Noorse Zee, 1-10 maart 1993

figuur 4.16 Altimeter waarden van H_s , zonder (links) en met (rechts) correctie

figuur 5.1 t/m figuur 5.3 First Guess resultaten

figuur 5.4 t/m figuur 5.15 DOLPHIN-B significante golfhoogten op de verschillende uitvoerlokaties na assimilaties (A1-A7)

figuur 5.16 t/m figuur 5.23 DOLPHIN-B significante golfhoogten bij Haltenbanken na assimilaties (B1-B8)

figuur 5.24 en figuur 5.25 DOLPHIN-B deiningshoogten bij Scott en Haltenbanken na assimilaties (A1-A7)

figuur 5.26 t/m figuur 5.28 1-D energiedichtheidsspectra Scott en Haltenbanken



- figuur I.1 Weerkaart 4 maart 1993
- figuur I.2 Weerkaart 5 maart 1993
- figuur I.3 Weerkaart 6 maart 1993
- figuur I.4 Weerkaart 7 maart 1993
- figuur I.5 Weerkaart 8 maart 1993
- figuur I.6 Weerkaart 9 maart 1993
- figuur I.7 Weerkaart 10 maart 1993

Lijst 2: Tabellen

- tabel III.1 Assimilaties van lokale (boei) en/of globale (ERS-1) significante golfhoogten
- tabel III.2 Assimilaties van H_s van de boei bij Haltenbanken met variatie van de standaard deviaties van de stuurvariabelen
- tabel V.1 Waarden van de stuurvariabelen in de first guess en na de assimilaties (A1-A7) van lokale (boei) en/of globale (ERS-1) significante golfhoogten
- tabel V.2 Scatterindices van de golfmodel significante golfhoogten in de first guess en na de assimilaties (A1-A7) met lokale (boei) en/of globale (ERS-1) significante golfhoogten op de diverse uitvoerlokaties. Er is onderscheid gemaakt tussen de assimilatieperiode (4-8 maart) en de forecast (9-10 maart)
- tabel V.3 Waarden van de stuurvariabelen in de first guess en na de assimilaties (B1-B8) van H_s van de boei bij Haltenbanken met variatie van de standaard deviatie van de stuurvariabelen.
- tabel V.4 Scatterindices van de significante golfhoogten bij Haltenbanken na de assimilaties (B1-B8) met H_s van de boei bij Haltenbanken met variatie van de standaard deviatie van de stuurvariabelen. Er is onderscheid gemaakt tussen de assimilatieperiode (4-8 maart) en de 'forecast' (9-10 maart).



Lijst 3: Gebruikte symbolen

α	energieschaal parameter
Γ	dissipatie coëfficiënt
θ	golfrichting
θ_w	windrichting
λ	hulpgrootheid in adjoint techniek
σ	standaard deviatie
τ	puls lengte radargolf
\vec{c}_g	groepssnelheid
D	dissipatie tijdschaal
d_0	0 ^e -orde moment van $E(f)$ met $0 \leq f \leq 0.1$ Hz
$E(f)$	1-D energiedichtheidsspectrum
$E(f, \theta)$	2-D energiedichtheidsspectrum
E_{tot}	totale energiedichtheid
E_{lim}	limietwaarde energiedichtheid
f	golffrequentie
f_m	frequentieschaal parameter
g	zwaartekrachtsversnelling
H	modelresultaat
H_{d_0}	deiningshoogte ($\approx 4\sqrt{d_0}$)
H_s	significante golfhoogte ($\approx 4\sqrt{m_0}$)
k	aantal stuurvariabelen
J	kostfunctie
m_0	0 ^e -orde moment van $E(f)$
N	totaal aantal meetwaarden
O	meetresultaat
p	stuurvariabele
S	bronterm
t	tijd
\vec{w}	windvector
\vec{w}_{10}	windvector op 10 m hoogte
$ \vec{w} $	windsnelheid
(x, y)	sferisch coördinatenstelsel
x_{w0}	x-coördinaat van de oorsprong v/h windveld
y_{w0}	y-coördinaat van de oorsprong v/h windveld