

Een tweeparameter golfvoorspellings-
model.

H.E. Klatter.

Technische Hogeschool Delft,
Afdeling Civiele Techniek,
Vakgroep Vloeistofmechanica.

R/1983/5/H

Een tweeparameter golfvoorspellingsmodel.

Vakgroep Vloeistofmechanica
Hoofdontwerp afstudeerprojekt

Student: H.E. Klatter
Afstudeerdocent: prof. dr. ir. J.A. Battjes
Begeleider: dr. ir. L.H. Holthuijsen

Juni 1983

Inhoud

| | | |
|-------|--|--------|
| 1 | Inleiding | pag. 4 |
| 2 | Vooronderzoek | 8 |
| 2.1 | Inleiding | 8 |
| 2.2 | De statistische beschrijving van windgolven | 8 |
| 2.3 | Golfvoorspelling | 10 |
| 2.3.1 | Methoden voor standaard windveld | 11 |
| 2.3.2 | Methoden voor variabel windveld | 16 |
| 3 | Afleiding van de vergelijkingen voor een twee-parameter zeegangsvoorspellingsmodel | 21 |
| 3.1 | Inleiding | 21 |
| 3.2 | De karakteristiekenmethode | 23 |
| 3.2.1 | Berekening van een karakteristiek | 23 |
| 3.2.2 | Afleiding van differentiaalvergelijkingen voor de golfparameters | 24 |
| 4 | Beschrijving van het numerieke model | 32 |
| 4.1 | Inleiding | 32 |
| 4.2 | Hoofddlijnen van het model | 32 |
| 5 | Resultaten | 36 |
| 5.1 | Inleiding | 36 |
| 5.2 | Modelconstanten | 37 |
| 5.3 | Testgevallen | 39 |
| 5.3.1 | Standaard windveld (Test 1) | 41 |
| 5.3.2 | Windrichting onder een hoek van 45° met de kust (Test 2) | 50 |
| 5.3.3 | 90° draaiing van de wind (Test 3) | 54 |
| 5.3.4 | Diagonaal front (Test 4) | 58 |
| 5.3.5 | Stationaire orkaan (Test 5) | 71 |
| 5.3.6 | Roterend windveld (Test 6) | 76 |
| 6 | Samenvatting conclusies en voorstellen tot nader onderzoek | 78 |

Inhoud (vervolg)

| | |
|--|---------|
| Literatuur | pag. 81 |
| Bijlage I Afleiding van vergelijkingen voor de berekening van $ \hat{E}c_g $ uit \tilde{E} | 82 |
| Bijlage II Rekenmodel voor de ontwikkeling van het golfveld gebaseerd op aannamen over de ontwikkeling van het spectrum | 85 |
| Bijlage III Het numerieke model | 91 |
| III.1 Hoofdpijnen van het model | 91 |
| III.2 Invoer, uitvoer en COMMON parame- ters | 94 |
| III.3 De subroutines | 95 |
| III.3.1 Subroutine NEWPT | 95 |
| III.3.2 Subroutine GROKO | 98 |
| III.3.3 Subroutine START | 103 |
| III.3.4 Subroutine VAK | 106 |
| III.3.5 Subroutine VAKPAR | 108 |
| III.3.6 Subroutine VAKMID | 110 |
| III.3.7 Subroutine AVVEC | 113 |
| III.3.8 De funktie ATANH | 113 |
| III.3.9 Subroutine ANG | 113 |
| Bijlage IV Windveld orkaan | 114 |
| Bijlage V Programmaling | 116 |

1. Inleiding.

In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van een experimenteel voorspellingsmodel voor de ontwikkeling van een golfveld onder invloed van de wind; een zeegangsvoorspellingsmodel. De daarbij gevolgde benadering wordt in dit inleidende hoofdstuk beknopt weergegeven.

Het golfveld kan opgebouwd worden gedacht uit een groot, in principe oneindig, aantal golfcomponenten, ieder met een eigen frequentie en richting. Het golfveld kan worden beschreven door het spectrum. Dit spectrum geeft aan, hoe de energie van het golfveld over de golfcomponenten verdeeld is. Nu blijkt dat de golfcomponenten, van een golfveld dat wordt beïnvloed door de wind zich niet onafhankelijk van elkaar zullen ontwikkelen. Tussen de golfcomponenten onderling vindt in zo'n geval uitwisseling van energie plaats. Een gevolg van deze wisselwerkingen is dat het spectrum, dat het golfveld beschrijft, een standaardvorm aanneemt met een beperkt aantal vrijheidsgraden.

Van het bestaan van een standaard spectrumvorm voor zeegang zal gebruik worden gemaakt van het voorspellingsmodel. In plaats dat het nodig is de ontwikkeling van ieder van een groot aantal golfcomponenten te berekenen, is het voldoende alleen de parameters van het spectrum te berekenen. Een voordeel van een parametrische beschrijving van zeegang (in het model) in plaats van een discrete beschrijving is, dat voor het berekenen van een spectrum een veel kleiner aantal vergelijkingen moeten worden opgelost bij de parametrische beschrijving dan bij de discrete beschrijving. Dit manifesteert zich in het model in een veel geringere rekentijd voor het parametermodel, dan nodig is voor een discreet model.

De bestaande parametermodellen zijn te verdelen in één-, twee- en meer parametermodellen.

- De één parametermodellen zoals b.v. Wilson (1955) en het NORSWAM-model, geven het golfveld weer met slechts één onafhankelijke parameter. In de regel is dat de significante golfhoogte of de geïntegreerde energie van het spectrum. De voortplantingsrichting van het zeegangsveld wordt gelijk gesteld aan de

lokale windrichting.

- De twee parametermodellen zoals b.v. GONO-model Sanders (1976), voorspellen zowel de energie van het spectrum als de voortplantingsrichting van het golfveld, θ_0 . Bij het GONO-model volgt θ_0 echter impliciet uit een soort algoritme en wordt niet als een echte onafhankelijke parameter behandeld.
- Bij meer parametermodellen als b.v. het HYPA-model wordt het spectrum weergegeven door de vijf parameters van het JONSWAP spectrum (zie par.2.3.1) en de voortplantingsrichting van het golfveld.

Bij het in dit rapport beschreven golfvoorspellingsmodel wordt het golfveld beschreven door een spectrum met twee onafhankelijke parameters; de geïntegreerde energie van het golfveld, E , en de voortplantingsrichting van het golfveld, θ_0 . Het model is derhalve een tweeparametermodel zoals het GONO-model. Het verschil met het GONO-model is dat θ_0 expliciet als een onafhankelijke parameter behandeld wordt. Er zullen differentiaal vergelijkingen voor de parameters worden afgeleid, met gebruikmaking van z.g.n. groeikrommen. Zo'n groeikromme beschrijft de ontwikkeling van een golfveld in een standaardwindveld. (zie par.2.3.1) De differentiaal vergelijkingen worden opgelost door integratie langs karakteristieken. Zo'n karakteristiek is te zien als de baan, die het golfveld over het oppervlak beschrijft. Het golfveld wordt daarbij gezien als een golftrein met beperkte afmetingen, die zich over het oppervlak verplaatst. De parametrische beschrijving van het golfveld is alleen toepasbaar in geval van zeegang, omdat in geval van deining door het wegvallen van de invloed van de wind de wisselwerkingen zo zwak worden, dat de golfcomponenten zich dan onafhankelijk van elkaar over het oppervlak gaan voortplanten. Een beschrijving van het golfveld met een standaard spectrum is dan niet meer mogelijk. Een parametermodel zal naast een (parametrisch) zeegangsdeel een apart (discreet) deiningsdeel moeten bevatten. Deze uitbreiding tot een hybried model wordt in dit rapport achterwege gelaten. Het model is derhalve alleen geschikt voor situaties met voornamelijk zeegang.

Het modelleren van de overgang van zeegang naar deining en van het weer opnemen van deining in de zeegang is overigens een

probleem bij parametermodellen in het algemeen. Discrete modellen bieden voor de beschrijving hiervan meer mogelijkheden, omdat een meer geleidelijke overgang van sterke wisselwerkingen naar nagenoeg geen wisselwerkingen mogelijk is, dan bij de hybride parametermodellen. Het nauwkeuriger beschrijven van de overgang zeegang - deining zal afgewogen moeten worden tegen de meer gecompliceerde berekeningen en de daarmee verband houdende extra rekentijd.

In gevallen met voornamelijk zeegang biedt de parametrische beschrijving veel voordelen.

Het experimentele karakter van het model uit zich vooral hierin, dat in het numerieke model geen uitgebreide inlees, uitvoer en controle procedures standaard zijn ingebouwd. Het numerieke model heeft dan ook in de eerste plaats tot doel na te gaan in hoeverre de in dit rapport gevolgde benadering perspectieven biedt.

Tenslotte wordt er op gewezen dat het model zich beperkt tot gevallen, waarbij de waterdiepte zo groot is, dat die niet van belang is; de z.g.n. diepwaterbenadering.

Het rapport is als volgt ingedeeld:

Hoofdstuk 2 geeft een inleiding in de spectrale beschrijving van windgolven. Vervolgens wordt nader ingegaan op de ontwikkeling van een golfveld onder invloed van een windveld.

In hoofdstuk 3 wordt een afleiding van de differentiaalvergelijkingen voor de golfparameters en van de berekeningswijze van de karakteristieken, waarlangs de differentiaalvergelijkingen geïntegreerd worden, gegeven.

Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van het numerieke zeegangsvoorspellingsmodel, dat gebaseerd is op de in hoofdstuk 3 afgeleide vergelijkingen.

In hoofdstuk 5 worden een aantal testgevallen besproken, die een indruk geven van het gedrag van het model. Daarbij wordt

gebruik gemaakt van de resultaten van een recente studie, waarin het gedrag van een aantal golfvoorspellingsmodellen vergeleken wordt (de z.g.n SWAMP-studie).

In hoofdstuk 6 volgen de conclusies.

2. Vooronderzoek.

2.1 Inleiding.

Dit hoofdstuk is bedoeld als aanzet tot de beschrijving van een zeegangsvoorspellingsmodel. Daartoe zal, na een korte inleiding in de statistische beschrijving van windgolven. (par.2.2), wat nader worden ingegaan op de bestaande golfvoorspellingsmethoden (par.2.3). Het is daarbij geenszins de bedoeling volledigheid na te streven; het is slechts de bedoeling, die elementen op te pikken, die nodig zijn voor het in dit rapport behandelde model. Een beperking die daarbij in het algemeen wordt aangehouden is, dat de waterdiepte zo groot is, dat deze voor het golfbeeld niet meer van belang is; de z.g.n. diepwaterbenadering.

2.2 De statistische beschrijving van windgolven.

Een golfveld dat opgewekt wordt door de wind, wordt in statistische zin goed beschreven door het variantiedichtheidsspectrum. Dit spectrum geeft aan, hoe de variantie verdeeld is over de frequenties en de richtingen. Het golfbeeld kan dan gezien worden als een superpositie van een groot, in principe oneindig, aantal sinusvormige componenten, ieder met een eigen frequentie en richting. Het variantiedichtheidsspectrum geeft zodoende informatie over de variantie van de verschillende componenten en aanzien de variantie van zo'n component op een fysische konstante na gelijk is aan de energie van die component, kan het variantiedichtheidsspectrum gezien worden als de verdeling van de energie over de verschillende frequenties en richtingen. Het is daarom gebruikelijk om dit spectrum het energiedichtheidsspectrum te noemen. Deze gewoonte wordt in het vervolg aangehouden. De gebruikte notatie is als volgt: energiedichtheid: E

frequentie: f

richting: θ

De hoeveelheid energie die door de componenten met frequenties tussen f_1 en f_2 en richtingen tussen θ_1 en θ_2 wordt bijgedragen aan het totaal is:

$$\int_{f_1}^{f_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} E(f, \theta) df d\theta$$

(2.2.1)

De totale energie is:

$$\int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} E(f, \theta) df d\theta \quad (2.2.2)$$

Het is gebruikelijk het tweedimensionale spectrum $E(f, \theta)$ te splitsen in een één dimensionaal frequentiespectrum $E(f)$ en een richtingsverdelingsfunctie $D_f(\theta)$.

$$E(f, \theta) = E(f) \times D_f(\theta) \quad (2.2.3)$$

Het frequentiespectrum wordt berekend door het tweedimensionale spectrum te integreren over de richtingen:

$$E(f) = \int_{-\pi}^{+\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (2.2.4)$$

De richtingsverdelingsfunctie volgt uit :

$$D_f(\theta) = \frac{E(f, \theta)}{E(f)} \quad (2.2.5)$$

Uit deze definitie volgt:

$$\int_{-\pi}^{+\pi} D_f(\theta) d\theta = 1 \quad (2.2.6)$$

Voorzover het spectrum het golfbeeld in statistische zin volledig beschrijft, is het in principe mogelijk, om overige statistische eigenschappen van het golfbeeld te berekenen. Veel gebruikte eigenschappen zijn het gemiddelde van de hoogste één-derde deel van de golfhoogten, $H^1/3$, meestal significante golfhoogte H_s genoemd en de gemiddelde nuldoorgangsperiode.

