

implementatie van en eerste  
resultaten met het  
NEDWAM model,  
een derde generatie  
golfverwachtingsmodel  
voor de Noordzee

B. Karssen

technische rapporten TR – 102

Implementatie van en eerste resultaten met  
het NEDWAM model,  
een derde generatie golfverwachtingsmodel voor de Noordzee.

B. Karssen  
september 1987

VOORWOORD

Dit manuscript is het resultaat van een stage van zes maanden op het KNMI in De Bilt, ter afronding van mijn studie Toegepaste Wiskunde aan de Vrije Universiteit te Amsterdam, met als afstudeerdocent Prof.Dr. G.Y. Nieuwland.

Zeer veel dank aan Gerbrand Komen (mijn stagebegeleider op het KNMI) die, ondanks een overvolle agenda, altijd tijd had om mij te helpen.

Ook wil ik Marc Allaart bedanken voor computer-technische adviezen en verder een ieder die mij met raad en daad heeft bijgestaan.

Bert Karssen  
De Bilt, september 1987.

## Inhoudsopgave

1. Inleiding.

2. De propagatie term.

3. De integratie van de brontermen.

4. Het Noordzeemodel.

5. Conclusie.

6. Referenties.

Appendix 1: Optimalisatie

## 1. Inleiding

Golfverwachtingen voor de Noordzee worden op verschillende terreinen gebruikt, o.a. voor de "off-shore" (booreilanden), de supertankervaart in de Eurogeul, de visserij en voor het beheer (en eerder de bouw) van de Oosterscheldedam. Werd tot  $\pm 30$  jaar geleden de verwachting gebaseerd op empirische regels, vanaf die tijd geven numerieke golfverwachtingsmodellen verwachtingen aan de hand van de energie-transportvergelijking voor het twee-dimensionale golfspectrum  $F(\theta, f)$ , met  $\theta$  de richting en  $f$  de frequentie, dat ook nog een functie van  $\bar{x}$  (de plaats) en  $t$  (de tijd) is. Deze transportvergelijking ziet er als volgt uit:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{v} \cdot c_g \cdot F = S \quad (1.1)$$

waarbij

- $F$  = 2-dimensionale spectrum
- $c_g$  = groepssnelheid van de golven
- $S$  = bronfunctie

$S$  is te ontbinden in:

- $S^{in}$  = invoer van de wind (hangt af van "extern" veld)
- $S^{ds}$  = dissipatie (breking, schuimkoppen, etc.)
- $S^{nl}$  = niet-lineaire wisselwerking tussen de golven
- $S^{bf}$  = bodem-frictie (speelt vooral bij ondiep water).

In hoofdstuk 3 zullen deze brontermen nader gespecificeerd worden.

In een eerste generatie modellen werd  $S^{nl}$  volledig verwaarloosd. Voor de tweede generatie modellen ging men uit van een sterk vereenvoudigde parametrizatie van de niet lineaire term. Deze vereenvoudiging bleek echter niet algemeen geldig [SWAMP, 1985] en dit impliceerde onder meer, dat deze modellen sneldraaiende winden moeilijk aan konden. Momenteel is men bezig met het ontwikkelen van derde-generatie modellen, die de transportvergelijking door integratie oplossen zonder beperking van de spectraalvorm. Het eerste derde-

generatie golfmodel, het WAM model, is in internationaal verband ontwikkeld. [The WAM Development and Implementation group, 1987]. Het NEDWAM model, dat hier beschreven wordt, is ontstaan door de rekenmethode van het WAM-model (de eerste implementatie) te combineren met het rooster en de rand-condities van GONO [Janssen, Komen, de Voogt, 1984; de Gier, Oude Groen, 1984], een tweede-generatie model dat op het ogenblik bij het KNMI operationeel in gebruik is.

In hoofdstuk 2 wordt gekeken hoe het model zich gedraagt in een eenvoudig geval, zonder energie-winst/verlies door de bronfunctie ( $S = 0$ ), zodat de voortplanting van golfenergie (energieadvectie of propagatie) in het model bestudeerd kan worden. Deze situatie lijkt op wat we in de praktijk vinden in het geval van deining (geen lokale wind en de golven elders gegenereerd). Om de invloed van de bronfunctie te bekijken wordt in hoofdstuk 3 een andere test belicht, waarbij geometrie en windveld eenvoudig worden gehouden. Tot slot wordt in hoofdstuk 4 een "echte" storm in het Noordzeegebied besproken, en worden de resultaten van NEDWAM vergeleken met golfmetingen.

## 2. De propagatieterm

In deze paragraaf wordt een numerieke benadering voor advectie geïntroduceerd (het propagatieschema), inclusief de behandeling van de rand. Vervolgens wordt energiebehoud, stabiliteit en dispersie (energiespreiding) van dit schema besproken. Tenslotte wordt het getest aan de hand van een eenvoudig testgeval.

### Het schema

Als in de transportvergelijking (1.1) de bronfunctie wordt weggelaten (dus  $S = 0$ ), dan gaat deze over in:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{v} \cdot c_g F = 0 \quad (2.1)$$

of in twee dimensies:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + c_g |\sin\theta| \frac{\partial F}{\partial x} + c_g |\cos\theta| \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

waarbij  $\theta$  de hoek is tussen de propagatierichting en een  $y$ -as die loodrecht op een  $x$ -as staat.

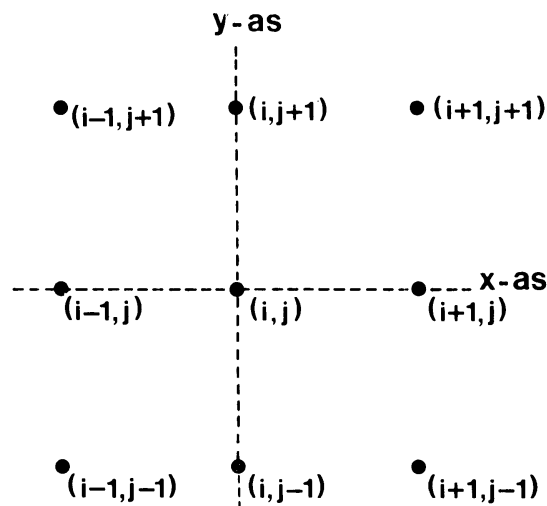


Fig. 1. Het rooster.

We discretiseren zowel in ruimte als in tijd en lossen de vergelijking op m.b.v. een eerste orde "upwind" schema. Dit betekent, dat het spectrum in een punt afhankelijk is van de spectra van de punten die stroomopwaarts liggen.

We krijgen dan:

$$\frac{F_{n+1}(i, j) - F_n(i, j)}{\Delta t} + \frac{c_g |\sin\theta|}{\Delta x} [F_n(i, j) - F_n(i + \sigma_x, j)] + \frac{c_g |\cos\theta|}{\Delta y} [F_n(i, j) - F_n(i, j + \sigma_y)] = 0 \quad (2.3)$$

Hierin stelt  $F_n(i, j)$  het spectrum in het punt  $(i, j)$  voor (zie fig. 1) op tijdstip  $n$ , en geldt  $\sigma_x, \sigma_y \in \{-1, 1\}$ , waarbij de waarde van  $\sigma_x, \sigma_y$  afhangt van de richting waaruit de "stroom" komt.

### Het rooster

De tests in zowel dit hoofdstuk als in hoofdstuk 3 worden uitgevoerd op een Cartesisch rooster van 17 x 36 punten met een roosterafstand van 75 km en een zeer eenvoudige geometrie, dit in tegenstelling tot het uiteindelijke model dat op een soortgelijk rooster werkt, maar dan op een stereografische projectie van het Noordzeegebied bij 60° N.B. (zie Hoofdstuk 4). In beide gevallen wordt het rooster het "GONO-rooster" genoemd, hoewel deze naam strikt genomen slechts op z'n plaats is in het geval van stereografische projectie.

### De rand

Zoals reeds is opgemerkt, is het spectrum in een punt op een bepaald tijdstip afhankelijk van het spectrum van dat punt én de punten "stroomopwaarts" op het vorige tijdstip. Hebben we nu te maken met een punt op de rand van het rooster, dan kan het zijn dat de punten "stroomopwaarts" buiten het GONO-rooster vallen. In het oorspronkelijke WAM-model werd dit probleem opgevangen door te eisen, dat de randpunten van het rooster slechts landpunten mochten zijn, waarin geldt  $F = 0$ .



Dit zou voor het GONO-rooster, waarop NEDWAM moet gaan werken een té grote beperking worden, omdat de Noordzee "gedegradéerd" zou worden tot een binnenzee. In het huidige model worden er dan ook geen eisen opgelegd met betrekking tot de randpunten; deze kunnen landpunten of zeepunten zijn (een zgn. "open" rand). Om de propagatie in de open randpunten toch te kunnen berekenen is het GONO-rooster uitgebreid met een rand ter dikte van één gridpunts-afstand.

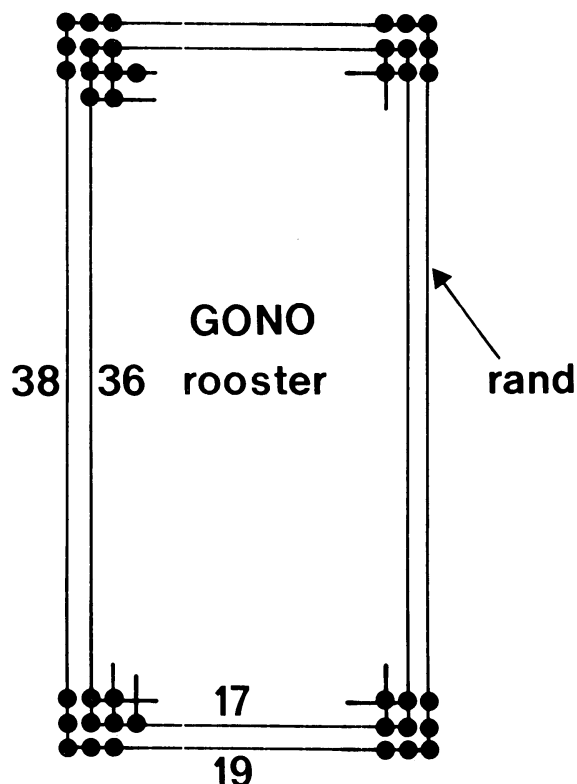


Fig. 2. Het uitgebreide rooster, met daarin het GONO-rooster.

In deze randpunten zal het spectrum ook waarden moeten krijgen. Het ligt voor de hand het spectrum in de randpunten dezelfde waarde te geven als het spectrum van het dichtstbijzijnde GONO-punt, immers in de praktijk zullen in open zee de golfhoogte-gradiënten zeer gering zijn. Mathematisch betekent dit, dat de differentiaal vergelijking (2.1) de randvoorwaarde

$$\vec{\nabla} c_g F = 0 \quad (2.4)$$

opgelegd krijgt.

Het volgende probleem treedt dan op: Stel dat de wind gaat liggen en er dus aan de rand een verminderende energie-toestroom moet plaatsvinden. De rand krijgt echter steeds dezelfde waarde als het aangrenzende GONO-punt. De rand zal dan als een energiebron gaan dienen, terwijl dit onfysisch is. Om dit te voorkomen krijgt het spectrum op de rand een waarde die kleiner is dan de waarde in het aangrenzende GONO-punt. De rand wordt "gedempt". Een waarde van 90% bleek bij eerder onderzoek (Sanders) goede resultaten te geven en die is dan ook verder aangehouden.

### Energiebehoud

Eén van de belangrijkste eigenschappen van een goed propagatie schema is, dat het energiebehoudend is. Om dit na te gaan voor (2.3) bekijken we de situatie, waarbij op tijdstip  $t = n$  slechts energie in  $(i, j)$  aanwezig is (zie fig. 1). Voor het gemak beschouwen we golven die naar "rechtsboven" lopen.