\bar{T}_0 . (Onder golfhoogte wordt verstaan, het maximale verschil in uitwijking van het wateroppervlak tussen twee opwaartse door-
gangen van de gemiddelde waterstand.)

H_s en \bar{T}_0 zijn te schatten met behulp van het nulde moment van het frequentiespectrum:

$$H_s \approx H_{m_0} = 4 \sqrt{m_0} \quad (2.2.7)$$

$$\bar{T}_0 \approx \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.2.8)$$

$$\text{waarin } m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \quad (2.2.9)$$

2.3 Golfvoorspelling.

In de vorige paragraaf is aangegeven hoe het golfbeeld beschreven kan worden door het spectrum. In deze paragraaf wordt beschreven hoe het golfbeeld zich ontwikkelt onder invloed van de wind.

De ontwikkeling van betrouwbare methoden voor golfvoorspelling is eigenlijk pas goed opgang gekomen in de tweede-wereldoorlog, toen men pogingen in het werk stelde, om golfverwachtingen op te stellen voor de geallieerde landingen. Aanvankelijk beperkten deze methoden zich tot het voorspellen van parameters als kenmerkende golfhoogte en kenmerkende golfperiode, als functie van enkele parameters van een stationair homogeen windveld, gebaseerd op empirische relaties. Een aantal jaren later, toen de spectrale analyse van windgolven haar intrede deed werden technieken ontwikkeld, om het energiedichtheidspectrum te voorspellen als functie van de windveldparameters.

Zo'n stationair homogeen windveld is een weinig realistische beschrijving van de werkelijke situatie op zee en zodoende vormt dit ook een beperking voor de daarop gebaseerde methoden voor golfvoorspelling.

In de jaren '50 ontstond het idee, de voorspelling per spectrale komponent afzonderlijk uit te voeren. Iedere komponent, die zich over het wateroppervlak beweegt, wordt gevolgd en tijdens het volgen wordt de energiedichtheid van die komponent berekend. Dit gebeurt door de balans bij te houden van de energie, die zo'n komponent ontvangt, b.v. van de wind, en afstaat, b.v. door dissipatie. In principe is het mogelijk op deze wijze de energiedichtheid van elke komponent te berekenen, in situaties waarin het windveld zowel in de tijd, als in de ruimte varieert.

In het navolgende wordt nader ingegaan op de bestaande methoden voor golfvoorspelling. Daarbij wordt eerst aandacht besteed

aan de methoden voor een stationair homogeen windveld, vervolgens aan de methoden voor een variabel windveld. Daarbij komen vooral die methoden aan de orde, die van direkt belang zijn voor het in dit rapport behandelde model. Een meer volledig overzicht van de beschikbare methoden wordt gegeven door Holthuijsen, 1980.

2.3.1 Methoden voor standaard windveld.

Voordat de methoden voor het standaard windveld besproken worden wordt eerst de in dit rapport gebruikte definitie van de windsnelheid gegeven. De windsnelheid, u , wordt gedefinieerd als het tijdsgemiddelde van de windsnelheid op een vaste hoogte van 10 meter boven het zeeoppervlak. ($u = u_{10}$)

Het standaard windveld wordt als volgt gedefinieerd: verondersteld wordt, dat het windveld een bovenwindse begrenzing kent, bestaande uit een rechte lijn loodrecht op de windrichting. De breedte van het windveld is zo groot, dat deze als oneindig kan worden beschouwd. Verondersteld wordt, dat de wind op het tijdstip $t = 0$ begint te waaien met konstante snelheid u . De kenmerkende parameters, die nodig zijn voor plaats en tijdstip in zo'n windveld, zijn de afstand tot de bovenwindse begrenzing, de strijklengte F , en de tijd die verstreken is sinds de aanvang van de wind, de windduur t .

In een dergelijk windveld zullen de waarden van de golfparameters afhankelijk zijn van de parameters u , F en t , van de zwaartekrachtversnelling g en in zekere mate van andere parameters als de viscositeit van water en lucht. Verwaarloost men de invloeden van deze laatste grootheden, dan resteren u, F, t en g . Deze vier kunnen samengesteld worden tot twee dimensieloze parameters:

$$\begin{array}{ll} \text{dimensieloze} & \tilde{F} = g \frac{F}{u^2} \\ \text{strijklengte} & \end{array} \quad (2.3.1)$$

$$\begin{array}{ll} \text{dimensieloze} & \tilde{t} = g \frac{t}{u} \\ \text{windduur} & \end{array} \quad (2.3.2)$$

De golfveldparameters, zoals de significante golfhoogte H_s en de gemiddelde nuldoorgangs periode \bar{T}_0 , zullen afhankelijk zijn van de parameters F, t, u en g . De golfparameters H_s en \bar{T}_0 kunnen ook dimensieloos gemaakt worden met behulp van u en g . De dimensieloze golfhoogte \tilde{H} en -golfperiode \tilde{T} worden gedefinieerd als:

$$\tilde{H} = \frac{g H}{u^2} \quad (\text{waarbij } H \text{ overeenkomt met } H_s) \quad (2.3.3)$$

$$\tilde{T} = \frac{g T}{u} \quad (\text{waarbij } T \text{ overeenkomt met } \bar{T}_0) \quad (2.3.4)$$

In deze vorm zijn \tilde{H} en \tilde{T} functies van \tilde{F} en \tilde{t} .

De strijklengte en de windduur kunnen in elkaar worden uitgedrukt m.b.v. een transformatieregel, die gebaseerd is op de veronderstelling, dat een golfbeeld, dat opgewekt is na een bepaalde tijdsduur t en onbeperkte strijklengte, gelijk is aan het golfbeeld, dat opgewekt is na een zekere strijklengte bij onbeperkte windduur. Als het golfveld beschouwd wordt als een groot aantal onafhankelijke componenten, dan is voor iedere komponent het verband tussen strijklengte en windduur te berekenen met de groepssnelheid, c_g , van die komponent. Deze relatie wordt weergegeven door vgl. (2.3.5) en (2.3.6)

$$F_{eq} = c_g t \cos \theta \quad (2.3.5)$$

$$t_{eq} = \frac{F}{c_g \cos \theta} \quad (2.3.6)$$

hierin is θ de hoek tussen windrichting en voortplantingsrichting van de golfkomponent.

Als het golfbeeld gekarakteriseerd wordt door het spectrum, kan de komponent met de piekfrequentie f_m beschouwd worden als de drager van de totale energie van het spectrum (zie blz 19 e.v). Omdat de piekfrequentie niet konstant is, zal ook de groepssnelheid variëren met de strijklengte of de windduur. De equivalentie wordt weergegeven als in onderstaande vergelijkingen:

$$F_{eq} = \int_0^t c_g dt \quad (2.3.7)$$

$$t_{eq} = \int_0^F (c_g)^{-1} dF \quad (2.3.8)$$

De dimensieloze relatie, die bestaat tussen de golfparameters \tilde{H} of \tilde{T} , en de windveldparameter \tilde{F} , beschrijft de ontwikkeling, "groei", van de golfparameters, onder invloed van de wind, in een standaard windveld. Deze kan worden weergegeven met een z.g. groeikromme. Zulke groeikrommen zijn bepaald door waarnemingen van H en T uit te zetten tegen F en door een lijn te trekken door zo'n verzameling waarnemingen. Deze lijnen zijn meestal gebaseerd op de volgende analytische uitdrukkingen:

$$\tilde{H} = \tilde{H}_\infty \times \tanh(k_1 \tilde{F}^{m_1}) \quad (2.3.9)$$

$$\tilde{T} = \tilde{T}_\infty \times \tanh(k_2 \tilde{F}^{m_2}) \quad (2.3.10)$$

Holthuijsen (1980) heeft een aantal van deze groeikrommen vergeleken met uit de literatuur verzamelde waarnemingen. Van deze resultaten zal verderop in dit rapport gebruik gemaakt worden (par. 5.2).

Standardspectrum.

In het standaard windveld zullen zowel $E(f)$ als $D_f(\theta)$ een standaardvorm aannemen. Eerst zal het standaardfrequentiespectrum worden besproken.

Standaard frequentiespectrum.

Een uitgebreid onderzoek naar o.a. de spectrumvorm in het standaard windveld is het JONSWAP-project; Hasselmann e.a. (1973). Hasselmann e.a. vonden als standaardvorm voor het frequentiespectrum de naar dit onderzoekproject genoemde JONSWAP vorm. Een uitdrukking hiervoor wordt gegeven door de volgende vergelijkingen:

$$E(f) = \gamma(f) \propto g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \times \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right)$$

met $\gamma(f) = \gamma_0 \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{f-f_m}{\sigma_{f_m}}\right)^2\right)$ (2.3.11)

hierin is $\sigma = \sigma_a$ als $f < f_m$
 $\sigma = \sigma_b$ als $f \geq f_m$

Het JONSWAP spectrum heeft vijf parameters. Een dimensieloze schaalparameter voor de energie, α , de piekfrequentie f_m als parameter voor de frequentie en drie vormparameters, γ_0 , σ_a en σ_b , die de scherpte van de piek bepalen.

Als de strijklengte en de windduur naar oneindig naderen, $F \rightarrow \infty$ en $t \rightarrow \infty$, dan zal een situatie ontstaan waarbij de parameters van het golfveld een limietwaarde bereiken. Het golfveld wordt in deze situatie volgroeid genoemd. De enige windveldparameter die dan nog van belang is, is de windsnelheid, u . Het frequentiespectrum wordt in de volgroeide situatie weergegeven door het Pierson-Moskowitz spectrum:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right) \quad (2.3.12)$$

Het JONSWAP spectrum reduceert tot het P-M spectrum als $\gamma(f)$ in vgl. (2.3.11) gelijk aan één is. De dimensieloze piekfrequentie $\tilde{f}_m = \frac{f_m u}{g}$ en α zijn constanten bij het P-M spectrum, zodat het spectrum volledig bepaald is door de windsnelheid, u .

Als $u = u_{10}$ dan is:

$$\tilde{f}_m = 0.13$$

$$\alpha = 0.0081$$

De geïntegreerde energie van het P-M spectrum is:

$$E = m_0 = \int_0^\infty E(f) df = \frac{(2\pi)^{-4}}{5} \alpha g^2 f_m^{-4} \quad (2.3.13)$$

Invullen van de waarden voor α en \tilde{f}_m en met gebruik van vgl. (2.2.7) geeft:

$$H_s \approx H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} = 0.24 \frac{u^2}{g} \quad (2.3.14)$$

Vgl. (2.3.14) legt een relatie met de parameter \tilde{H}_∞ uit de groeikromme, vgl. (2.3.9):

$$\tilde{H}_\infty (\text{PM spectrum}) = 0.24 \quad (2.3.15)$$

Zolang het golfveld nog niet volgroeid is, zullen de parameters van het golfveld behalve van u , ook afhangen van de strijklengte, F , en de windduur, t . Uit onderzoek van Mitsuyasu e.a. (1980) naar het verband tussen de parameters van het JONSWAP spectrum en de strijklengte volgen de volgende relaties:

$$\alpha = 8.17 \times 10^{-2} \tilde{F}^{-2/7} \quad (2.3.16)$$

$$\tilde{f}_m = 2.92 \tilde{F}^{-1/3} \quad (2.3.17)$$

$$\gamma_0 = 7.0 \tilde{F}^{-1/7} \quad (2.3.18)$$

$$\tilde{E} = 2.75 \times 10^{-7} \tilde{F} \quad (2.3.19)$$

$$\text{hierin is: } \tilde{E} = \frac{g^2 E}{u^4} \quad (2.3.20)$$

σ_a en σ_b hebben gemiddelde waarden:

$$\sigma_a = 0.07, \quad \sigma_b = 0.09 \quad (2.3.21)$$

De geïntegreerde energie van het spectrum, E , zal afhankelijk zijn van de parameters. Mitsuyasu e.a. gebruikten hiervoor de volgende uitdrukking:

$$E = (2\pi)^{-4} \alpha^2 g^2 f_m^{-4} / A(\gamma_0, \sigma) \quad (2.3.22)$$

Als $\sigma_a = 0.07$ en $\sigma_b = 0.09$ wordt $A(\gamma_0, \sigma)$ benaderd door

$$A(\gamma_0) = 5 \gamma_0^{-1/3} \text{ als } 1 \leq \gamma_0 < 4$$

Met gebruik van de relatie (2.3.22) zijn de uit waarnemingen bepaalde relaties (2.3.16) t/m (2.3.19) en (2.3.21) goed met elkaar in overeenstemming.

De richtingsverdelingsfunctie.

Als standaard richtingsverdelingsfunctie voldoet voor een eenvoudig parametermodel, zoals beschreven in dit rapport, de z.g.n. \cos^2 -verdeling goed. De \cos^2 -verdeling wordt door slechts

één parameter bepaald; de gemiddelde richting, θ_0 . In principe kan θ_0 met f variëren, maar voor het model wordt θ_0 voor alle frequenties gelijk genomen:

$$D(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 (\theta_0 - \theta) \text{ als } |\theta_0 - \theta| < \frac{\pi}{2}; D(\theta) = 0 \text{ als } |\theta_0 - \theta| \geq \frac{\pi}{2} \quad (2.3.23)$$

2.3.2 Methoden voor variabel windveld.

In werkelijkheid is de toepasbaarheid van de golfvoorspellingsmethoden voor een standaard windveld vrij beperkt, omdat het standaard windveld de werkelijkheid erg sterk schematiseert. In de natuur zal een windveld zowel in de ruimte als in de tijd variëren en tevens zal de begrenzing meestal onregelmatig zijn. In het navolgende worden een aantal golfvoorspellingsmethoden voor een variabel windveld besproken, die van belang zijn voor het in dit rapport behandelde model.

Een methode die gebruik maakt van de groeikromme uit het standaard windveld is de zogenaamde karakteristiekenmethode, oorspronkelijk geïntroduceerd door Wilson (Wilson 1955). Bij deze methode stelde Wilson het lokale golfbeeld voor als een golf-trein, van beperkte horizontale afmeting (klein t.o.v. variaties in in het wind- en golfveld), die gekarakteriseerd wordt door een significante golfhoogte, H , een periode, T , en een hoofdrichting. De weg, die de golf-trein aflegt over het wateroppervlak, wordt berekend, door de voortplantingssnelheid van de golf-trein te integreren. Deze is gelijk aan de groepssnelheid, die hoort bij de significante golfperiode van de golf-trein. De richting wordt daarbij gelijk gesteld aan de lokale windrichting. Om deze groepssnelheid te berekenen, wordt gebruik gemaakt van een groeikromme van \tilde{T} (dimensieloos) als functie van \tilde{F} (dimensieloze strijklengte). Uit deze groeikromme kan ook de verandering van \tilde{T} bij een gegeven verandering $\Delta \tilde{F}$ worden bepaald voor iedere willekeurige waarde van \tilde{T} , of in termen van een differentiaal vergelijking:

$$\frac{d \tilde{T}}{d \tilde{F}} = f_1(\tilde{T}) \quad (2.3.24)$$

Voor de zich voortbewegende golftrein is de strijklengte \tilde{F} niet meer gedefinieerd zoals bij de beschrijving van het standaard windveld (zie par.2.3.1), maar \tilde{F} is hier een hulpgrootte bij het integreren van de groeikromme. Met behulp van de karakteristieke methode is vgl. (2.3.24) op te lossen, zodat de weg die de golftrein aflegt kan worden berekend voor een in ruimte en tijd variërend windveld. Eenzelfde soort differentiaalvergelijking als (2.3.24) kan worden opgesteld voor de golfhoogte:

$$\frac{d \tilde{H}}{d \tilde{F}} f_2(\tilde{H}) \quad (2.3.25)$$

Deze vergelijking is eenvoudig op te lossen, als de weg van de golftrein bekend is.

Discrete modellen.

Een volledige beschrijving van het golfbeeld wordt verkregen door het tweedimensionale energiedichtheidsspectrum:

$$E(f, \theta)$$

te laten variëren in ruimte (\vec{x}) en tijd (t). De ontwikkeling van het spectrum onder invloed van de wind is te berekenen, door de energiebalans van een groot aantal spectrale componenten bij te houden. De energiebalans vergelijking voor één component wordt in een assenstelsel dat meebeweegt met de groepsnelheid van en in de richting van die component, weergegeven door:

$$\frac{d E(f, \theta; \vec{x}, t)}{dt} = S(f, \theta; \vec{x}, t) \quad (2.3.26)$$

$$\text{voor } \frac{d \vec{x}}{dt} = \vec{c}_g(f, \theta; \vec{x}, t)$$

De functie $S(f, \theta; \vec{x}, t)$ wordt de bronfunctie genoemd. De bronfunctie bestaat uit drie termen, die ieder een bepaald energie uitwisselings proces beschrijven. Met weglating van de variabelen:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.3.27)$$

hierin is S_{in} : energie overdracht van het windveld naar het golfveld.

S_{ds} : dissipatie.

S_{nl} : niet lineaire wisselwerkingen.

In het navolgende worden de termen S_{in} , S_{ds} en S_{nl} ieder afzonderlijk besproken.

Energie overdracht van wind naar golven, S_{in}

Momenteel (1983) lijkt de energie overdracht van wind naar golven vrij goed te beschrijven door een gecombineerde lineaire en exponentiële groei van de golfcomponenten:

$$S_{in} = \alpha + \beta E \quad (2.3.28)$$

Deze uitdrukking voor S_{in} is gebaseerd op een combinatie van de theoriën van Phillips (lineaire groei) en Miles (exponentiële groei), die beide reeds uit 1957 dateren. Over de juistheid van deze theoriën is echter momenteel (1983) een voortdurende discussie gaande.

Energie dissipatie, S_{ds} .

Omdat we ons hier beperken tot de diepwater benadering, zal dissipatie voornamelijk bestaan uit turbulente dissipatie bij het breken van golven. In het algemeen wordt aangenomen, dat, als gevolg van het breken van golven, de energiedichtheid een bepaalde, frequentie afhankelijke, limietwaarde heeft.

Niet lineaire wisselwerkingen, S_{nl} .

Het optreden van de wisselwerkingen heeft tot gevolg, dat er een herverdeling van energie over de verschillende spectrale componenten plaats vindt. Het effect van S_{nl} zal geïntegreerd over alle componenten derhalve steeds nul zijn:

$$\int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} S_{nl} \, d\omega d\theta = 0 \quad (2.3.29)$$

Een opvallende eigenschap van de wisselwerkingen is, dat ze

een stabiliserende invloed hebben op de vorm van het spectrum. Uit berekeningen blijkt (Hasselman e.a. 1973) dat het spectrum van groeiende zeegang een vorm aanneemt, die overeenkomt met het JONSWAP-spectrum, Hasselman wijst er daarbij op dat optreden van een scherpe piek erg kenmerkend is voor het optreden van de wisselwerkingen. Tevens hebben de wisselwerkingen tot gevolg, dat de plek van het spectrum zich bij groeiende zeegang zal verplaatsen naar lagere frequenties.

Samengevat zal het spectrum als volgt groeien onder invloed van de wind:

De wind voert energie toe aan het spectrum, vooral aan het hoogfrequentie deel. Dissipatie door golfbreken neemt toe met de frequentie, zodat dissipatie vooral van belang is voor de hoogste frequenties.

De niet-lineaire wisselwerkingen zorgen voor een herverdeling van de energie; de input van de wind komt zo deels ten goede aan de groei van het spectrum bij lagere frequenties, deels aan handhaving van de evenwichtsvorm bij de hoogste frequenties.

Parameter modellen.

Zoals uit het voorgaande blijkt, heeft het optreden van de niet-lineaire wisselwerkingen tot gevolg, dat het spectrum van groeiende zeegang een standaardvorm aanneemt, die beschreven kan worden door een beperkt aantal parameters. Dit schept de mogelijkheid om i.p.v. het berekenen van de ontwikkeling van een groot aantal spectrale componenten, die zich min of meer onafhankelijk over het wateroppervlak voortplanten, de ontwikkeling van de parameters van het standaard spectrum te berekenen. Deze aanpak geeft een vrij grote besparing aan rekentijd van de modellen. Als het spectrum wordt weergegeven door het JONSWAP spectrum, zullen voor het berekenen van één spectrum 6 vergelijkingen nodig zijn, 5 voor de parameters van het frequentiespectrum en één voor de voortplantingsrichting van het golfveld. De parametrische benadering kan nog verder vereenvoudigd worden, door het gedrag van de parameters nader te bekijken.

Mitsuyasu e.a. (1980) hebben aangetoond, dat er universele relaties bestaan tussen de parameters van het JONSWAP-spectrum

onderling. Door eliminatie van \tilde{F} uit vgl. (2.3.16) t/m (2.3.19) wordt verkregen:

$$\tilde{E} = 6.84 \times 10^{-6} \tilde{f}_m^{-3} \quad (2.3.30)$$

$$\alpha = 3.26 \times 10^{-2} \tilde{f}_m^{6/7} \quad (2.3.31)$$

$$\gamma_0 = 4.4.2 \tilde{f}_m^{3/7} \quad (2.3.32)$$

Mitsuyasu e.a toonden aan dat deze relaties ook in variabel windveld gelden. Het aantal onafhankelijke parameters van het frequentiespectrum wordt door bovenstaande relaties gereduceerd tot één, mits de windsnelheid bekend is.

3. Afleiding van de vergelijkingen voor een twee-parameter zeegangsvoorspellingsmodel.

3.1 Inleiding.

Uit het vorige hoofdstuk blijkt dat bij groeiende zeegang de niet lineaire wisselwerkingen voor een zodanige verdeling van de energie over de golfcomponenten zorgen, dat het spectrum van groeiende zeegang een standaardvorm aanneemt met een beperkt aantal vrijheidsgraden. Een goede beschrijving van het frequentiespectrum wordt in zo'n situatie gegeven door het JONSWAP-spectrum. vgl. (2.3.11), met onderlinge relaties tussen de parameters, zoals gegeven door vgl. (2.3.30 t/m 2.3.32). Het golfbeeld wordt, behalve door het frequentiespectrum, tevens gekenmerkt door een richtingsverdelingsfunctie. Als richtingsverdelingsfunctie zal een \cos^2 verdeling gebruikt worden. Deze verdeling heeft één parameter; de gemiddelde golfvoortplantingsrichting, θ_0 , vgl. (2.3.23). Bij de bovenstaande beschrijving van zeegang is het golfbeeld bij gegeven windsnelheid, u , volledig bepaald door slechts twee onafhankelijke parameters. Eén dimensioneloze parameter voor het frequentiespectrum, \tilde{E} of α of \tilde{f}_m of χ_0 , en één parameter voor de richtingsverdelingsfunctie, θ_0 . Bij het in dit rapport beschreven model worden als parameters voor het frequentiespectrum de geïntegreerde energieflex van het spectrum (die afhankelijk is van de geïntegreerde energie, E , en de piekfrequentie, f_m) gebruikt. Als parameter voor de richtingsverdelingsfunctie wordt de gemiddelde golfvoortplantingsrichting, θ_0 , gebruikt. Een voordeel van zo'n twee-parameter model is de besparing aan rekentijd, die ermee behaald wordt in vergelijking met meer geavanceerde spectrale modellen.