Omdat:

$$\begin{aligned} \Delta F_n(i, j) = F_{n+1}(i, j) - F_n(i, j) = & - \frac{\Delta t c_g \sin \theta}{\Delta x} [F_n(i, j) - F_n(i-1, j)] + \\ & - \frac{\Delta t c_g \cos \theta}{\Delta y} [F_n(i, j) - F_n(i, j-1)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_n(i+1, j) = & - \frac{\Delta t c_g \sin \theta}{\Delta x} [F_n(i+1, j) - F_n(i, j)] + \\ & - \frac{\Delta t c_g \cos \theta}{\Delta y} [F_n(i+1, j) - F_n(i+1, j-1)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_n(i, j+1) = & - \frac{\Delta t c_g \sin \theta}{\Delta x} [F_n(i, j+1) - F_n(i-1, j+1)] + \\ & - \frac{\Delta t c_g \cos \theta}{\Delta y} [F_n(i, j+1) - F_n(i, j)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

geldt:  $\Delta F_n = \sum_{i, j} F_n(i, j) = 0$ .

Er is dus geen sprake van energie-winst/verlies.

### Stabiliteit

Uit de twee-dimensionale transportvergelijking (2.2) volgt de gediscretiseerde vergelijking (2.3), die, als men veronderstelt dat de stapgrootte in de x-richting even groot is als in de y-richting, (zoals het geval is in het GONO-rooster) en we weer de golven beschouwen die naar "rechtsboven" lopen, er als volgt uit ziet:

$$\frac{F_{n+1}(i,j) - F_n(i,j)}{\Delta t} + \frac{c_g}{\Delta x} [\sin\theta (F_n(i,j) - F_n(i-1,j)) + \cos\theta (F_n(i,j) - F_n(i,j-1))] = 0. \quad (2.8)$$

Vul hierin de zgn. "normal mode" oplossing in: [v.d. Berg, 1986]

$$F_n(i,j) = \hat{q} e^{i \cdot [(ki+l)j]\Delta x - \omega n \Delta t} \quad i = \sqrt{-1} \quad (2.9)$$

met k en l de golfgetallen in x-resp. y-richting en  $\omega$  de hoekfrequentie. Beschouw het reële deel van de vergelijking.

We krijgen dan:

$$\cos(\omega \Delta t) = \frac{c_g \Delta t}{\Delta x} [|\sin\theta|(\cos(k\Delta x) - 1) + |\cos\theta|(\cos(l\Delta x) - 1)] + 1 \quad (2.10)$$

Omdat we willen dat  $\omega$  reëel is (anders wordt de oplossing opgeblazen), moet gelden

$$-1 \leq \cos(\omega \Delta t) \leq 1$$

en dus

$$-2 \leq \frac{c_g \Delta t}{\Delta x} [|\sin\theta|(\cos(k\Delta x) - 1) + |\cos\theta|(\cos(l\Delta x) - 1)] \leq 0$$

De rechter ongelijkheid is triviaal. Verder:

$$\begin{aligned} & \frac{c_g \Delta t}{\Delta x} [|\sin\theta|(\cos(k\Delta x) - 1) + |\cos\theta|(\cos(l\Delta x) - 1)] \geq \\ & -2 \frac{c_g \Delta t}{\Delta x} [|\sin\theta| + |\cos\theta|] \geq -2 \quad (\text{de eis!}) \text{ als} \\ \Delta t & \leq \frac{\Delta x}{c_g (|\sin\theta| + |\cos\theta|)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

ofwel, met  $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_g \sqrt{2}}$  wordt aan de stabiliteitseis voldaan, het zgn. CFL-criterium.

### Spreiding

Golfenergie die aanvankelijk in één punt geconcentreerd is, wordt door de dispersie (lange golven gaan harder dan korte) ruimtelijk gespreid. Dit verschijnsel noemt men fysische dispersie.

We bekijken de gediscretiseerde transportvergelijking (voor het gemak in één dimensie en slechts gediscretiseerd naar de ruimte), dan:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \sigma c_g \frac{F(i+\sigma) - F(i)}{\Delta x} = 0. \quad (2.12)$$

met  $\sigma \in \{-1, 1\}$ , afhankelijk van de stroomrichting.

Vult men hierin de "normal mode" oplossing (2.9) in, dan vindt men

$$\frac{\partial F}{\partial t} + ik c_g \left[ \frac{\sin(k\Delta x)}{k\Delta x} \right] \cdot F = 0. \quad \mathbf{i} = \sqrt{-1} \quad (2.13)$$

Maar dit betekent, dat de propagatiesnelheid in het gediscretiseerde geval anders afhangt van het golfgetal  $k$  dan in het ongediscretiseerde geval. Dit noemt men numerieke dispersie.

We zijn natuurlijk geïnteresseerd in de numerieke dispersie. Een maat voor de dispersie is de variantie  $\sigma^2$ . Beschouwen we slechts één frequentie, dus met één groepssnelheid (dus géén fysische dispersie), dan kan men met behulp van iteratie en de binomiaal formule afleiden dat

$$\sigma^2 = n v (1-v) C_1 \cdot F_0(x_j) \quad (2.14)$$

met:  $n = \text{aantal tijdstappen}$

$$v = \frac{\Delta t c_g}{\Delta x}$$

$C_1$  een constante die voldoet aan  $E = C_1 \cdot F$

$F_0(x_j)$  het beginspectrum in  $x_j$

zodat de variantie lineair is met de tijd.

### Het testen

Het propagatieschema is uitvoerig getest, waarbij naar de volgende punten gekeken werd:

- beweegt de gemiddelde plaats van de energie met de groepssnelheid?
- is er inderdaad geen energie winst/verlies?
- wat gebeurt er met de spreiding?

### TEST 1

tijdsduur: 48 h.

tijdstap: 45 min.

beginspectrum: In het midden van het GONO-rooster krijgt het spectrum voor  $\theta = 5\pi/6$  en een frequentie van 0.067 Hz een waarde, zodanig dat de energiewaarde 1 is. Voor alle andere richtingen en frequenties wordt het spectrum nul gesteld.

doel: Het controleren van de groepssnelheid.

Het energieverlies door propagatie "van het grid af" te bepalen.

De spreiding vergelijken met de theoretische waarde.

De groepssnelheid bij deze frequentie (en "oneindige" diepte) is 11.6 m/s.

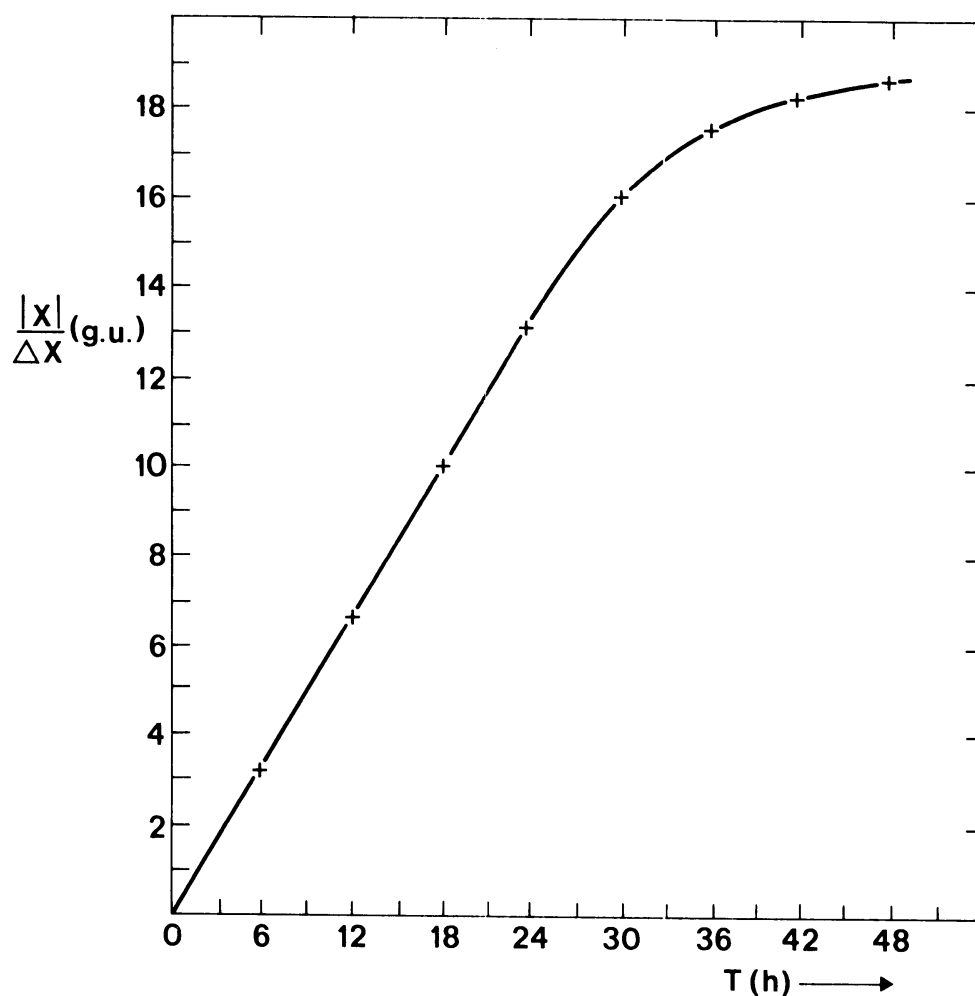


Fig. 3. De afstand van de gemiddelde plaats van de energie tot het beginpunt in grid-units voor test 1.

Iedere 3 uur wordt dan  $125064 \text{ m} \approx 1.667$  gridpointsunits (g.u.) afgelegd. In fig. 3 is de afstand van de gemiddelde plaats van de energie tot het beginpunt uitgezet tegen de tijd. De snelheid komt tot  $\pm 21$  uur overeen met de groepssnelheid. Hierna begint de energie van het grid af te lopen, zodat de snelheid afneemt. Fig. 4 laat zien, dat na 6 uur reeds energie verlies optreedt, omdat de "eerste" energie de rand heeft bereikt. Dit verlies is tot  $\pm 21$  uur nog niet zo groot, dat dit een grote invloed heeft op de groepssnelheid. Hierna neemt de energie zeer snel af, tot er na 48 h vrijwel geen energie meer op het grid aanwezig is.

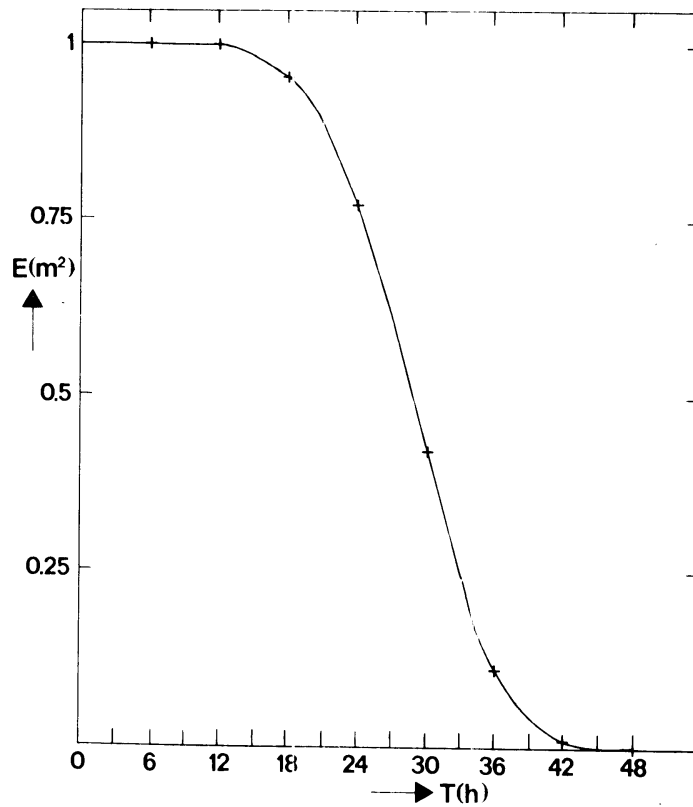


Fig. 4. De totale energie op het rooster voor test 1.

In fig. 5 is de variantie uitgezet tegen de tijd. Duidelijk is te zien, dat deze lineair afhangt van de tijd, zoals verwacht mocht worden, tot het moment waarop energie van de rand afloopt.

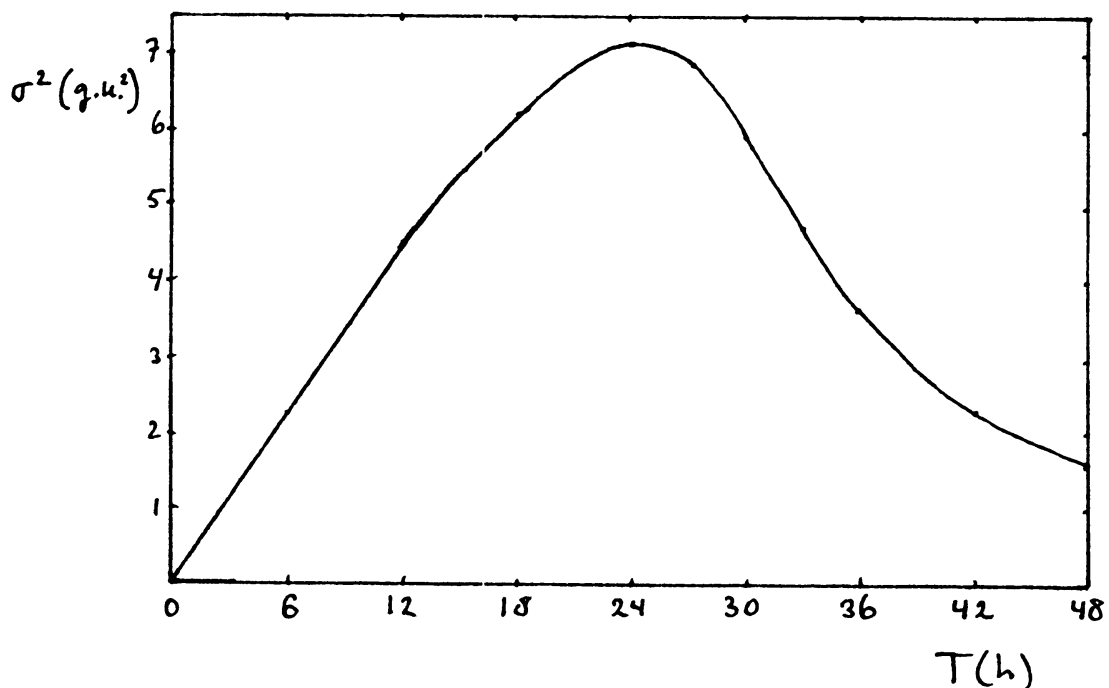


Fig. 5. De variantie uitgezet tegen de tijd.

TEST 2

tijdsduur: 48 h.  
 tijdstap: 45 min.  
 beginspectrum: "Midden onder" wordt het spectrum voor  $\theta = 0$  en een frequentie van 0.098 Hz op een waarde gesteld, zodoende dat de energie in dit punt de waarde 1 heeft.  
 doel: de invloed van de rand op de energie bekijken.

In het begin is de hoeveelheid energie die door de rand wordt geleverd in verhouding tot de totale energie, groot. Hierdoor wordt de verplaatsingssnelheid van de plaats van de gemiddelde energie geremd. Deze remmende invloed op de groepssnelheid wordt steeds minder en er is na 24 h dan ook een lichte stijging in de groepssnelheid waar te nemen (zie fig. 6).

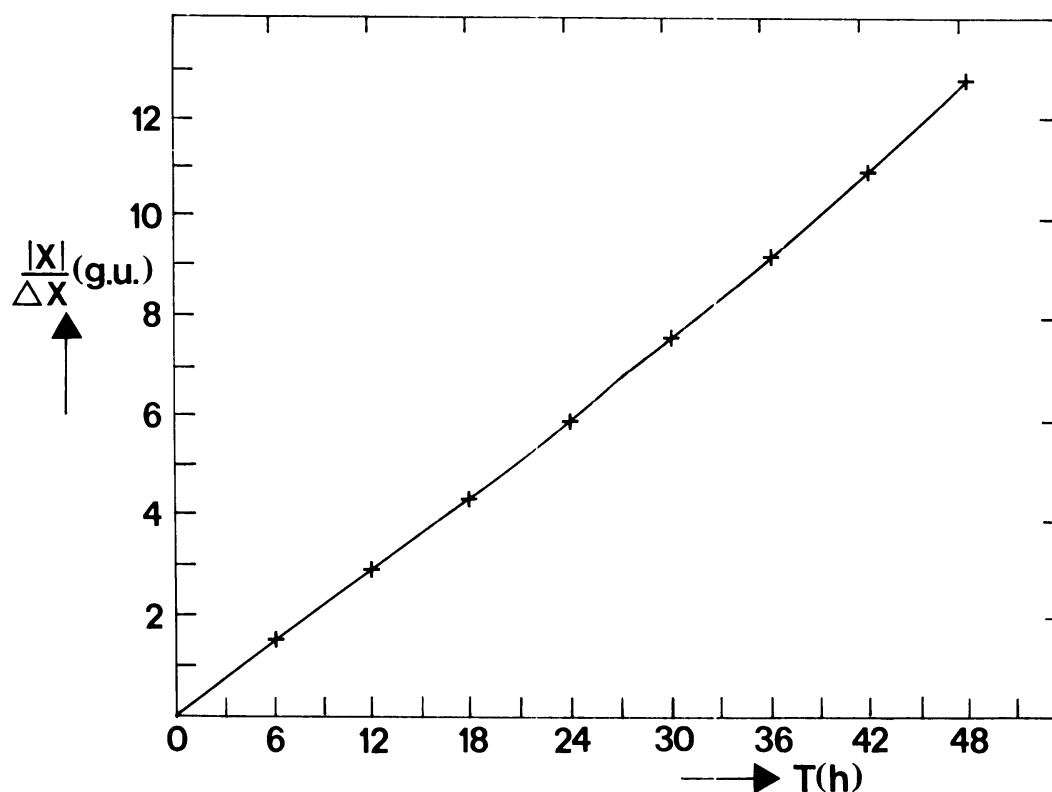


Fig. 6 De afstand van de gemiddelde plaats van de energie tot het beginpunt in grid-units voor test 2.



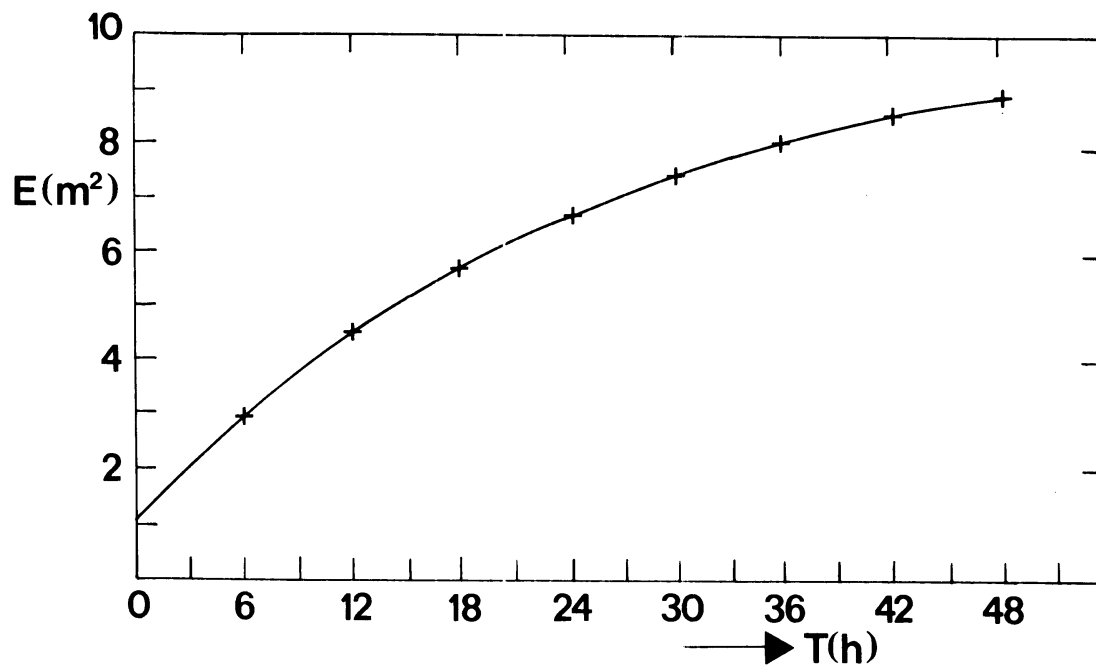


Fig. 7. De totale energie op het rooster in test 2.

De energiewinst door de rand is zeer groot. In fig. 7 is te zien, dat de totale energie na 48 h zelfs is vernegenvoudigd. In werkelijkheid betekent dit, dat golven die van buiten het beschouwde gebied naar binnen "stromen" voor een enorme groei van de totale energie zorgen.

### 3. Integratie van de brontermen

In deze paragraaf wordt de integratiemethode van de bronfunctie besproken. Ter wille van het testen van modellen is een aantal standaardtests ontworpen. Twee van deze tests, SWAMP II en III [SWAMP group, 1985] worden behandeld.

Het eerste geval (SWAMP II, een afluiddige wind die loodrecht op de kust staat) gaat uit van uniforme begincondities, zodat de invloed van de propagatie in het begin (maar later zeker niet!) te verwaarlozen is.

Voor punten die ver van de kust liggen wordt, als de invloed van de randen te verwaarlozen is, de transportvergelijking:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = S \quad (3.1)$$

het zogenaamde "duration limited" geval.

Bij lange tijdsduur, als de zee stationnair is, dan geldt:

$$\vec{v}_g \cdot \nabla F = S \quad (3.2)$$

het "fetch-limited" geval.

#### De brontermen

Voor de bronfunctie  $S$  geldt:

$$S = S^{in} + S^{nl} + S^{ds} + S^{bf} \quad (3.3)$$

##### 1. $S^{in}$ , de windinvoer

-----

Er geldt:

$$S^{in} = \beta \cdot F \quad (3.4)$$

$$\beta = 0.25 \omega E_{max} \left\{ 28 \frac{u}{c} \cos \phi - 1, 0 \right\}$$

waarin:  $\omega = 2\pi f = (gk)^{1/2}$ , met  $f$  de frequentie,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  de gravitatieversnelling,  $k$  het golfgetal,  $E = d_a/d_s$ ,  $d_a$  de dichtheid van lucht,  $d_s$  de dichtheid van zeewater,  $u_* = c_d^{1/2} \cdot u_{10}$ ,  $c_d = 1.83 \cdot 10^{-3}$ ,  $u_{10}$  de windsnelheid in m/s op 10 meter boven het wateroppervlak,  $c = \omega/k$  de fasesnelheid en  $\phi$  de hoek tussen wind- en golfrichting.

## 2. $S^{n1}$ , de niet-lineaire bronterm

-----

$S^{n1}$  is een gecompliceerde, niet-lineaire functionaal van het golfspectrum die geschreven wordt als een zes-dimensionale integraal over tripel produkten van  $F$ :

$$S^{n1} = \int df_1 df_2 df_3 d\theta_1 d\theta_2 d\theta_3 T(f, f_1, f_2, f_3, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3) * \\ F(f_1, \theta_1; x, t) F(f_2, \theta_2; x, t) F(f_3, \theta_3; x, t) \quad (3.6)$$

De distributie  $T$  is berekend door Hasselmann [The Wam-Development and Implementation group, 1987]. Het voert te ver om hier dieper op in te gaan.

## 3. $S^{ds}$ , de dissipatie-term

-----

$$S^{ds} = - \gamma_{ds} \cdot F \quad (3.7)$$

$$\gamma_{ds} = 1.59 \omega (\omega/\bar{\omega}) \hat{\alpha}^2 \quad (3.8)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\langle \eta^2 \rangle \bar{\omega}^4}{g^2} \quad (3.9)$$

waarin  $\langle \eta^2 \rangle$  en  $\bar{\omega}$  (de gemiddelde hoek frequentie) globale eigenschappen van het spectrum uitdrukken.

## 4. $S^{bf}$ , de bodem frictie

-----

$$S^{bf} = - \frac{\Gamma}{g^2} \cdot \frac{\omega^2}{\sinh^2(kD)} \cdot F \quad (3.10)$$

met

$$\Gamma = 0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$$

D = de diepte in meters.