Voor het opzetten van een rekenmodel voor de ontwikkeling van zeegang zal worden uitgegaan van een groeikromme voor de energieflex. Deze groeikromme wordt verkregen door combinatie van een groeikromme voor \tilde{E} en de relatie tussen \tilde{E} en \tilde{f}_m vgl. (2.3.30). De groeikromme voor E wordt afgeleid uit een groeikromme voor \tilde{H} :

$$\tilde{H} = \tilde{H}_\infty \tanh (K \tilde{F}^m)$$

$$\text{hierin is } \tilde{H} = \frac{g H}{u^2}, \quad \tilde{F} = \frac{g F}{u^2} \quad (2.3.9) \quad (3.1.1)$$

De relatie tussen H en E wordt gegeven door:

$$H = 4 \sqrt{E} \quad (3.1.2)$$

(volgt uit vgl. 2.2.7)

Een voordeel van het gebruik van een groeikromme is, dat in deze vorm vrij betrouwbare empirische gegevens beschikbaar zijn. Omdat een groeikromme als vgl. (3.1.1) de ontwikkeling van zee-gang in een standaard windveld beschrijft (zie par. 2.3.1), zal de groeikromme aangepast moeten worden voor gebruik in een variabel windveld. Deze aanpassing wordt gebaseerd op de karakteristieke methode van Wilson (hfst.2 blz. 16 ev). Daarbij wordt de baan van het golfveld over het oppervlak berekend en langs deze karakteristieke kan dan in principe de groeikromme geïntegreerd worden. Deze methode wordt in de volgende paragrafen nader uitgewerkt op een manier, die een verschil tussen de gemiddelde golfvoortplantingsrichting, θ_0 , en de windrichting, θ_w , mogelijk maakt.

Omdat de parametrische beschrijving van het golfbeeld alleen toepasbaar is op zeegang, zal de hierop gebaseerde methode voor golfvoorspelling niet in staat zijn deining te beschrijven. Het model zal uitgebreid moeten worden met een apart deiningsdeel. Deze uitbreiding tot een hybried model, zal in dit rapport achterwege gelaten worden. We beperken ons tot gevallen met voornamelijk zeegang.

Tevens beperken we ons tot gevallen waarbij de waterdiepte zo groot is, dat die niet van belang is.

Samengevat:

- Het golfbeeld wordt beschreven door een standaard spectrum met twee vrije parameters:
Een parameter voor het frequentiespectrum:
- geïntegreerde energie van het golfveld, E.

Eén parameter voor de richtingsverdelingsfunctie:

- gemiddelde golfvoortplantingsrichting, θ_0 .
- Het principe voor het rekenmodel voor de ontwikkeling van zeegang is integratie van een groeikromme langs karakteristieken.
- Verschil tussen de voortplantingsrichting van het golfveld en de windrichting is mogelijk.
- Geen deïningsdeel.
- Diepwater benadering.

3.2 De karakteristieken methode.

De karakteristiekenmethode voor de berekening van de ontwikkeling van een golfveld onder invloed van een variabel windveld komt in principe neer op het volgende:

- a) De baan van het golfveld over het oppervlak wordt berekend. Het golfveld wordt daarbij beschouwd als een golftrein met beperkte afmetingen.
- b) De parameter(s) van het golfveld worden berekend door integratie van differentiaalvergelijkingen voor deze parameters langs de baan van het golfveld (langs een karakteristiek).

De berekening van de baan van het golfveld komt aan de orde in par.3.2.1. De berekening van de ontwikkeling van het golfveld langs een karakteristiek wordt in paragraaf 3.2.2 besproken.

3.2.1 Berekening van een karakteristiek.

De baan van het golfveld wordt bepaald door de voortplantings-snelheid van het golfveld, de groepssnelheid c_g , en de gemiddelde voortplantingsrichting, θ_0 . Voor het rekenmodel wordt als groeps-snelheid van het golfveld genomen de groepssnelheid behorende bij de piekfrequentie, zoals die volgt uit de lineaire theorie, vermenigvuldigd met een constante:

$$\begin{aligned} c_g &= q \times c_g(f_m) \\ &= q \times \frac{g}{4\pi f_m} \end{aligned} \tag{3.2.1}$$

q is constant.

De constante q zal kleiner zijn dan 1 omdat bij de JONSWAP- spectrumvorm het grootste deel van de energie zich bevindt bij frequenties groter dan f_m . T.g.v. de spreiding in de voortplantingsrichting zal de groepssnelheid gemiddeld over de richtingen bij een bepaalde frequentie kleiner zijn dan die een individuele komponent met die frequentie.

q zal niet berekend worden uit de spectrumvorm, maar gebruikt worden als afregelconstante voor het model. De berekening van de voortplantingsrichting van het golfveld θ_0 komt ter sprake in de volgende paragraaf.

Een kenmerkende parameter voor de ontwikkeling van het golfveld langs een karakteristiek is de strijklengte, F . De strijklengte kan in een variabel windveld niet meer gezien worden als een fysisch te interpreteren afstand zoals in een standaard windveld. F is te zien als een parameter die van belang is voor de integratie van de differentiaal vergelijking voor de golfparameters. Van belang voor de ontwikkeling van het golfveld is de verandering van F langs de karakteristieken.

In plaats van de strijklengte, F , kan de windduur, t , gebruikt worden als integratieparameter. Volgens transformatieregels als vgl. (2.3.7) en vgl. (2.3.8) zijn strijklengte en windduur in elkaar uit te drukken.

3.2.2 Afleiding van differentiaal vergelijkingen voor de golfparameters.

In de eerste instantie is een benadering gevolgd, analoog aan die in enkele bestaande parametermodellen. (B.v. het GONO-model, Sanders (1976)). Bij deze methode wordt gebruik gemaakt van aannamen betreffende de ontwikkeling van het spectrum gedurende een tijdstap. Later is deze benadering losgelaten, omdat zich problemen van fundamentele aard voordeden. (Bijlage II).

De aanpak die uiteindelijk gevolg is bij de afleiding van de differentiaal vergelijkingen, zal in deze paragraaf worden uitgewerkt.

Het golfveld wordt in dit model gekarakteriseerd door een standaard spectrum. Dit spectrum heeft, bij gegeven windsnelheid,

twee onafhankelijke parameters; één voor het frequentiespectrum (α , f_m of E) en één voor de richtingsverdelingsfunctie (θ_0). De twee parameters worden met de windsnelheid samengesteld tot één dimensionloze vectorgrootheid, de dimensionloze energieflux, $\widetilde{E \vec{c}_g}$:

$$\widetilde{E \vec{c}_g} = \frac{g^2 E}{u^4} \times \frac{\vec{c}_g}{u} \quad (3.2.2)$$

met: E is de geïntegreerde energie van het spectrum.

\vec{c}_g is groepssnelheid waarmee de energie van het golfveld zich voortplant.

De grootte van, \vec{c}_g , c_g , wordt gegeven door vgl. (3.2.1). De richting van \vec{c}_g is de voorplantingsrichting van het golfveld, θ_0 .

Uitgangspunt voor het rekenmodel voor de ontwikkeling van het golfveld is nu, dat er een tweedimensionale groeikromme bestaat, waarmee de ontwikkeling van zowel de grootte als de richting van $\widetilde{E \vec{c}_g}$ te berekenen is, en dat deze tweedimensionale groeikromme in dimensionloze vorm als enige variabelen de vector $\widetilde{E \vec{c}_g}$ en de windrichting, θ_w , heeft:

$$\frac{d \widetilde{E \vec{c}_g}}{d \tilde{F}} = g_1(\widetilde{E \vec{c}_g}, \theta_w) \quad (3.2.3)$$

Voordat een tweedimensionale groeikromme voor $\widetilde{E \vec{c}_g}$ afgeleid wordt, wordt eerst nagegaan hoe de groeikromme voor $\widetilde{E \vec{c}_g}$ in het standaard windveld er uit ziet. In het standaard windveld zal de grootte van $\widetilde{E \vec{c}_g}$, $|\widetilde{E \vec{c}_g}|$, een functie van de strijklengte zijn:

$$|\widetilde{E \vec{c}_g}| = f(\tilde{F}) \quad (3.2.4)$$

Deze groeikromme voor $|\widetilde{E \vec{c}_g}|$ volgt uit combinatie van een groeikromme voor de significante golfhoogte, vgl. (3.1.4), de uitdrukking voor de groepssnelheid van het golfveld, vgl. (3.2.1), en de universele relatie tussen de piekfrequentie en de geïntegreerde energie van het spectrum, vgl. (2.3.30):

$$|\widetilde{E \vec{c}_g}| = |\widetilde{E \vec{c}_g}|_{\infty} \times (\tanh(k \tilde{F}^m))^2 b_1 \quad (3.2.5)$$

met $|\widetilde{E \vec{c}_g}|_{\infty} = \frac{a_1}{16} \tilde{H}_{\infty}^2 b_1$

De coëfficiënt a_1 en exponent b_1 volgen uit vgl.(3.2.1) en vgl. (2.3.30), zie bijlage I.

De afgeleide van vgl.(3.2.5) is:

$$\frac{d |\tilde{E}\tilde{C}_g|}{d F} = g (|\tilde{E}\tilde{C}_g|) \quad (3.2.6)$$

In een variabel windveld kan de differentiaalvgl.(3.2.6) geïntegreerd worden langs karakteristieken. Vgl.(3.2.6) geeft echter alleen informatie over de grootte van $\tilde{E}\tilde{C}_g$ en niet over de richting. Vgl.(3.2.6) is derhalve te zien als een één dimensionale groeikromme.

Het navolgende is gewijd aan de afleiding van een tweedimensionale groeikromme voor $\tilde{E}\tilde{C}_g$, vgl.(3.2.3). Op fysische gronden worden een aantal veronderstellingen gedaan over de vorm van de tweedimensionale groeikromme voor $\tilde{E}\tilde{C}_g$. Verondersteld wordt dat de invloed van de wind op het golfveld tot gevolg zal hebben dat :

- De komponent van $\tilde{E}\tilde{C}_g$ evenwijdig aan de windrichting θ_w ; $|\tilde{E}\tilde{C}_g| \cos(\theta_0 - \theta_w)$, zal toenemen als de waarde $|\tilde{E}\tilde{C}_g|_\infty$ nog niet bereikt is.
- De komponent van $\tilde{E}\tilde{C}_g$ loodrecht op de windrichting, $|\tilde{E}\tilde{C}_g| \sin(\theta_0 - \theta_w)$, zal afnemen.

Deze eisen aan het gedrag van $\tilde{E}\tilde{C}_g$ leiden er toe, dat onafhankelijk van de uitgangspositie, bij gelijkblijvende wind $\tilde{E}\tilde{C}_g$ bij toenemen van F zal naderen tot een limietvector, met als grootte $|\tilde{E}\tilde{C}_g|_\infty$ en als richting de windrichting, θ_w . De aldus gedefinieerde limietvector wordt $\tilde{E}\tilde{C}_{g\infty}$ genoemd:

$$\begin{aligned} \tilde{E}\tilde{C}_{g\infty}: \text{grootte} &= |\tilde{E}\tilde{C}_g|_\infty \text{ uit vgl.(3.2.5)} \\ \text{richting} &= \theta_w \end{aligned}$$

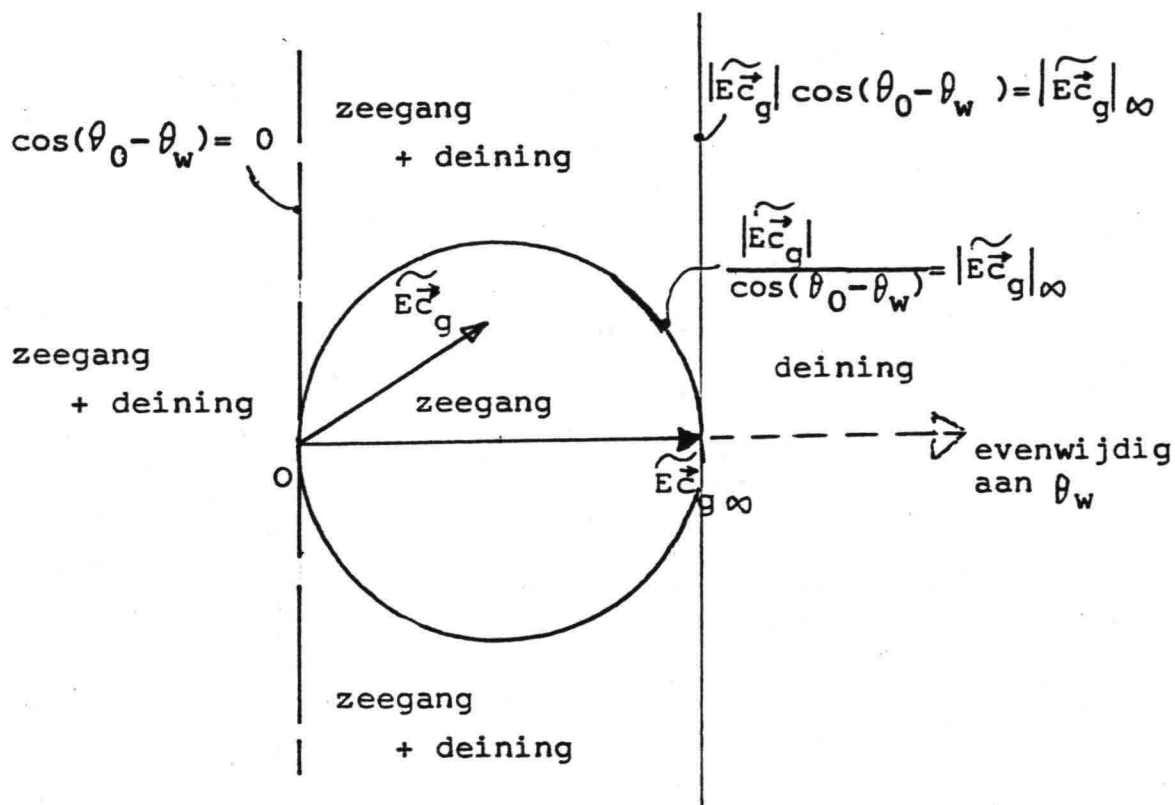
Voor de ontwikkeling van het golfveld moet onderscheid gemaakt worden tussen zeegang en deining. Er zullen gevallen zijn waarin $\tilde{E}\tilde{C}_g$ uitsluitend als zeegang beschouwd wordt, gevallen met uitsluitend deining en gevallen waarin zowel zeegang als deining voorkomen.

In het algemeen zal \vec{E}_g in zijn geheel als zeegang beschouwd worden als $|\vec{E}_g| < |\vec{E}_g|_\infty$ en $(\theta_0 - \theta_w)$ niet erg groot is. Als criterium wordt voor het rekenmodel gekozen:

\vec{E}_g is uitsluitend zeegang als:

$$|\vec{E}_g| < |\vec{E}_g|_\infty \cos(\theta_0 - \theta_w) \quad (3.2.7)$$

Als $|\vec{E}_g| \geq |\vec{E}_g|_\infty \cos(\theta_0 - \theta_w)$ is er een "overschot" aan \vec{E}_g in het (zeegangs)model. Dit overschot wordt beschouwd als deining. In figuur 3.1 zijn de mogelijke combinaties van zeegang en deining grafisch weergegeven.

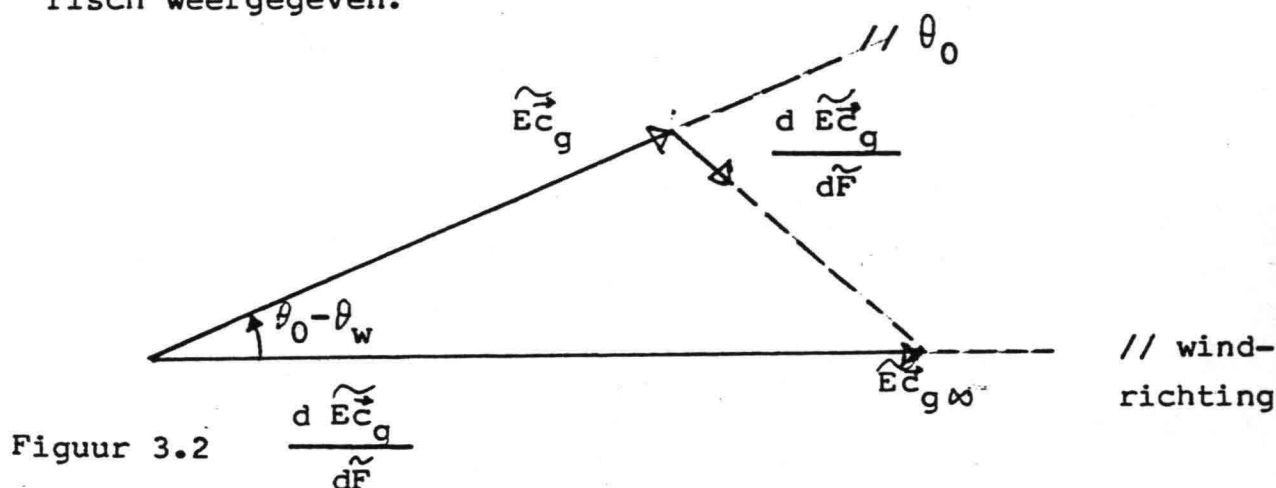


Figuur 3.1 De vectoren \vec{E}_g en \vec{E}_g worden uitgezet vanuit het punt O. Bij de verschillende gebieden waarin het eindpunt van \vec{E}_g terecht kan komen is aangegeven of ontwikkeling van zeegang en/of afname van deining plaatsvindt.

Een uitdrukking voor tweedimensionale groeikromme voor $\tilde{E}\tilde{c}_g$ zal afhankelijk van de situatie bestaan uit differentiaalvergelijkingen voor de ontwikkeling van zeegang en/of voor deining. Deze differentiaalvergelijkingen zijn gebaseerd op de volgende aannamen:

Zeegang:

- De komponent van $\tilde{E}\tilde{c}_g$ evenwijdig aan de windrichting groeit aan volgens een, één-dimensionale groeikromme, vgl.(3.2.6).
- De differentiaalvergelijking voor de komponent van $E\tilde{c}_g$ loodrecht op de windrichting wordt bepaald door de aanname dat de vector $\frac{d\tilde{E}\tilde{c}_g}{d\tilde{F}}$ evenwijdig is aan de verschilvector $\tilde{E}\tilde{c}_g - \tilde{E}\tilde{c}_{g\infty}$. Grafisch weergegeven:



Deining:

Omdat in het model geen deiningsdeel ingebouwd is, betekent het optreden van deining in dit geval, dat de deiningse energie uit het model moet verdwijnen. Om te voorkomen dat door onregelmatigheden in het windveld plotseling veel energie uit het model kan verdwijnen, zal de deining niet ineens uit het model verwijderd worden, maar exponentieel afnemen met een kenmerkende relaxatie afstand, \tilde{F}_{relax} . Deining behoudt daarbij zijn oorspronkelijke richting.

In het algemeen zal \tilde{F}_{relax} vrij klein moeten worden genomen, opdat de deining vrij snel uit het model verdwijnt. Het model is immers niet geschikt om deining goed te beschrijven. Voorkomen moet echter worden, dat door plaatselijk of tijdelijk wegvallen van de wind praktisch alle energie van het golfveld verdwijnt. Dit wordt gerealiseerd door \tilde{F}_{relax} een uitdrukking

te gebruiken waardoor:

- $\tilde{F}_{\text{relax}} \rightarrow \infty$ als $u \rightarrow 0$ bij gelijkblijvende E
 - \tilde{F}_{relax} is klein bij "normale" windsnelheid.
- Als uitdrukking voor \tilde{F}_{relax} wordt gebruikt:

$$\tilde{F}_{\text{relax}} = \text{const} \left(\frac{c_g^1}{u} \right)^p \quad (3.2.8)$$

hierin is:

c_g^1 is de groepssnelheid behorende bij de piekfrequentie

const. en p zijn constant.

De waarden die voor const. en p worden gebruikt worden besproken in par. 5.2.

In het navolgende worden de aannamen voor de ontwikkeling van zeegang en afname van deining in het rekenmodel, uitgewerkt tot differentiaalvergelijkingen.

Afhankelijk van de ligging van de vector $\tilde{E}\tilde{C}_g$ t.o.v. $\tilde{E}\tilde{C}_{g\infty}$ zijn de volgende combinaties van zeegang mogelijk (zie ook fig 3-1).

| | | zeegang | deining |
|---------------------------|--|--------------|---------|
| golfveld met de wind mee | komponent van $\tilde{E}\tilde{C}_g$ // windrichting kleiner dan $ \tilde{E}\tilde{C}_g _{\infty}$ | 1 | 3 |
| | komponent van $\tilde{E}\tilde{C}_g$ // windrichting groter dan $ \tilde{E}\tilde{C}_g _{\infty}$ | geen zeegang | 3 |
| golfveld tegen de wind in | | 2 | 4 |

De differentiaalvergelijkingen voor zeegang en deining worden bij elkaar opgeteld.

Voor de gevallen 1 t/m 4 zijn deze differentiaalvergelijkingen als volgt:

1 - Zeegang:

golfveld met wind mee,

$$\cos(\theta_0 - \theta_w) \geq 0$$

komponent van $\vec{E}\vec{C}_g$ // windrichting kleiner dan $|\vec{E}\vec{C}_g|_\infty$,

$$|\vec{E}\vec{C}_g| \cos(\theta_0 - \theta_w) < |\vec{E}\vec{C}_g|_\infty$$

komponent // θ_w :

$$\frac{d |\vec{E}\vec{C}_g| \cos(\theta_0 - \theta_w)}{d F} = g (|\vec{E}\vec{C}_g| \cos(\theta_0 - \theta_w)) \quad (3.2.9)$$

hierin volgt g (.....) uit vgl.(3.2.6)

komponent $\perp \theta_w$:

$$\frac{d |\vec{E}\vec{C}_g| \sin(\theta_0 - \theta_w)}{d F} = - \frac{d |\vec{E}\vec{C}_g| \cos(\theta_0 - \theta_w)}{d F} \times \frac{|\vec{E}\vec{C}_g| \sin(\theta_0 - \theta_w)}{|\vec{E}\vec{C}_g| - \vec{E}\vec{C}_g \cos(\theta_0 - \theta_w)} \quad (3.2.10)$$

2 - Zeegang:

golfveld tegen de wind in,

$$\cos(\theta_0 - \theta_w) < 0$$

komponent // θ_w :

$$\frac{d |\vec{E}\vec{C}_g| \cos(\theta_0 - \theta_w)}{d F} = g (0) \quad (3.2.11)$$

De komponent van $\vec{E}\vec{C}_g$ // θ_w groeit met maximale snelheid aan. De waarde van de functie g uit vgl.(3.2.9) is maximaal voor $g (0)$.

komponent $\perp \theta_w$

als 1 vgl.(3.2.10)

3 - Deining

golfveld met wind mee,

$$\cos(\theta_0 - \theta_w) \geq 0$$

Een deel van het golfveld wordt in dit geval als deining beschouwd als:

$$|\vec{E}\vec{C}_g| > |\vec{E}\vec{C}_g|_\infty \cos(\theta_0 - \theta_w) \quad (\text{zie (3.2.7)})$$

$$\frac{d}{d\tilde{F}} |\vec{E}\vec{C}_g| = - \frac{|\vec{E}\vec{C}_g| - |\vec{E}\vec{C}_g|_\infty \cos(\theta_0 - \theta_w)}{\tilde{F}_{\text{relax}}} \quad (3.2.12)$$

4 - Deining:

golfveld tegen wind in,

$$\cos(\theta_0 - \theta_w) < 0$$

$$\frac{d}{d\tilde{F}} |\vec{E}\vec{C}_g| = - \frac{|\vec{E}\vec{C}_g|}{\tilde{F}_{\text{relax}}} \quad (3.2.13)$$

4. Beschrijving van het numerieke model.

4.1 Inleiding.

In dit hoofdstuk wordt het numerieke golfvoorspellingsmodel beschreven, dat gebaseerd is op de methode voor de berekening van de ontwikkeling van de zeegang, zoals beschreven in hoofdstuk 3. Bij deze methode wordt het golfbeeld bepaald door de dimensieloze energieflex, $\tilde{E}\vec{c}_g$. Bij gegeven windsnelheid, u , volgen uit $\tilde{E}\vec{c}_g$ de volgende golfparameters:

- de geïntegreerde energie van het golfveld, E ,
- de piekfrequentie, f_m ,
- de gemiddelde voortplantingsrichting, θ_0 .

De formules voor de berekening van deze golfparameters uit $\tilde{E}\vec{c}_g$ en u zijn gegeven in bijlage I. De verandering van $\tilde{E}\vec{c}_g$ langs een karakteristiek onder invloed van de wind wordt berekend met een rekenmodel, dat is beschreven in paragraaf 3.2.2.

In de volgende paragrafen wordt deze methode uitgewerkt tot een numeriek voorspellingsmodel voor de dimensieloze energieflex $\tilde{E}\vec{c}_g$.