### Het schema

Er wordt gediscretiseerd in de tijd (de plaatsdiscretisatie is niet relevant voor deze discussie) en (3.1) wordt opgelost met behulp van een impliciet schema:

$$F_{n+1} = F_n + \frac{1}{2}\Delta t (S_{n+1} + S_n) \quad (3.11)$$

met

$\Delta t$  de integratie-tijdstap en

$S_{n+1}$  de bronfunctie op tijdstip  $n+1$ .

Er wordt gebruik gemaakt van een impliciet schema, omdat deze een grotere tijdstap mogelijk maakt. Bij een expliciet schema is de tijdstap afhankelijk van de hoogste frequentie waarmee gewerkt wordt, waarbij geldt: hoe hoger de frequentie hoe kleiner de voor stabiliteit vereiste tijdstap.

De windinvoer op tijdstip  $n+1$  is eenvoudig te berekenen:

$$S_{n+1}^{in} = \beta_{n+1} \cdot F_{n+1} = \beta_{n+1} (F_{n+1} - F_n) + \beta_{n+1} \cdot F_n = \beta_{n+1} \cdot \Delta F + \beta_{n+1} F_n \quad (3.12)$$

Noem de overblijvende brontermen  $S^{rest} = S^{nl} + S^{ds} + S^{bf}$ . Gebruik de Taylor-reeks naar  $F_n$  met stap  $\Delta F = F_{n+1} - F_n$ :

$$S_{n+1}^{rest} = S_n^{rest} + \frac{\partial S_n^{rest}}{\partial F} \cdot \Delta F + \dots \quad (3.13)$$

waarbij  $\frac{\partial S_n^{rest}}{\partial F}$  de funktionaal afgeleide naar  $F$  voorstelt (een matrix).

Deze matrix,  $M_n$ , kan ontbonden worden in een diagonaal matrix  $\Lambda_n$  en een niet-diagonaal matrix  $N_n$ :

$$\frac{\partial S_n^{rest}}{\partial F} = M_n = \Lambda_n + N_n \quad (3.14)$$

Invullen in (3.11) geeft:

$$\Delta F = \frac{1}{2}\Delta t(\beta_{n+1} \cdot \Delta F + \beta_{n+1} \cdot F_n + S_n^{\text{rest}} + (\Lambda_n + N_n)\Delta F + \beta_n F_n + S_n^{\text{rest}}) \quad (3.15)$$

Als de tijdstap niet groot is kunnen de bijdragen van de niet-diagonaaltermen verwaarloosd worden [The Wam-Development and implementation group, 1987]:

$$\Delta F = [1 - \frac{1}{2}\Delta t(\beta_{n+1} + \Lambda_n)]^{-1} \cdot [(\beta_{n+1} + \beta_n) \cdot F_n / 2 + S_n^{\text{rest}}] \cdot \Delta t \quad (3.16)$$

### Het testen

Het integratiegedeelte wordt getest m.b.v. twee ideale gevallen: SWAMP II en III. Omdat van beide tests reeds resultaten van andere modellen bekend waren, waaronder WAMS, de voorloper van NEDWAM, was er vergelijkingsmateriaal voor handen.

### SWAMP case II

-----

Een constante, orthogonale afluwindige wind waait over een "bassin" met constante diepte. Gekeken wordt naar de toestand van het zeeoppervlak als functie van de strijklengte (vrijwel steeds aangeduid met het engelse woord "fetch", d.w.z. de afstand van een beschouwd punt tot hetzij de rand van het werkzame windveld, hetzij de "vaste wal" [Groen, Dorrestein, 1976]).

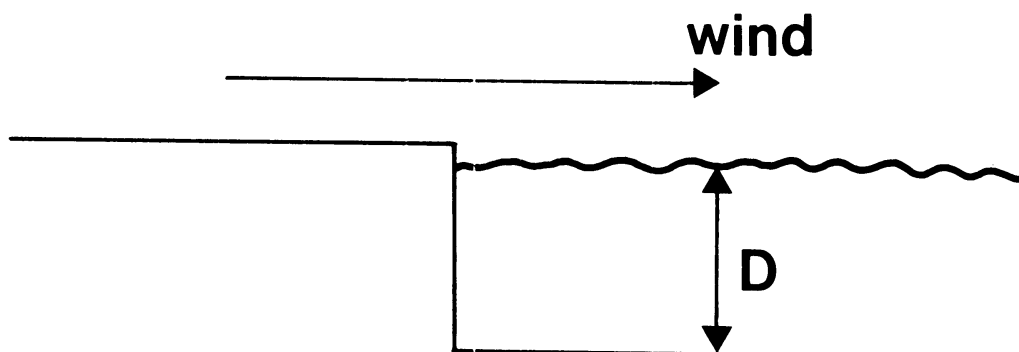


Fig. 8. Zijaanzicht SWAMP case II.

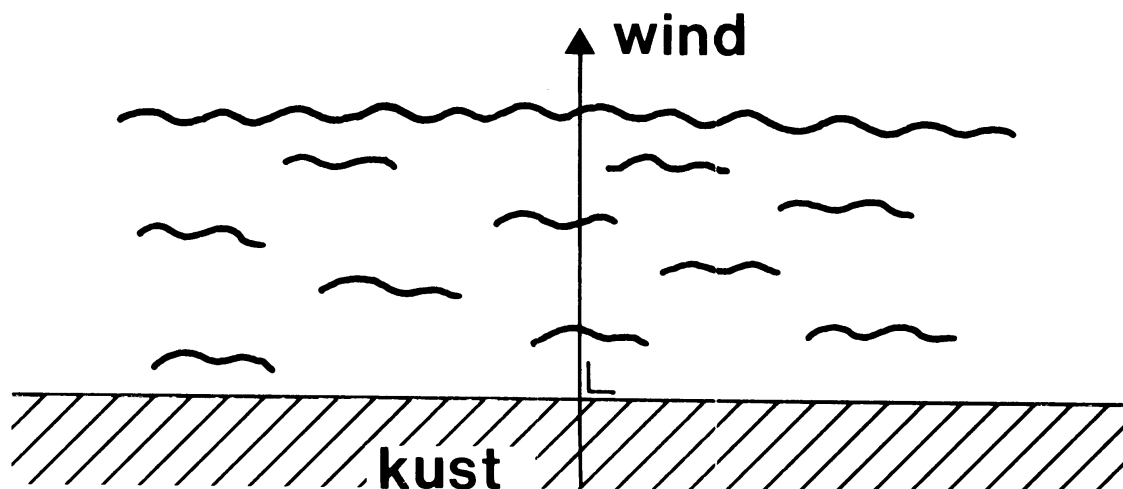


Fig. 9. Bovenaanzicht SWAMP case II.

Deze test zou, voor ver van de kust gelegen punten (dus met zeer grote fetch) de ideale "duration limited" en voor grote tijden de "fetch limited" groeikrommen moeten laten zien. Om de landstrook te representeren wordt op de onderste rij van het GONO-rooster het spectrum 0 gesteld. Alle andere punten krijgen als beginspectrum het JONSWAP-spectrum [Günther, et al., 1979], met:  $\theta = 0$ ,  $\alpha = 0.018$ ,  $f_m = 0.2$ ,  $\gamma = 3$ ,  $\sigma_a = 0.07$ ,  $\sigma_b = 0.09$  en richtingsverdeling  $\frac{2}{\pi} \cos^2 \zeta$ , met  $\zeta$  de hoek tussen  $\theta$  en de betreffende richting is.

Als propagatie- en integratietijdstap is 45 min. resp. 15 min. genomen (Deze tijdstappen worden ook in NEDWAM gebruikt). Duur van de voorspelling: 48 uur. De windsnelheid wordt  $u_* = 0.85$  m/s gesteld ( $u_{10} = 20$  m/s, zie (3.5)). De test is gedaan voor verschillende diepten: 15, 30, 60, 120 en 180 meter.

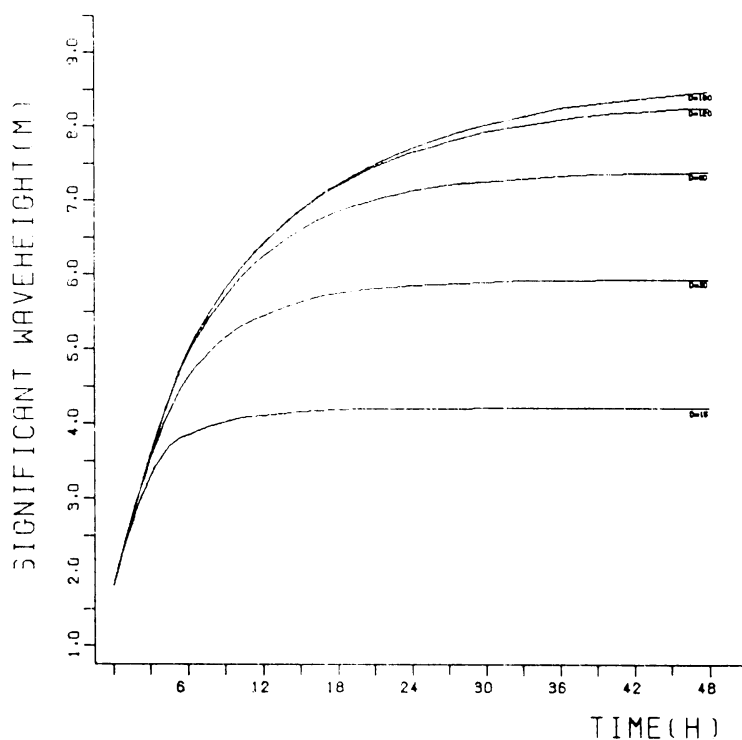


Fig. 10. De significante golfhoogte bij verschillende diepten voor het "duration-limited" geval.

Voor 15, 30 en 60 meter diepte is de zee na 48 uur volgroeid. Voor 120 en 180 meter diepte is de toestand bijna stationnair, er zal nog enige groei plaats vinden (fig. 10).

De resultaten voor het "fetch-limited" geval zijn in de tabellen I en II af te lezen. Deze komen precies overeen met het al eerder genoemde en geverifieerde, vergelijkingsmateriaal [Komen, maart 1987].

		Diepte in meters				
		15	30	60	120	180
	75	3.42	4.11	4.44	4.49	4.49
	150	3.83	4.81	5.37	5.50	5.51
	225	3.99	5.16	5.88	6.12	6.14
	300	4.07	5.37	6.23	6.54	6.57
Fetch	600	4.19	5.75	6.90	7.41	7.48
in	1200	4.21	5.91	7.27	8.02	8.18
kilometers	2400	4.21	5.93	7.39	8.26	8.47
	2550	4.21	5.94	7.39	8.26	8.48

Tabel I. Significante golfhoogte in meters voor het "fetch-limited" geval bij verschillende diepten.

		Diepte in meters				
		15	30	60	120	180
	75	0.1563	0.1435	0.1365	0.1349	0.1350
	150	0.1438	0.1303	0.1229	0.1196	0.1195
	225	0.1383	0.1241	0.1156	0.1124	0.1121
Fetch	300	0.1335	0.1194	0.1115	0.1079	0.1075
in	600	0.1291	0.1126	0.1041	0.0995	0.0987
kilometers	1200	0.1283	0.1098	0.1000	0.0942	0.0929
	2400	0.1283	0.1092	0.0987	0.0922	0.0906
	2550	0.1283	0.1092	0.0987	0.0922	0.0906

Tabel II. Gemiddelde frequentie in Hertz voor het "fetch-limited" geval bij verschillende diepten.



## SWAMP case III

-----

Een constante wind staat diagonaal over een bassin, dat langs twee zijden afgesloten wordt (in literatuur: het "slanting fetch" geval). Hiermee kan de respons van het model op asymmetrische randcondities bekeken worden.

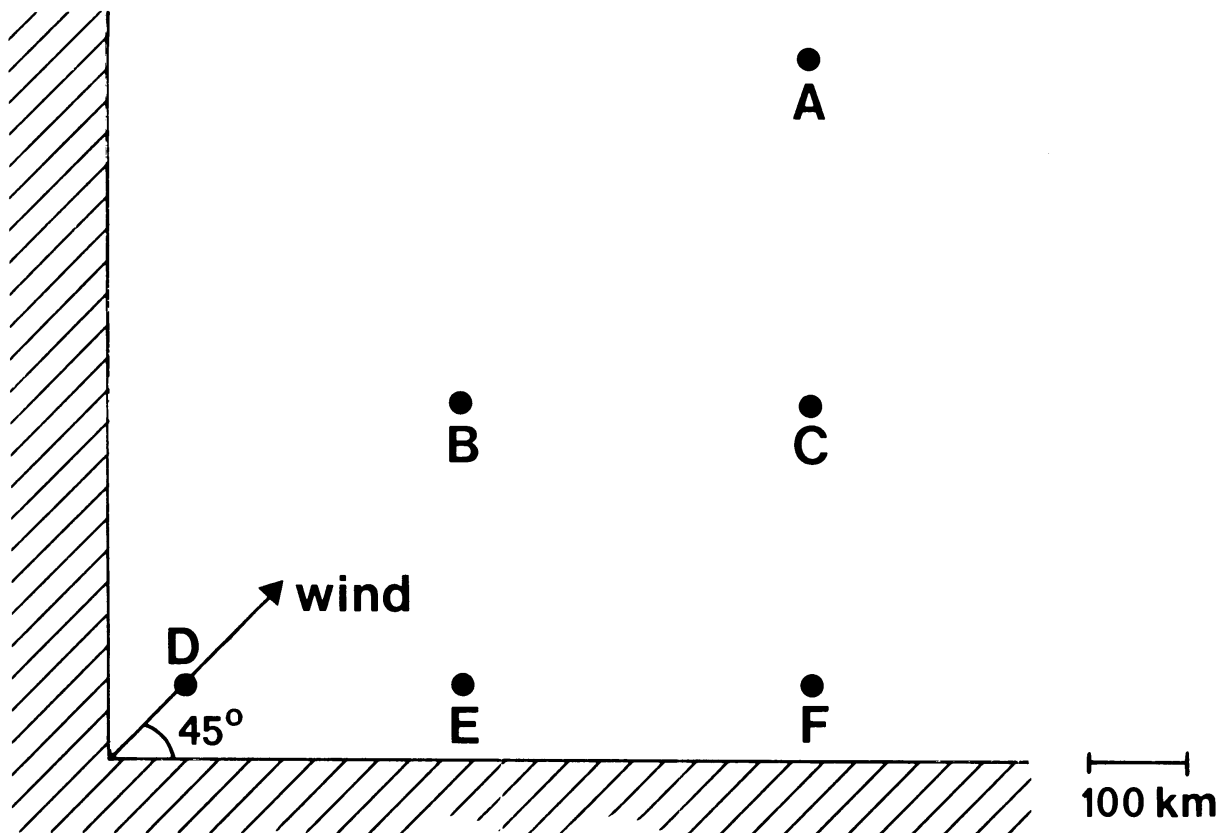


Fig. 11. Het "slanting fetch" geval, met de zes analyse-punten.

De onderste rij en eerste kolom van het GONO-rooster krijgen een spectrum met waarde 0. Alle andere punten krijgen weer het JONSWAP-spectrum met dezelfde parameters als in SWAMP case II. Ook de verdere beginwaarden zijn als in SWAMP case II.

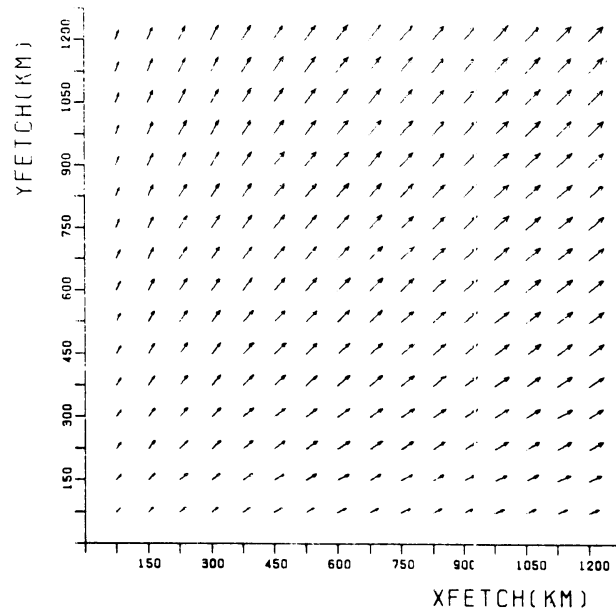


Fig. 12. Custer diagram voor SWAMP case III.

Fig. 12 is een Custerdiagram van het "onderste" gedeelte van het gebied na 48 uur. De lengte van een pijl, met de staart in een punt, is evenredig met de hoeveelheid energie in dat punt (en dus met het kwadraat van de golfhoogte!). De richting van de pijl geeft de gemiddelde golfrichting aan. Duidelijk is te zien, dat voor een punt vlak bij de kust (maar niet op de diagonaal, bijv. punt F (zie fig. 11, 12) de gemiddelde golfrichting afgebogen is naar de kust toe. Dit is te verklaren doordat de fetch in de x-richting groter is dan in de y-richting, zodat in de x-richting een hogere waarde van het spectrum te verwachten valt. Verder is het Custerdiagram symmetrisch en we kunnen dus zeggen, dat het model wat dit betreft aan de verwachtingen voldoet.

Een andere informatiebron is het 2-dimensionale spectrum (zie fig. 13 a t/m f). De punten A, B en D liggen op de diagonaal en vertonen een symmetrisch spectrum rond de lokale windrichting (die overal  $45^\circ$  is). Opvallend is dat het spectrum smal is rond de piekfrequentie. Verder geldt: hoe groter de fetch, hoe kleiner de piekfrequentie. De punten C, E en F vertonen de asymmetrie die verwacht mocht worden: de hoek wordt groter, het spectrum trekt naar de dichtstbijzijnde kust toe.

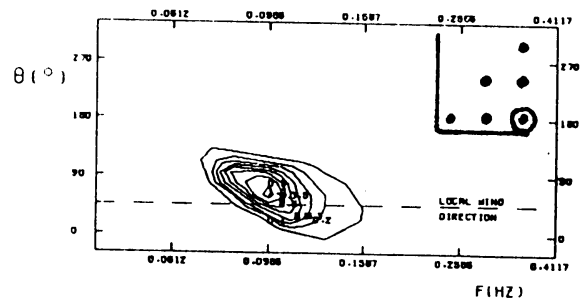
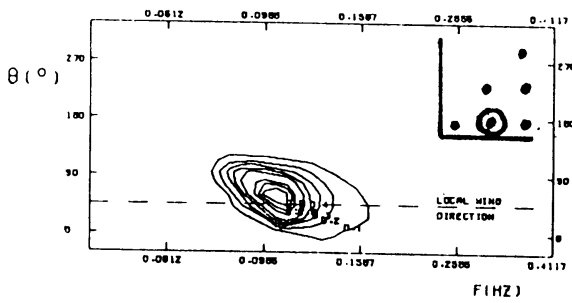
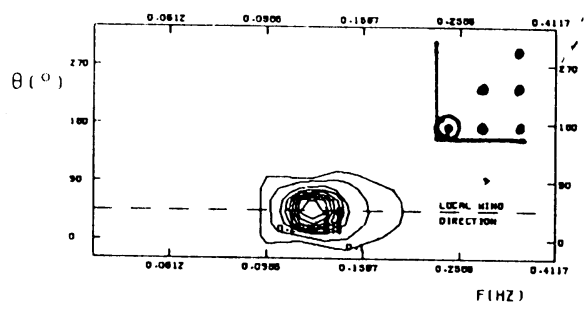
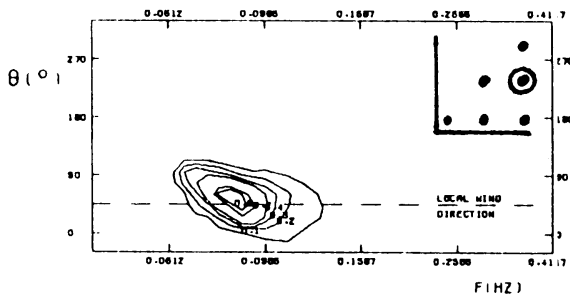
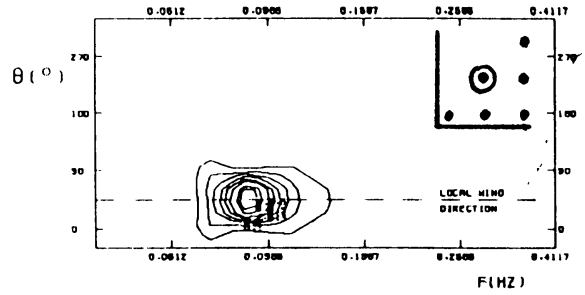
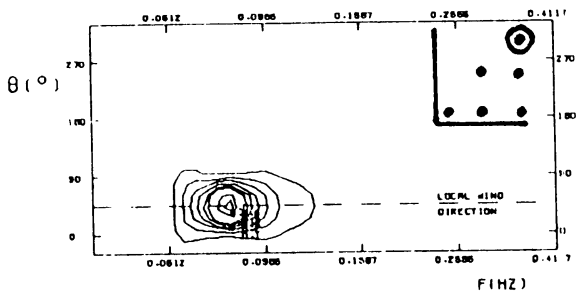


Fig. 13 a-f. Het 2-D spectrum voor de verschillende analyse-punten.

#### 4. Het Noordzeemodel

Het model gaat draaien als operationeel model van het KNMI (waarschijnlijk in 1988) en moet dan werken op het Noordzeegebied. Bovendien moet het dan "echte" winden inlezen. Er is gekozen voor het testen van het model met een storm uit november 1981.

#### Geometrie

In hoofdstuk 4 is reeds kort vermeld, dat het GONO-rooster een Cartesisch rooster is van 17 x 36 punten met roosterafstand 75 km op een stereografische projectie bij 60° NB. Dit betekent echter, dat een vaste roosterafstand op de projectie niet met een vaste afstand op de bol correspondeert. Deze afstand is plaatsafhankelijk. We gebruiken daarom een (plaatsafhankelijke) schalingsfactor, die roosterafstanden schaalt naar werkelijke afstanden [De Voogt, 1981].

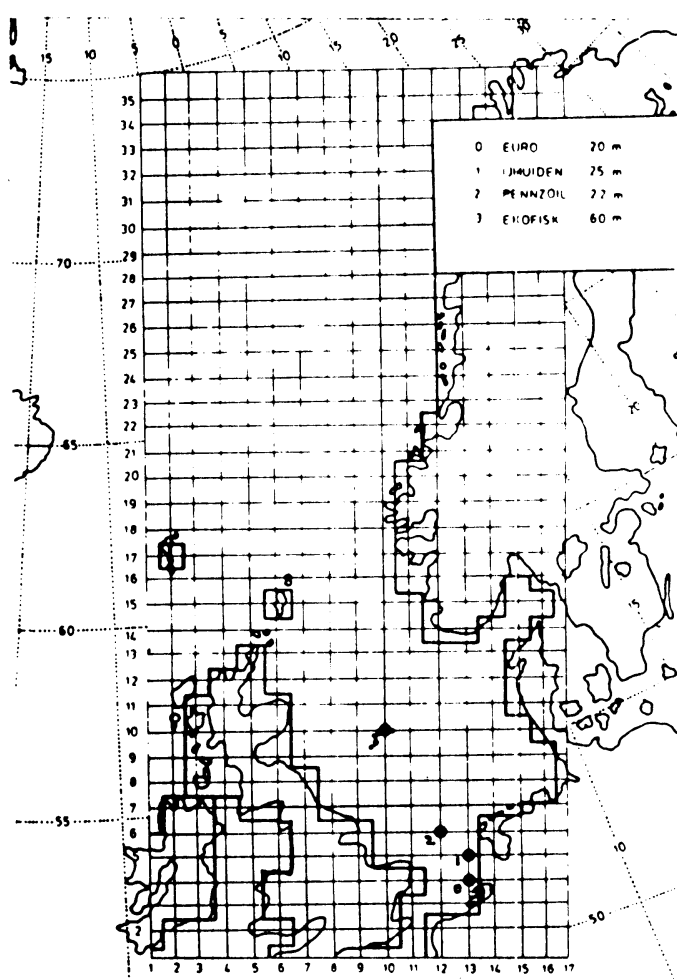


Fig. 14. Het GONO grid, met vier verificatiestations.