4.2 Hoofdpijnen van het model.

De in hoofdstuk 3 beschreven methode heeft als uitgangspunt, dat de ontwikkeling van een golfveld onder invloed van de wind berekend wordt door integratie van een aantal vergelijkingen voor de golfparameters langs karakteristieken. Zo'n karakteristiek kan gezien worden als een golfstraal, waarlangs het golfveld zich over het oppervlak verplaatst. De ontwikkeling van de golfparameters, die het golfveld beschrijven, wordt langs de straal bijgehouden. Zodoende zijn op een bepaald tijdstip de golfparameters bekend in het punt, waar de golfstraal op dat moment terecht komt. Door de ontwikkeling van de golfparameters langs een groot aantal stralen te berekenen, worden er op elk tijdstip een aantal min of meer willekeurige punten verkregen waar de golfparameters bekend zijn.

Het gebied, waarin de golfparameters berekend moeten worden, wordt voor het golfvoorspellingsmodel in vakken verdeeld. De

golfparameters op een bepaald tijdstip in een vak worden berekend door middeling van de golfparameters van de stralen die op dat tijdstip in het vak terecht komen. Het stralenpatroon zelf geeft geen informatie over de energie van het golfveld, zoals bij refractieberekening het geval is. De energie en de piekfrequentie worden "gewoon" gemiddeld:

$$E_{\text{vak}} = (\sum E_{\text{straal}}) / \text{aantal stralen in het vak}$$

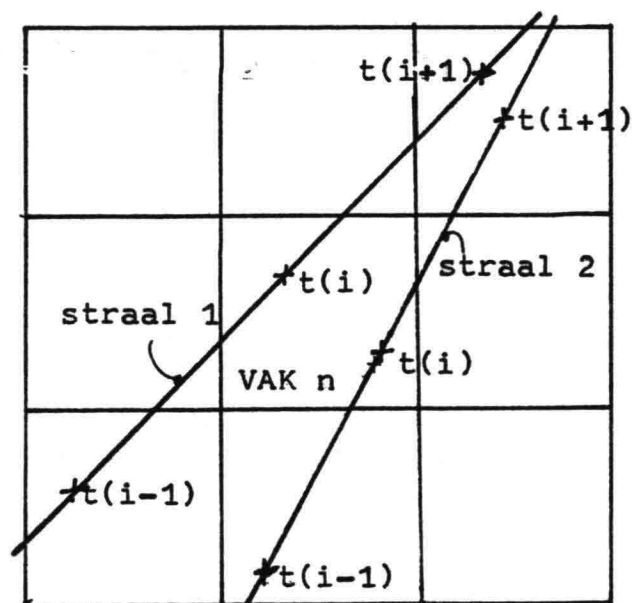
$$f_{\text{m vak}} = (\sum f_{\text{m straal}}) / \text{aantal stralen in het vak}$$

De gemiddelde golfvoortplantingsrichting in het vak wordt berekend als het gewogen gemiddelde van de golfrichting van de stralen. Als gewicht voor de middeling wordt de energie van het golfveld van dezelfde straal gebruikt:

$$\theta_0 \text{ vak volgt uit: } \begin{cases} \sum (E_{\text{straal}} * \cos(\theta_0 \text{ straal})) \\ \sum (E_{\text{straal}} * \sin(\theta_0 \text{ straal})) \end{cases}$$

Bijvoorbeeld:

De golfparameters in vak n op tijdstip $t(i)$ worden in fig. 4-1 bepaald uit de golfparameters van de stralen 1 en 2 op het tijdstip $t(i)$.



Figuur 4.1

De mogelijkheid bestaat, dat er op een bepaald tijdstip vakken zijn waarin geen stralen terecht komen. In zo'n geval is er geen informatie beschikbaar over het golfbeeld in dat vak. Deze informatie wordt verkregen door middeling van de golfparameters uit de aangrenzende vakken, waarin wel golfstralen terecht zijn gekomen op hetzelfde tijdstip. In principe worden de golfparameters op dezelfde wijze gemiddeld, als bij de berekening van de parameters van de vakken uit die van de stralen. Een gedetailleerde uitwerking wordt gegeven in bijlage III, par.III.3.6.

In het "lege" vak zal een nieuwe straal gestart worden met als beginvoorwaarden de golfparameters van het betreffende vak.

Bijvoorbeeld:

| | | | |
|---|-----------------------------------|---|---|
| 1 | 2 | 3 | X: wel stralen in het vak O: geen stralen in het vak |
| X | X | X | |
| 4 | 5 | 6 | |
| O | + startpunt nieuwe straal O | X | |
| 7 | 8 | 9 | |
| X | X | X | |

Figuur 4.2

De golfparameters van vak 5 worden in dit voorbeeld berekend door middeling van de golfparameters uit de vakken 2, 6 en 8. Vak 4 wordt niet gebruikt voor het middelen, omdat vak 4 geen stralen bevat.

Samengevat tot een aantal stappen ziet het golfvoorspellingsmodel er in hoofdlijnen als volgt uit:

Hoofdpijnen van het model.

Initialisatie $t = 0$

- 1 - start in elk vak een straal en bereken het eindpunt en de golfparameters op $t = \Delta t$
- 2 - start in de startpunten aan de kust stralen, bereken de eindpunten en de golfparameters op $t = \Delta t$
- 3 - reken de vakken door; als stap 6 en 7

Bereken elke tijdstap: $t_1 = t, t_2 = t + \Delta t$

- 4 - start stralen in de startpunten aan de kust, bereken de eindpunten en de golfparameters op tijdstip t_2 (als stap 2)
- 5 - loop alle stralen langs, bereken een nieuw punt van de straal en de golfparameters in dat punt (op tijdstip t_2)
- 6 - bereken de golfparameters per vak uit de golfparameters van de stralen (alle op t_2)
- 7 - vul vakken waarin geen stralen terecht zijn gekomen in door middeling en start in deze vakken nieuwe stralen met als beginvoorwaarde de golfparameters van het betreffende vak. (ook op tijdstip t_2)

Volgende tijdstap; $t = t + \Delta t$

Het numerieke model is verder uitgewerkt in bijlage III.

5. Resultaten.

5.1 Inleiding.

De beste methode om het model te testen is een aantal stormen door te rekenen en de resultaten te vergelijken met metingen. Een dergelijk onderzoek vergt echter zeer veel tijd. Daarom is een vergelijking met metingen niet gemaakt.

Een volgende mogelijkheid om het model te testen is het gedrag te vergelijken met dat van andere modellen. Dit bleek goed mogelijk, omdat gebruik gemaakt kon worden van de resultaten van een recente studie naar het gedrag van een aantal golfvoorspellingsmodellen, SWAMP(1982). In deze studie zijn met een aantal golfvoorspellingsmodellen een serie gestandariseerde windvelden doorgerekend. Dit maakt het mogelijk de modellen onder nauwkeurig voorgeschreven condities te testen en met elkaar te vergelijken. Omdat het in dit rapport ontwikkelde model niet in staat is deining goed te beschrijven, worden alleen die gevallen van de SWAMP studie bekeken waarin de ontwikkeling van zeegang centraal staat.

De volgende situaties zijn doorgerekend:

1 Standaard windveld.

In een standaard windveld, zoals gedefinieerd in par.2.3.1, wordt het verband tussen de parameters van het golfveld E en f_m en die van het windveld, strijklengte en windduur, bepaald.

2 Windrichting onder een hoek van 45° met een lange, rechte kust. Dit is een stationair uniform windveld. Echter in tegenstelling tot het standaard windveld maakt de windrichting een hoek van 45° met de kust.

3 90° Draaiing van de wind.

In een uniform windveld draait de windrichting ineens 90° en blijft vervolgens constant.

4 Diagonaal front.

Er loopt een front diagonaal over een "vierkante" model zee. Over het front draait de wind met 90° , zodat de windrichting van evenwijdig aan de golfrichting draait naar loodrecht erop.

5 Stationaire orkaan.

6 Roterend uniform windveld.

In een uniform windveld roteert de windrichting met constante hoeksnelheid.

De tests 1,2,3 en 4 zijn tests die ook in de SWAMP-studie gedaan zijn. De orkaan die in test 5 is gebruikt, wijkt nogal af van de orkaan die in de SWAMP-studie is gebruikt. Alleen rond het oog van de orkaan is er een vrij goede overeenstemming. De orkaan uit de SWAMP-studie kon niet gebruikt worden omdat deze niet in bruikbare vorm beschikbaar was.

In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de keuzes van de constanten (zoals bv. de tijdstap) in het model. In de daarna volgende paragrafen zullen de resultaten van de tests beschreven worden.

5.2 Modelconstanten.

In deze paragraaf wordt gemotiveerd aangegeven welke waarden gekozen zijn voor de constanten in het model. De volgende constanten moet een waarde worden toegekend:

- De tijdstap, Δt .
- De afmeting van de vakken in x- en y-richting, Δx en Δy .
- De coëfficiënten van de groeikromme.
- De coëfficiënt q in de relatie tussen de voortplantingssnelheid van het golfveld en de piekfrequentie.
- De constanten in de uitdrukking voor de dimensieloze relaxatie afstand voor de afname van de deining, \tilde{F}_{relax} .

De coëfficiënten van de dimensieloze relaties tussen de parameters van het spectrum zijn reeds gegeven in bijlage I.

Tijdstap Δt .

$\Delta t = 1.5$ uur.

Voor de integratie van de golfparameters langs karakteristieken is de tijdstap niet erg kritiek. Een karakteristiek wordt berekend door de groepssnelheid met een eenvoudige expliciete methode te integreren. Langs zo'n karakteristiek wordt de groeikromme voor \tilde{E}_g geïntegreerd. Omdat de groeikromme niet nume-

riek geïntegreerd wordt, maar gebruik wordt gemaakt van een reeds bekende integraal, doen zich daarbij geen stabiliteitsproblemen voor. De benodigde grootte van de tijdstap wordt vooral bepaald door variatie van het windveld. Aangezien meteorologische gegevens als drukvelden normaliter om de 6 uur worden verstrekt, is het voor een golfvoorspellingsmodel handzaam de tijdstap zo te kiezen, dat deze een geheel aantal malen in 6 uur past. Gekozen is voor 1.5 uur. Het numerieke model is overigens zo samengesteld dat een andere keuze van de tijdstap numeriek geen probleem is.

De afmetingen van de vakken Δx en Δy .

$\Delta x = \Delta y = 50 \text{ km}$.

Uit oogpunt van efficiëntie van het model is het zinvol Δx en Δy zo te kiezen, dat de door het golfveld afgelegde afstand gedurende een tijdstip van dezelfde orde van grootte is als de afmeting van de vakken. De gekozen waarde van 50 km is ongeveer even groot als de afstand, die in 1.5 uur afgelegd wordt door een golfveld met volgroeide zeegang bij een windsnelheid van 20 m/s.

Groeikromme voor \tilde{H} (significante golfhoogte)

$$\tilde{H} = 0.24 \tanh(0.015 \tilde{F}^{0.45})$$

De groeikromme voor $\tilde{E} \tilde{c}_g$ wordt verkregen door de combinatie van een groeikromme voor \tilde{E} met een uitdrukking voor c_g . De groeikromme voor \tilde{E} wordt afgeleid uit een groeikromme voor \tilde{H} . c_g wordt bepaald door piekfrequentie en deze volgt met een universele relatie uit \tilde{E} . (zie par.3.2.2)

Holthuijsen (1980) heeft een aantal groeikrommen vergeleken met een groot aantal waarnemingen. Als groeikromme voor de dimensieloze golfhoogte, \tilde{H} , als functie van de dimensieloze strijklengte, \tilde{F} , voldoet de uitdrukking van Groen en Dorrestein (1976) goed:

$$\tilde{H} = 0.24 \tanh(0.015 \tilde{F}^{0.45}) \quad (5.2.1)$$

De waarde voor $\tilde{H}_\infty = 0.24$ is in overeenstemming met de golfhoogte die volgt uit de geïntegreerde energie van het Pierson - Moskowitz-spectrum voor volgroeide zeegang (zie vgl.(2.3.15)).

Coëfficiënt q

$$q = 0.8$$

q is de verhouding tussen de voortplantingssnelheid van het golfveld en de groepssnelheid behorende bij de piekfrequentie, zoals deze volgt uit de lineaire theorie. Vgl.(3.2.1) geeft:

$$c_g = q_4 \frac{g}{\tau f_m} \quad (3.2.1)$$

De waarde voor q is zo gekozen, dat de groeikromme van de dimensioneloze energie, \tilde{E} , als functie van de dimensioneloze windduur, \tilde{t} , in overeenstemming is met gelijksoortige groeikrommen van de in de SWAMP-studie geteste modellen. Zie par. 5.3.1.