### De winden

Vanwege het testen van het model leest deze momenteel de windsnelheden en windrichtingen van één grote file met winden van 18 november tot 28 november 1981. Deze numerieke winden zijn afgeleid van het operationele weervoorspellingsmodel van het Meteorological Office. Dit model maakt windvoorspellingen op een stereografisch geprojecteerd grid op 900 mb met intervallen van 3 uur en 12 uur vooruit. Empirische relaties geven nu de oppervlaktewinden [SWIM group, 1985].

### De storm

Voor de periode van 18 tot 28 november 1981 zijn betrouwbare windgegevens bekend, zodat het voor de hand ligt de storm uit deze periode als test te gebruiken. Er worden drie verificatiestations gebruikt: Europoort, K13 (Pennzoil) en Auk/Ekofisk (zie fig. 14). Deze stations hebben voor de gehele periode de golfhoogte, windsnelheid en windrichting doorgegeven, waarbij moet worden opgemerkt, dat in het geval Auk/Ekofisk (dit zijn eigenlijk twee stations, zo'n 50 km uit elkaar) de meetgegevens op 23 november 18.00 uur, 24 november 18.00 uur, 25 november 18.00 uur, 27 november 00.00 uur en 06.00 uur van Auk kwamen, terwijl voor de rest van de periode meetgegevens van Ekofisk kwamen. Het NEDWAM-model levert met intervallen van 1½ uur de windrichting, windsnelheid, golfhoogte, gemiddelde golfrichting en piekfrequentie voor deze drie meetstations.

Ter vergelijking is voor dezelfde periode ook met GONO "gehindcast".

De golfhoogten (zowel analyse als meting) zijn in de figuren 15a, 16a en 17a uitgezet tegen de tijd. Ter volledigheid zijn in de figuren 15b, 16b en 17b de windsnelheden en in fig. 15c, 16c en 17c de windrichtingen weergegeven.

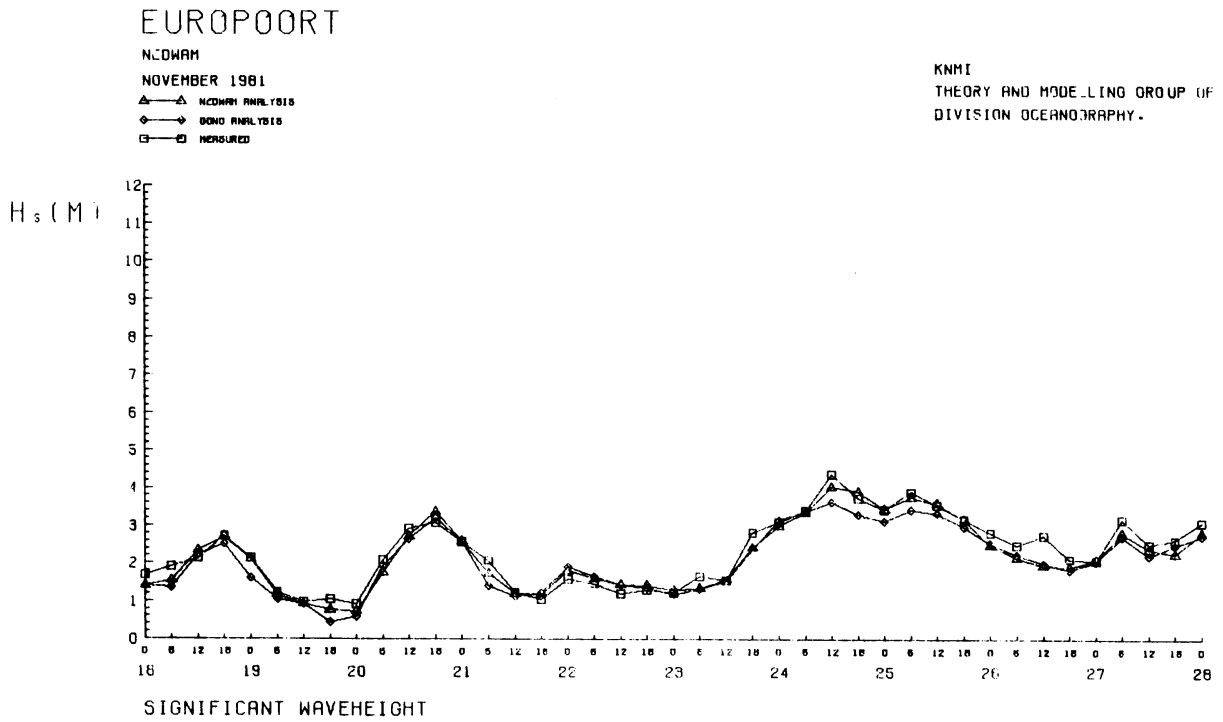


Fig. 15a. De golfhoogte voor Europoort uitgezet tegen de tijd.

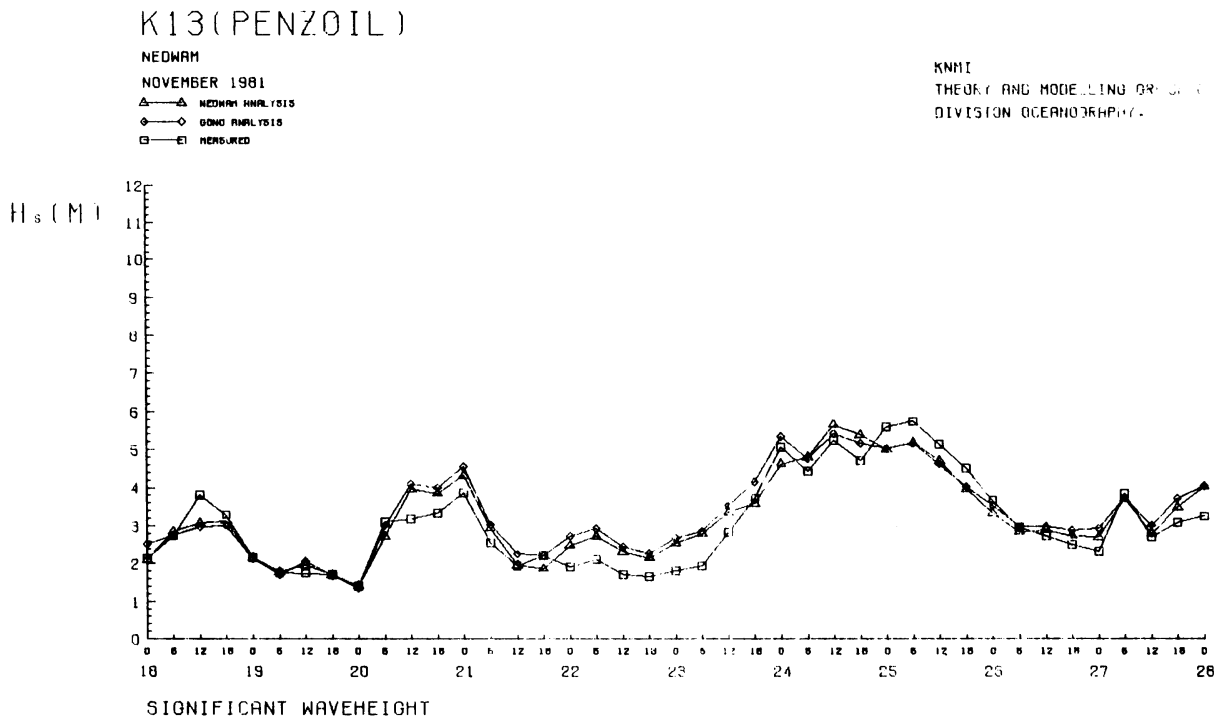


Fig. 16a. De golfhoogte voor K13 uitgezet tegen de tijd.

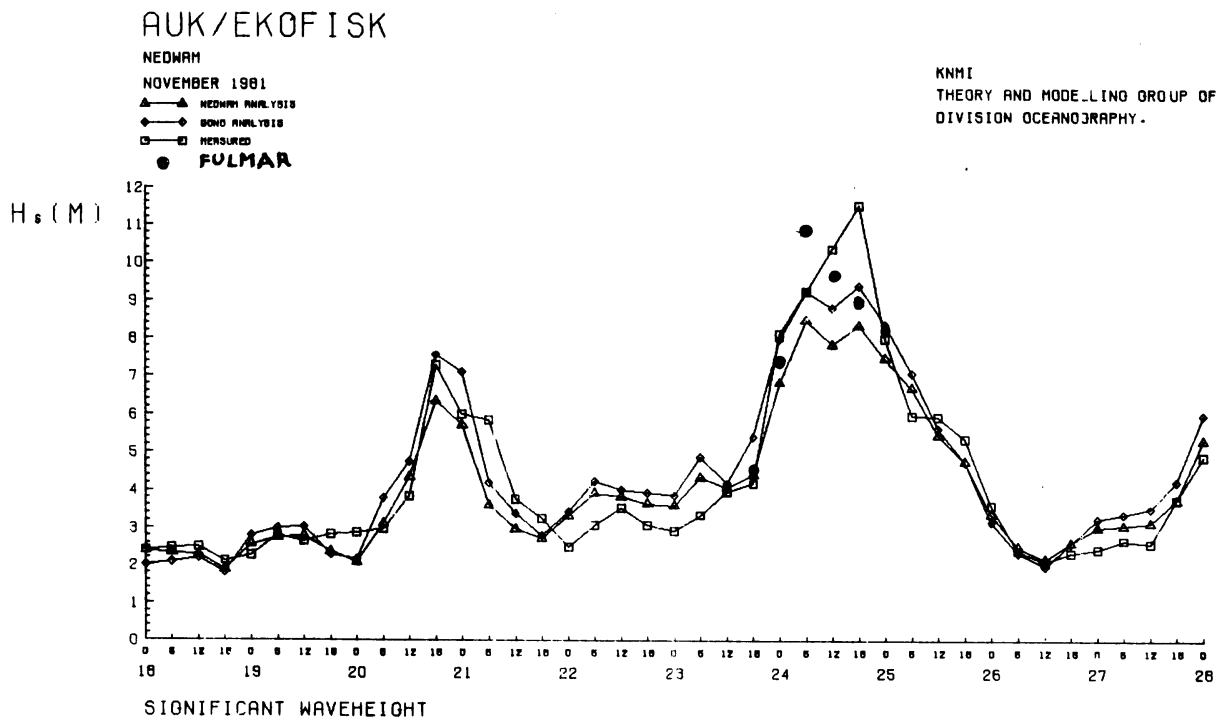


Fig. 17a. De golfhoogte voor AUK/Ekofisk uitgezet tegen de tijd.

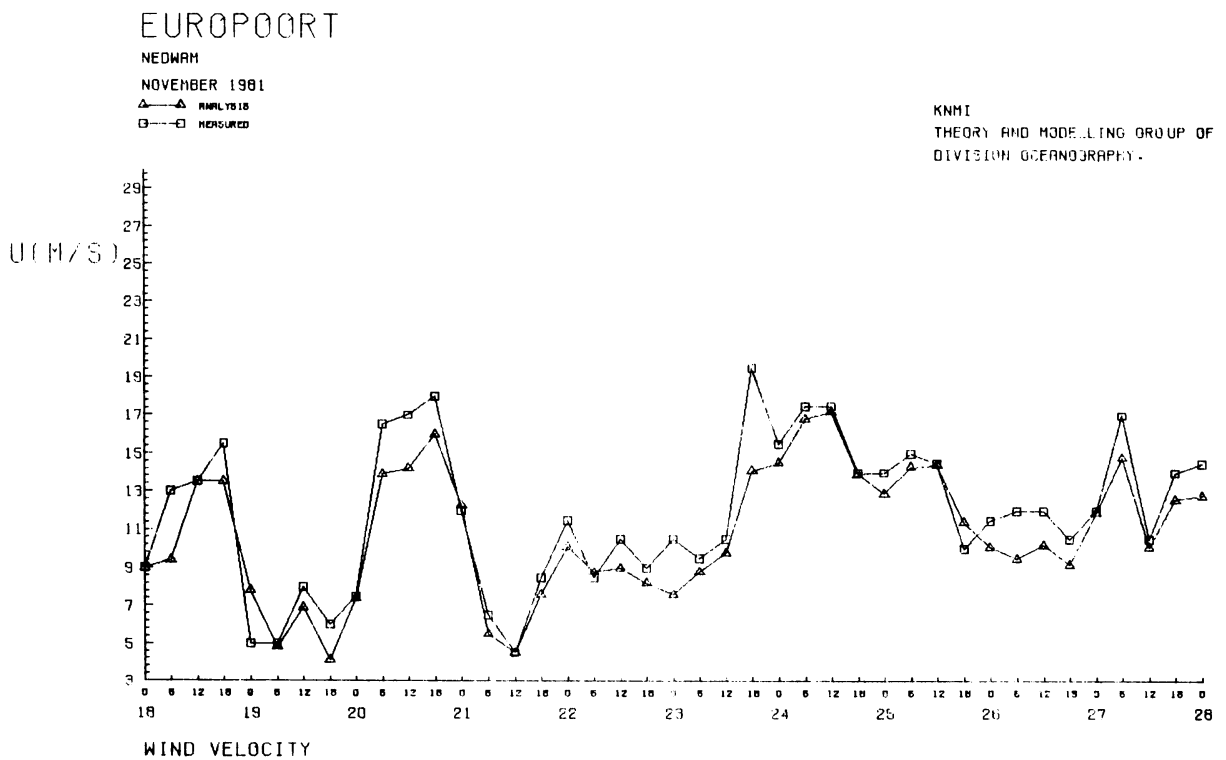


Fig. 15b. De windsnelheid voor Europoort uitgezet tegen de tijd.

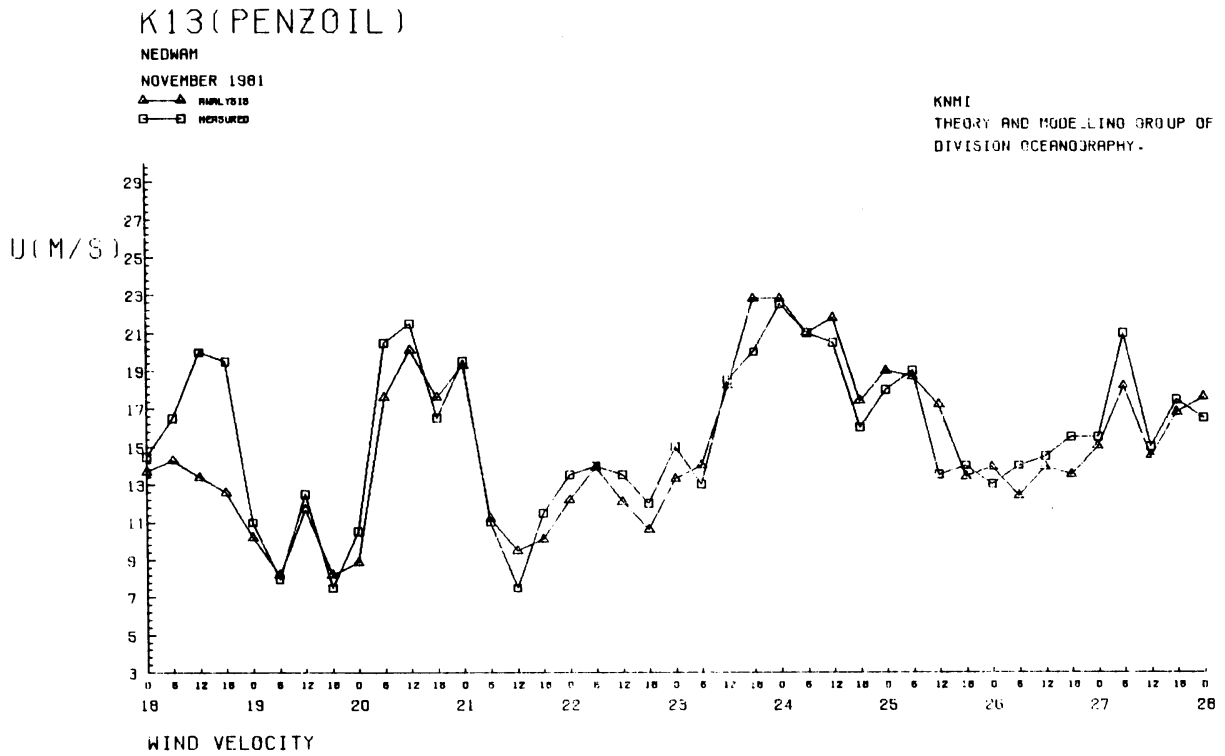


Fig. 16b. De windsnelheid voor K13 uitgezet tegen de tijd.

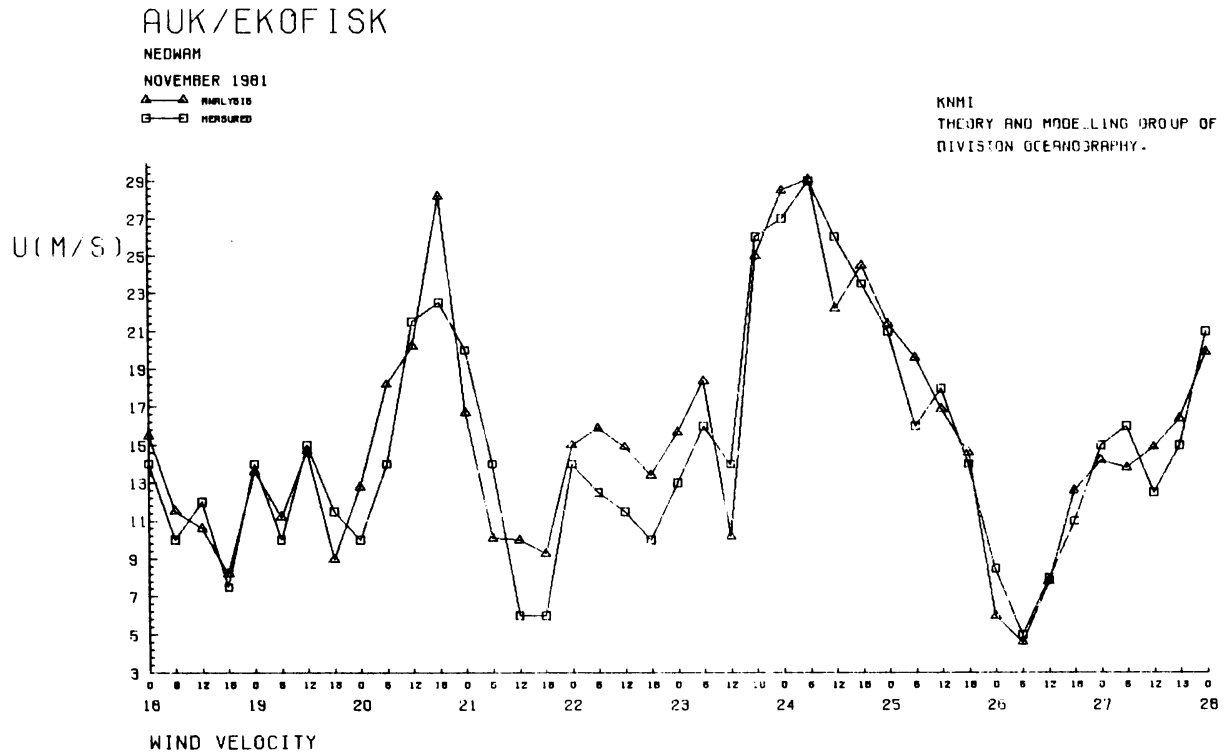


Fig. 17b. De windsnelheid voor AUK/Ekofisk uitgezet tegen de tijd.



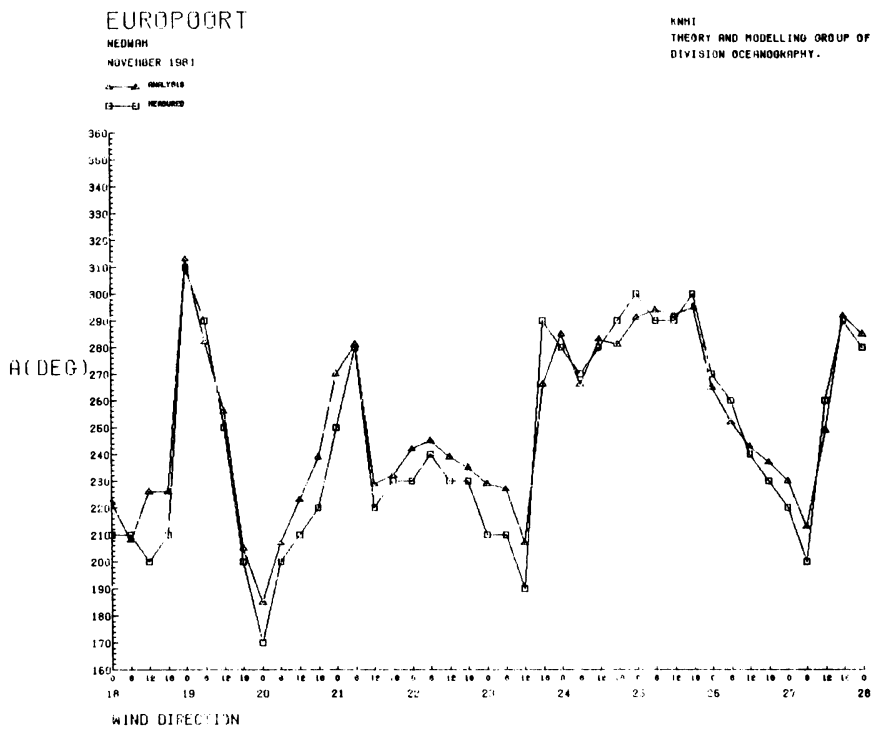


Fig. 15c. De windrichting voor Europoort uitgezet tegen de tijd.

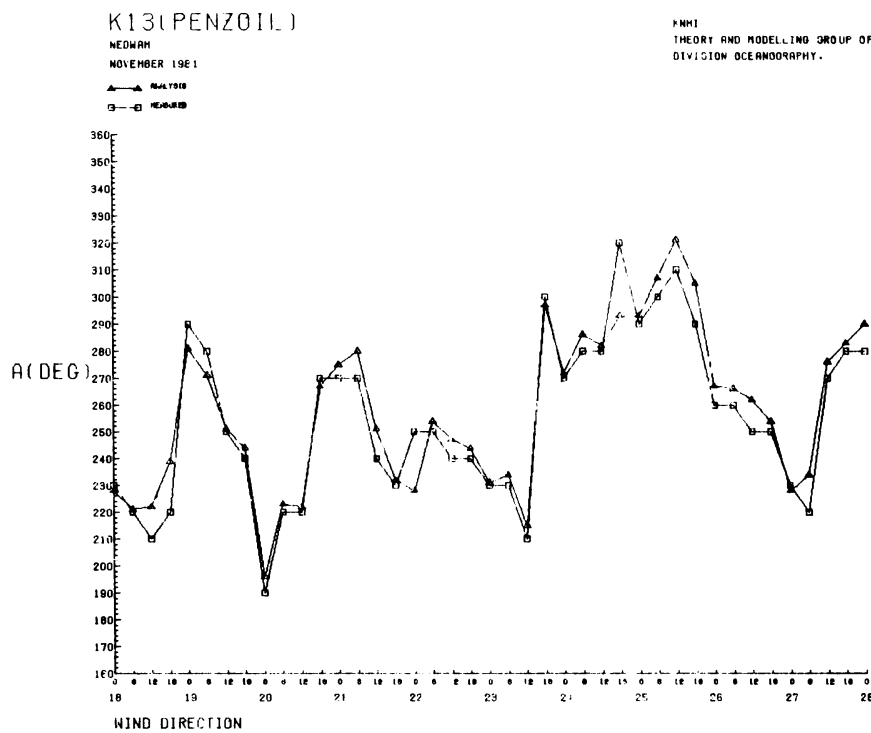


Fig. 16c. De windrichting voor K13 uitgezet tegen de tijd.