Relaxatie afstand \tilde{F}_{relax}

$$\tilde{F}_{\text{relax}} = \text{const} \left(\frac{c_g (f_m)}{u} \right)^p$$

$$\text{const} = 7000$$

$$p = 3$$

De keuze van \tilde{F}_{relax} hangt nauw samen met de resultaten van test 4, diagonaal front. Aan de hand van de resultaten van deze test worden de gevolgen van de gedane keuze uiteen gezet. (par. 5.3.4)

5.3 Testgevallen.

Voordat de verschillende testgevallen besproken worden volgen eerst enige opmerkingen over de SWAMP-studie.

De dimensioneloze relaties in de SWAMP-studie volgen door schalen met de schuifspanningssnelheid, u_* . De relatie tussen u_* en de in dit rapport gehanteerde windsnelheid $u = u_{10}$ volgt uit de formules voor de schuifspanning, τ :

$$\tau = c_d \rho u^2 \quad (5.3.1)$$

$$u_*^2 = \sqrt{\tau / \rho} \quad (5.3.2)$$

$$\Rightarrow u_* = \sqrt{c_d} u \quad (5.3.3)$$

In de SWAMP-studie wordt voor c_d een constante waarde genomen:

$$c_d = 1.83 \times 10^{-3} \quad (5.3.4)$$

De definities van de dimensieloze variabelen zijn met u_* :

$$x^* = \frac{g x}{u_*^2} \quad (5.3.5)$$

$$t^* = \frac{g t}{u_*} \quad (5.3.6)$$

$$E^* = \frac{g^2 E}{u_*^4} \quad (5.3.7)$$

$$f_m^* = \frac{f_m u_*}{g} \quad (5.3.8)$$

De waarden van de parameters α en f_m van het Pierson-Moskowitz spectrum zijn in de SWAMP-studie op dezelfde wijze gedefinieerd als in dit rapport in par. 2.3.1:

$$f_{m \text{ PM}} = 0.13 \frac{g}{u_{10}} \quad (5.3.9)$$

$$\alpha_{\text{PM}} = 0.0081 \quad (5.3.10)$$

$$\text{zodat } E_{\text{PM}} = 3.64 \times 10^{-3} \frac{u_{10}^4}{g^2} \quad (5.3.11)$$

Geschaald met u_* volgen:

$$f_{m \text{ PM}}^* = 5.56 \times 10^{-3} \quad (5.3.12)$$

$$E_{\text{PM}}^* = 1.09 \times 10^3 \quad (5.3.13)$$

De in de SWAMP-studie geteste modellen zijn in drie klassen in te delen. Omdat de namen van deze modellen vermeld zijn in die figuren, waarin de resultaten van het in dit rapport beschreven model met de SWAMP-modellen vergeleken worden, zullen deze namen bij de verschillende klassen vermeld worden. De drie categorieën zijn:

- DP (Decoupled propagation)

Deze modellen zijn de discrete modellen zonder wisselwerkingen. De ontwikkeling van de spectrale componenten wordt berekend zonder rekening te houden met niet lineaire wisselwerkingen tussen de componenten onderling. De modellen MRI en VENICE behoren tot deze categorie.

- CH (Coupled Hybrid)

De hybride parametermodellen vallen in deze klasse. Het verschil met het in dit rapport beschreven model is, dat de CH modellen naast een zeegangs deel alle een deinings deel hebben. Tot deze categorie behoren de modellen NOWAMO, GONO, TOHOKU en HYPA.

- CD (coupled discrete)

De CD-modellen zijn de discrete modellen waarbij de wisselwerkingen wel gemodelleerd zijn. Hiertoe behoren BMO, SAIL, DNS en EXACT-NL.

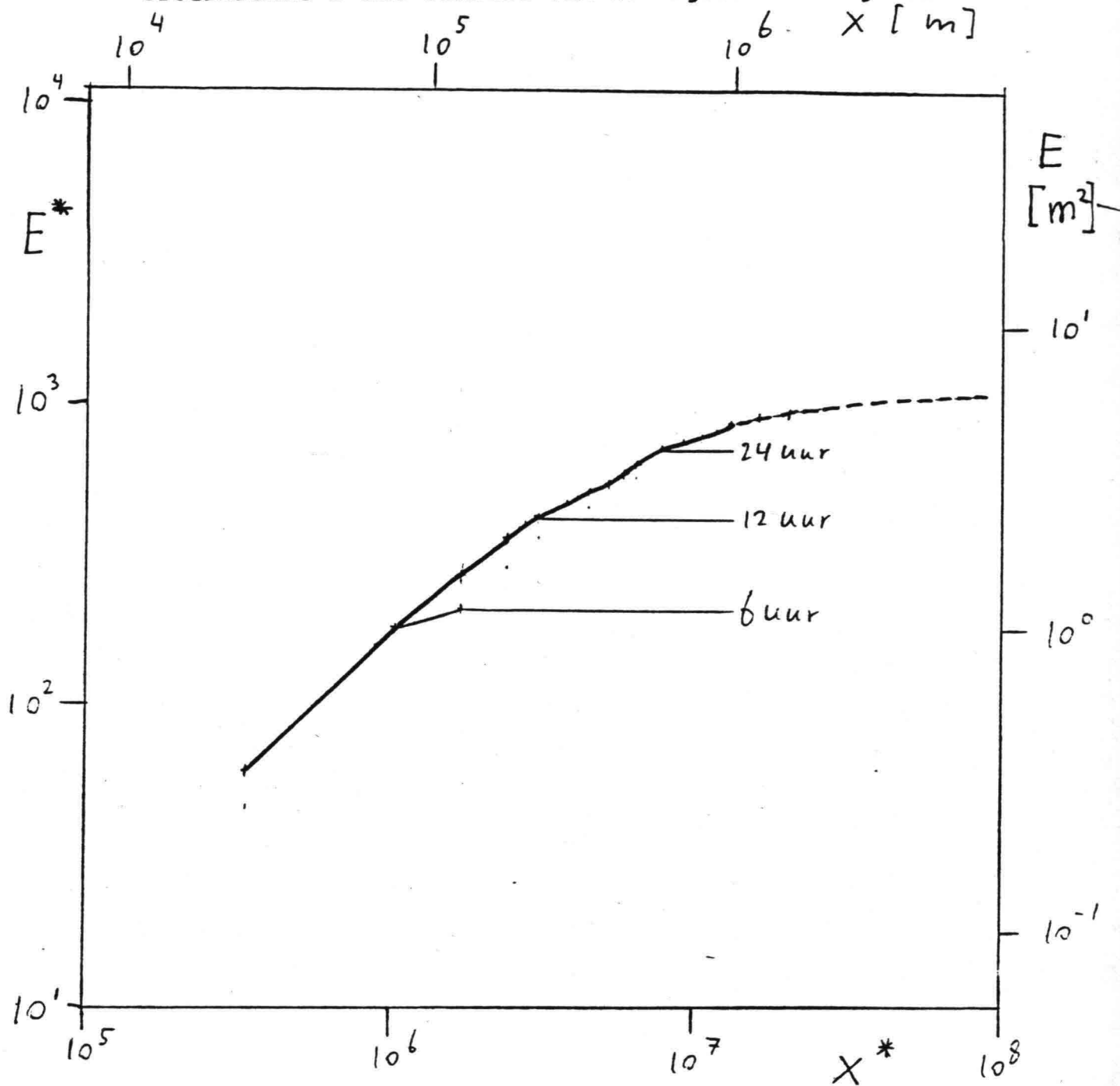
Het in dit rapport ontwikkelde model zal in de figuren de naam ECG gegeven worden. Een beschrijving van de SWAMP-modellen wordt hier niet gegeven. Zie hiervoor SWAMP (1982). De principes van de verschillende soorten modellen zijn overigens beschreven in hoofdstuk 2.

5.3.1 Standaard windveld (Test 1).

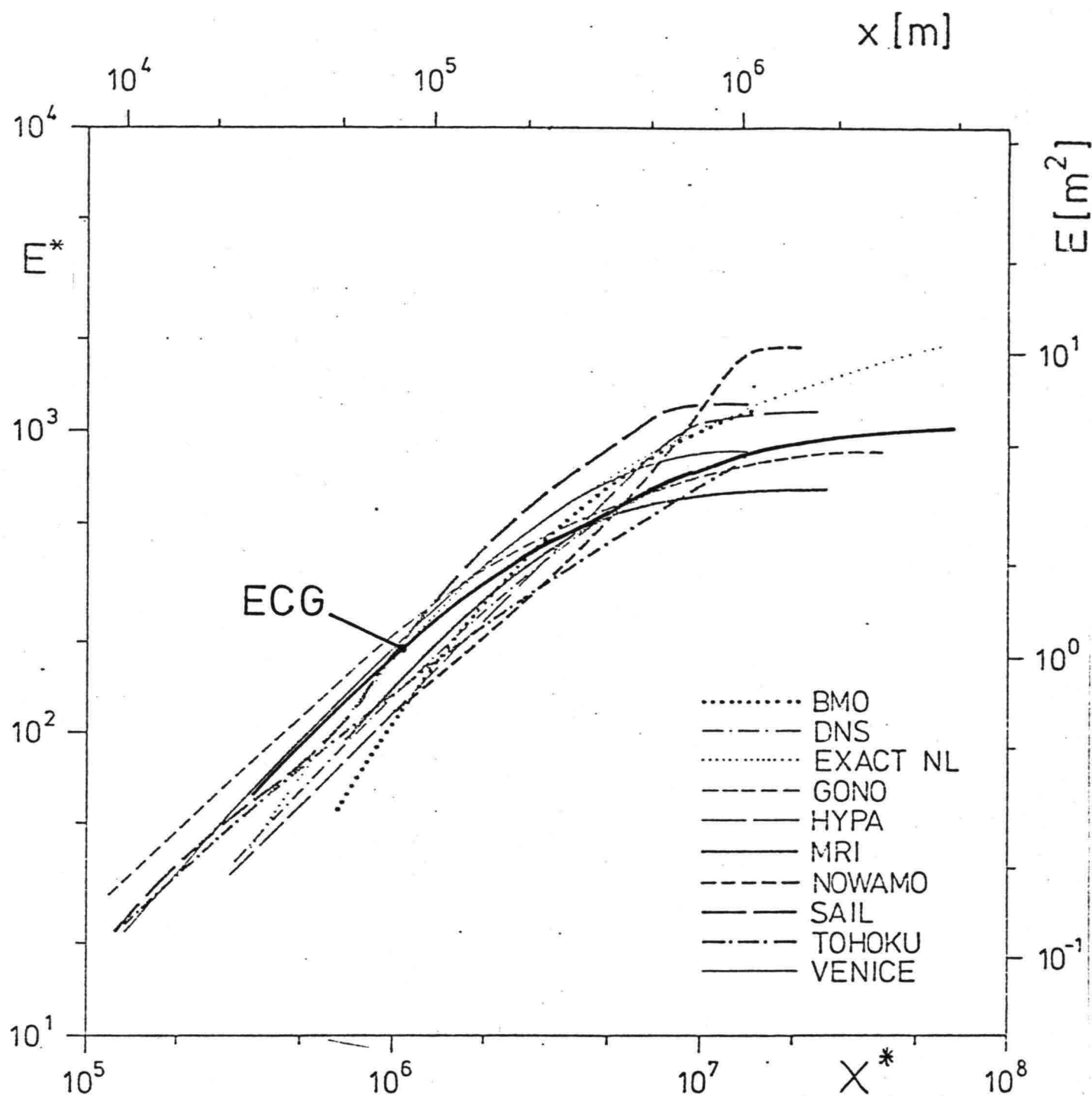
Op tijdstip $t = 0$ begint de wind te waaien met een konstante snelheid $u = 20$ m/s. De windrichting is evenwijdig aan de x-as en de wind waait loodrecht van de kust, de y-as, zeewaarts. Het model begint de berekening met als beginvoorwaarde voor het gehele modelgebied dat $E = 0$ op $t = 0$. Aan de kust worden karakteristieken gestart met $E = 0$. De berekening wordt gestopt als tot en met een strijklengte van 1000 km een stationaire situatie is bereikt.

Bepaald zijn de groeikrommen voor de energie en de piekfrequentie als functie van de strijklengte en de windduur.