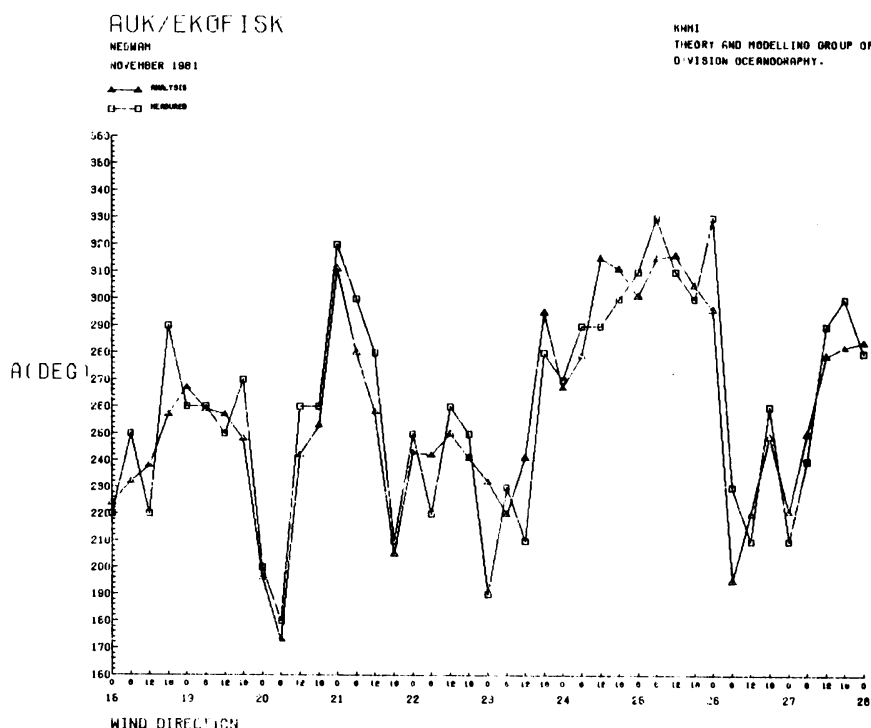


Fig. 17c. De windrichting voor AUK/Ekofisk uitgezet tegen de tijd.

Aan de hand van deze resultaten zijn er enige statistische grootheden berekend (zie tabel III).

Voor Europoort en K13 zijn de uitkomsten van NEDWAM duidelijk beter dan van GONO. GONO heeft de neiging bij grote golfhoogten te hoog uit te vallen, terwijl NEDWAM steeds lager zit, wellicht bij Auk/Ekofisk te laag, hoewel men daarbij moet beseffen, dat een aantal meetresultaten van een ander station komen (bv. juist de gegevens van de piek op 24 november 18.00 uur).

Ter volledigheid, en om aan te tonen dat grote verschillen mogelijk zijn tussen relatief dicht bij elkaar gelegen meetstations, zijn in fig. 17a de meetresultaten van Fulmar (een station vlakbij Auk/Ekofisk) opgenomen. De verschillen met het model zijn nu aanmerkelijk kleiner.

locatie	N $\bar{H}_s$ (m) D(m)	Model	bias(m)	$\sigma$ (m)	Scatter- index	aantal+fouten	aantal-fouter
Europoort	41 2.31 25	Gono	-0.21	0.27	12	9	32
		Nedwam	-0.11	0.23	10	15	26
K13(Pennzoil)	41 3.07 25	Gono	+0.25	0.45	15	28	13
		Nedwam	+0.13	0.43	14	26	15
Auk/Ekofisk	41 4.24 80	Gono	+0.17	0.82	19	23	18
		Nedwam	-0.19	0.88	21	21	20

N = aantal meetpunten

$\bar{H}_s$  = gemiddelde gemeten golfhoogte

D = diepte

Bias =  $\frac{1}{N} \sum_i (\tilde{x}_i - x_i)$ , met  $\tilde{x}_i$  de modelhoogte in punt i en  $x_i$  de gemeten hoogte in punt i

$\sigma = \left[ \frac{1}{N} \sum_i [\tilde{x}_i - x_i - \overline{(\tilde{x}_i - x_i)}]^2 \right]^{1/2}$

Scatterindex =  $100 \sigma / \bar{H}_s$

Tabel III Statistische gegevens van de verwachtingen van Gono en Nedwam voor de stormperiode

## 5. Conclusie

In de afgelopen maanden is het NEDWAM-model geïmplementeerd en getest. Uit de resultaten kan men concluderen, dat het een goed werkend systeem is. Ondanks de numerieke en fysische complexiteit van het model is de rekentijd acceptabel.

In het oorspronkelijke WAM-model was het noodzakelijk om het rooster te verdelen in blokken, omdat het geheugengebruik van de opslag van het spectrum voor álle punten van het rooster te groot zou zijn. Het NEDWAM-model werkt op een kleiner rooster, zodat deze blokstructuur weggelaten kon worden, waardoor de programmastructuur een stuk eenvoudiger is.

De tests hebben uitgewezen, dat de fysische kwaliteit van de resultaten goed is. Het model dient nu in meer situaties getest te worden, waarbij overwogen kan worden of het zin heeft om de brontermen nog verder te verfijnen.

## Referenties

- Berg, J.I. van den (1986). Numerieke randvoorwaarden met minimale reflectie voor modellen op een eindig domein, KNMI Wetenschappelijk Rapport, WR 86-3.
- Gier, R. de en H. Oude Groen (1984). GONO, een golfverwachtingssysteem. AIV-documentatie no. 12, (KNMI). (Unpublished manuscript)
- Groen, P. en R. Dorrestein (1976). Zeegolven. Opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied (KNMI publ. 111); no. 11, (3e druk).
- Günther, H., W. Rosenthal, T.J. Weare, D.A. Worthington, K. Hasselmann and J.A. Ewing (1979). A hybrid parametrical wave prediction model, Journal of geophysical research, Vol. 84, no. C9; p. 5727-5737.
- Janssen, P.A.E.M., G.J. Komen and W.J.P. de Voogt (1984). An operational coupled hybrid wave prediction model, Journal of geophysical research, Vol. 89, no. C3; p. 3635-3654.
- Komen, G.J. (1987). Report by G.J. Komen on his work at ECMWF in february 1987, Memorandum KNMI, 00-87-06 (unpublished manuscript).
- SWAMP group, J.H. Allender, T.P. Barnett, L. Bertotti, J. Bruinsma, V.J. Cardone, L. Cavaleri, J.J. Ephraums, B. Golding, A. Greenwood, J. Guddal, H. Günther, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P. Joseph, S. Kawai, G.J. Komen, L. Lawson, H. Linne, R.B. Long, M. Lybanon, E. Maeland, W. Rosenthal, Y. Toba, T. Uji and W.J.P. de Voogt (1985). Ocean wave modelling, Plenum Press, New York.
- SWIM group, E. Bouws, J.J. Ephraums, J.A. Ewing, P.E. Francis, H. Günther, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, W. Rosenthal and W.J.P. de Voogt (1985). A shallow water intercomparison of three numerical wave prediction models (SWIM), Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 111; p. 1087-1112.

W.J.P. de Voogt, (1981). Spherical earth effects in GONO, Memo Waterloopkundig Laboratorium "De Voogt", Afd. Mar. Konstrukties, 29-1-1981. (Unpublished manuscript).

WAM-Development and Implementation Group, E. Bauer, L. Bertotti, V.C. Cardone, J.A. Ewing, J.A. Greenwood, A. Guillaume, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, P. Lionello, M. Reistad and L. Zambresky (1987). The WAM model, a third generation ocean wave prediction model. (To be published).

## Appendix 1: Optimalisatie

Bij een verwachtingsmodel is het van belang, dat de te gebruiken computertijd zo laag mogelijk gehouden wordt. Het zou geen zin hebben om een verwachting over 48 uur te maken met een model dat daar 50 uur over doet. Om dit te bereiken en vanwege het zeer grote geheugen-gebruik is het noodzakelijk het model te draaien op een zogenaamde supercomputer of vectorcomputer. Ten tijde van het testen werd gebruik gemaakt van een Cray XMP/48 van het ECMWF (European Centre of Medium Range Weather Forecasts), momenteel wordt het model geïmplementeerd op de Convex C1, die sinds kort op het KNMI staat. De grootste tijdwinst is gemaakt door het programma zoveel mogelijk vectoriseerbaar te maken. Ook is het gunstiger om meerdere korte lops te gebruiken i.p.v. één hele lange. Een goed voorbeeld hiervan is te vinden op de volgende bladzijde. Door een, relatief, simpele omzetting werd de rekentijd voor deze subroutine teruggebracht tot  $\pm 1/7$  van de oorspronkelijke tijd.

```

C* 1. ADDING INPUT SOURCE TERM TO NET SOURCE FUNCTION.
C -----
C
1000 CONTINUE
C
DO 1001 K=1,KL
TKD=(K-1)*DELTH
DO 1002 M=1,ML1
CM=C(M)
FAC=FOM(M)
DO 1003 IJ=1,IOTOT
L=ICE(IJ)
CK=FAK(IJ,M)*CM
FA=F(L,M,K)
UFAC1=CK*WS1(IJ)*COS(TKD-WS2(IJ))-1.
UFAC1=AMAX1(UFAC1,0.)
UFAC1=FAC*UFAC1
UFAC2=CK*USTAR(IJ)*COS(TKD-THW(IJ))-1.
UFAC2=AMAX1(UFAC2,0.)
UFAC2=FAC*UFAC2
SL(IJ,M,K)=SL(IJ,M,K)+(UFAC1+UFAC2)*FA*0.5
C
C ADDING DIAGONAL MATRIX REPRESENTING FUNCTIONAL DERIVATIVE OF
C INPUT TO NET FUNCTIONAL DERIVATIVE.
C
FL(IJ,M,K)=FL(IJ,M,K)+UFAC2
1003 CONTINUE
1002 CONTINUE
1001 CONTINUE
C
RETURN
END
C

```

### De subroutine vóór optimalisatie.

```

DIMENSION TEMP1(IOTOT),TEMP2(IOTOT),UFAC1(IOTOT),UFAC2(IOTOT)
C -----
C* 1. ADDING INPUT SOURCE TERM TO NET SOURCE FUNCTION.
C -----
C
1000 CONTINUE
C
DO 1001 K=1,KL
TKD=(K-1)*DELTH
DO 1002 IJ=1,IOTOT
TEMP1(IJ)=WS1(IJ)*COS(TKD-WS2(IJ))
TEMP2(IJ)=USTAR(IJ)*COS(TKD-THW(IJ))
1002 CONTINUE
DO 1003 M=1,ML1
CM=C(M)
FAC=FOM(M)
CONST=0.5*FAC
DO 1004 IJ=1,IOTOT
CK1=FAK(IJ,M)*CM*TEMP1(IJ)-1.
CK2=FAK(IJ,M)*CM*TEMP2(IJ)-1.
UFAC1(IJ)=0.5*(ABS(CK1)+CK1)
UFAC2(IJ)=0.5*(ABS(CK1)+CK1)
1004 CONTINUE
DO 1005 IJ=1,IOTOT
L=ICE(IJ)
SL(IJ,M,K)=SL(IJ,M,K)+CONST*(UFAC1(IJ)+UFAC2(IJ))*
1 F2(L,M,K)
C
C* ADDING DIAGONAL MATRIX REPRESENTING FUNCTIONAL DERIVATIVE
C* OF INPUT TO NET FUNCTIONAL DERIVATIVE.
C
FL(IJ,M,K)=FL(IJ,M,K)+FAC*UFAC2(IJ)
1005 CONTINUE
1003 CONTINUE
1001 CONTINUE

```

### De subroutine ná optimalisatie.