- Groeikromme E als functie van x. Fig.5.1 en fig.5.2



5.1 E als functie van x

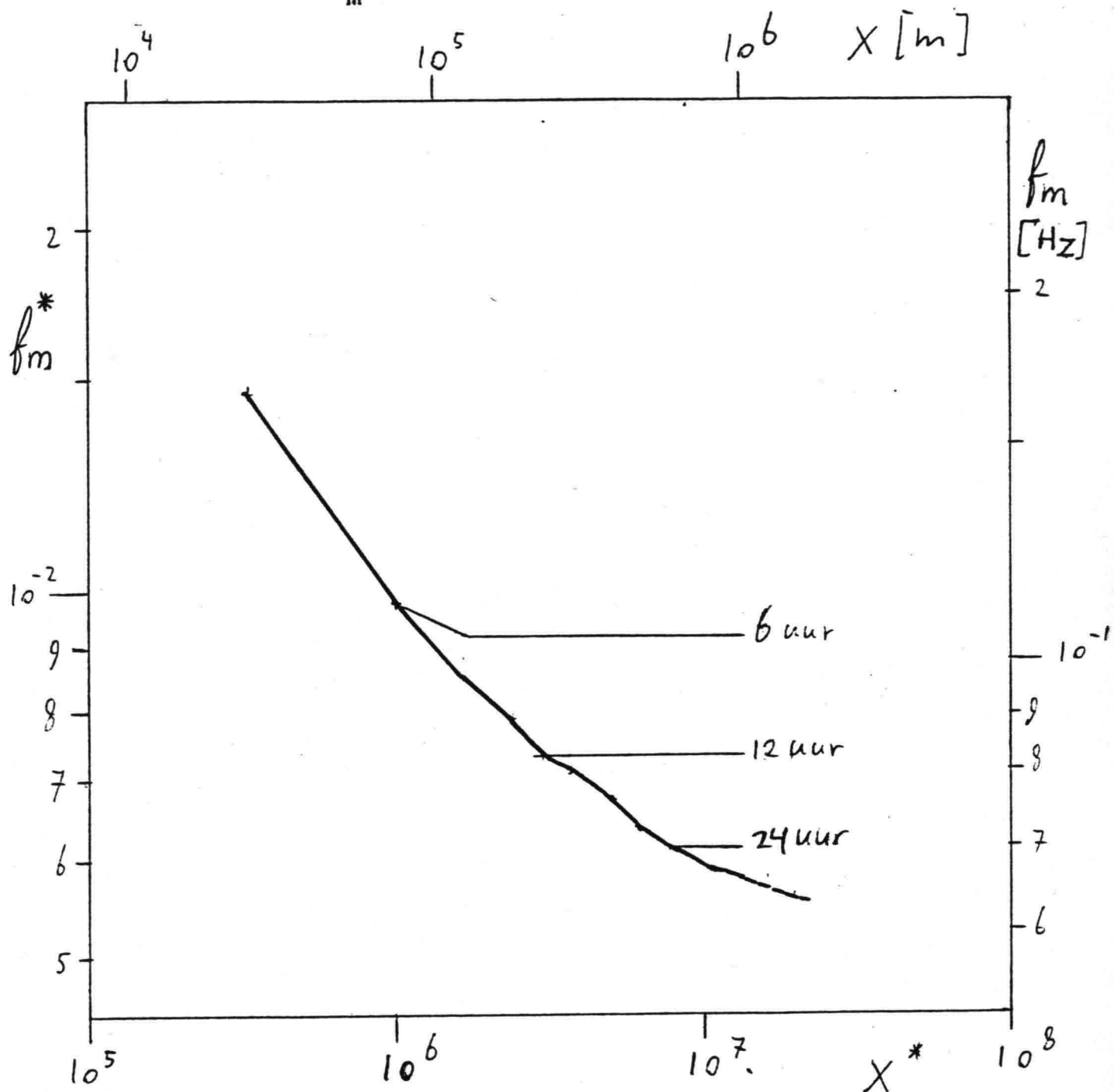


5.2 E als functie van x

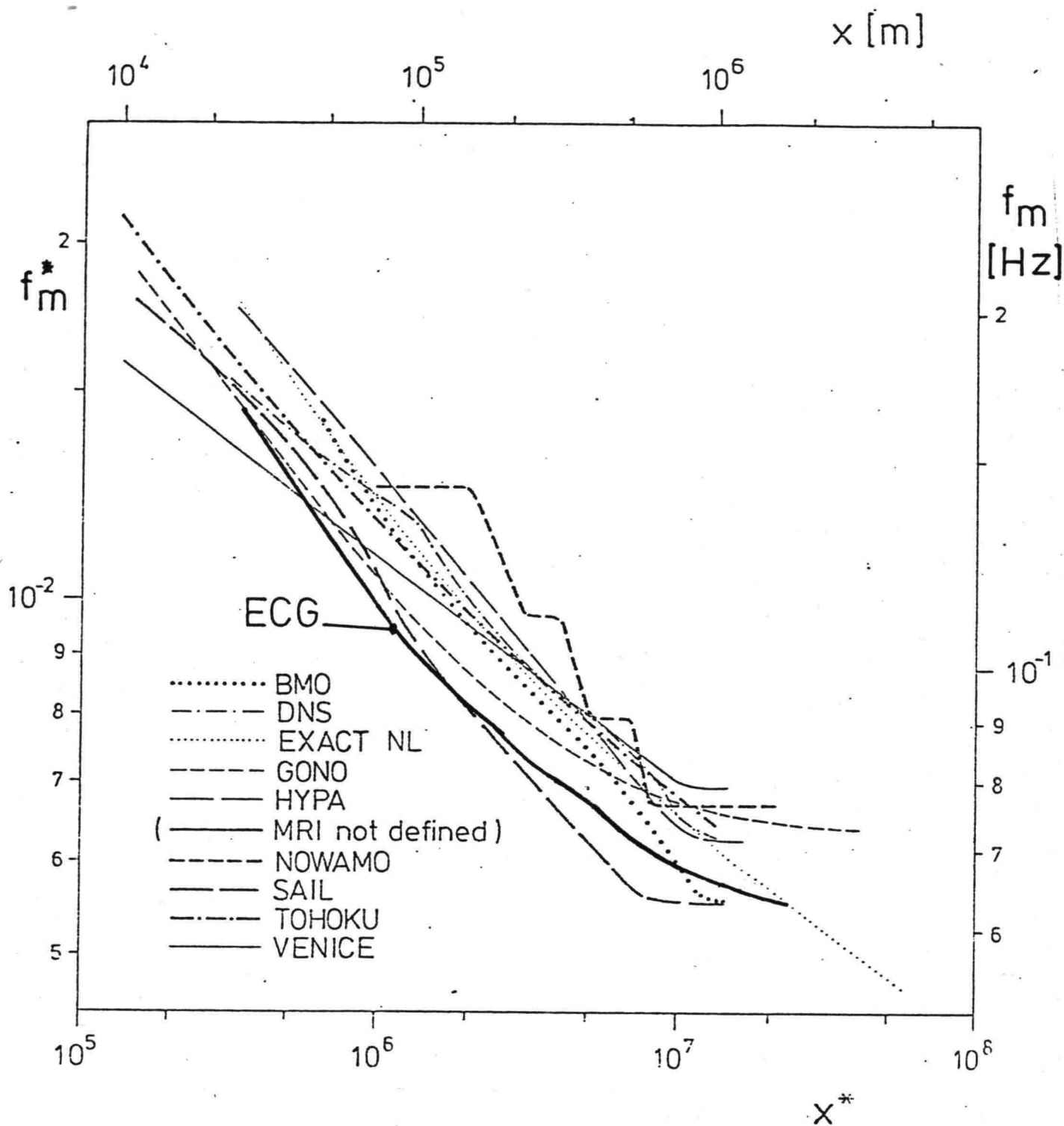
Deze groeikromme is in principe als invoer aan het model opgelegd. In fig.5.1 is deze kromme getekend voor de stationaire situatie, $t=\infty$, en voor de windduren 6, 12 en 24 uur. In fig.5.2 is de kromme voor $t=\infty$ tesamen met die van de SWAMP-modellen getekend. (Het in dit rapport beschreven model heeft de naam

ECG in de figuren). De kromme valt goed binnen de bundel van de overige krommen.

- Groeikromme f_m als functie van x . Figuren 5.3 en 5.4



5.3 f_m als functie van x .



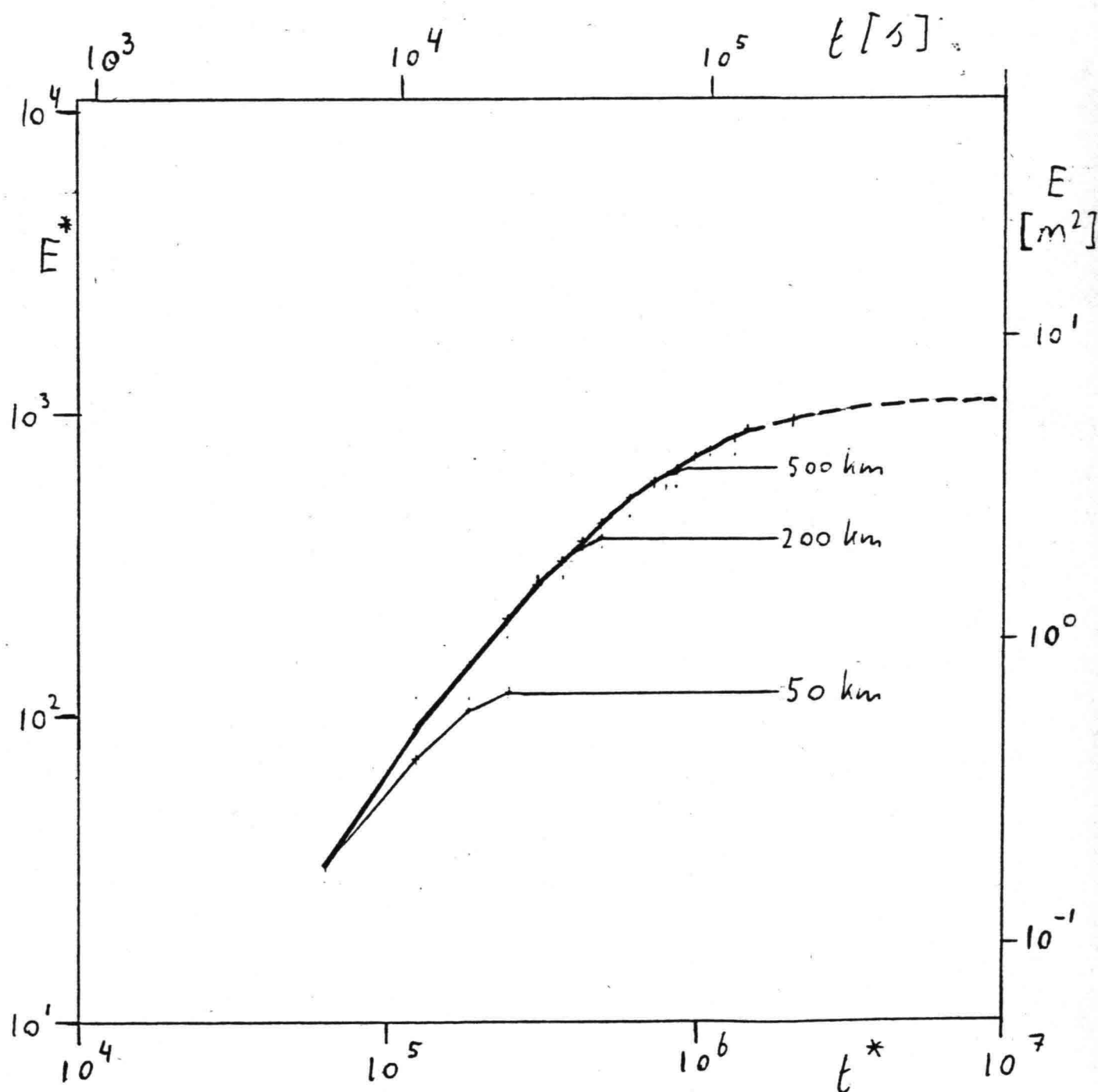
5.4 f_m als functie van x .

In fig.5.3 zijn de krommen weergegeven voor $t=\infty$ en voor t is resp. 6, 12 en 24 uur. In fig.5.4 is de kromme voor $t=\infty$ tesamen met de SWAMP-krommen getekend. Deze kromme valt beneden in de bundel. Dit betekent, dat voor een zelfde $E f_m$ in vergelijking tot de andere modellen aan de lage kant zal zijn.

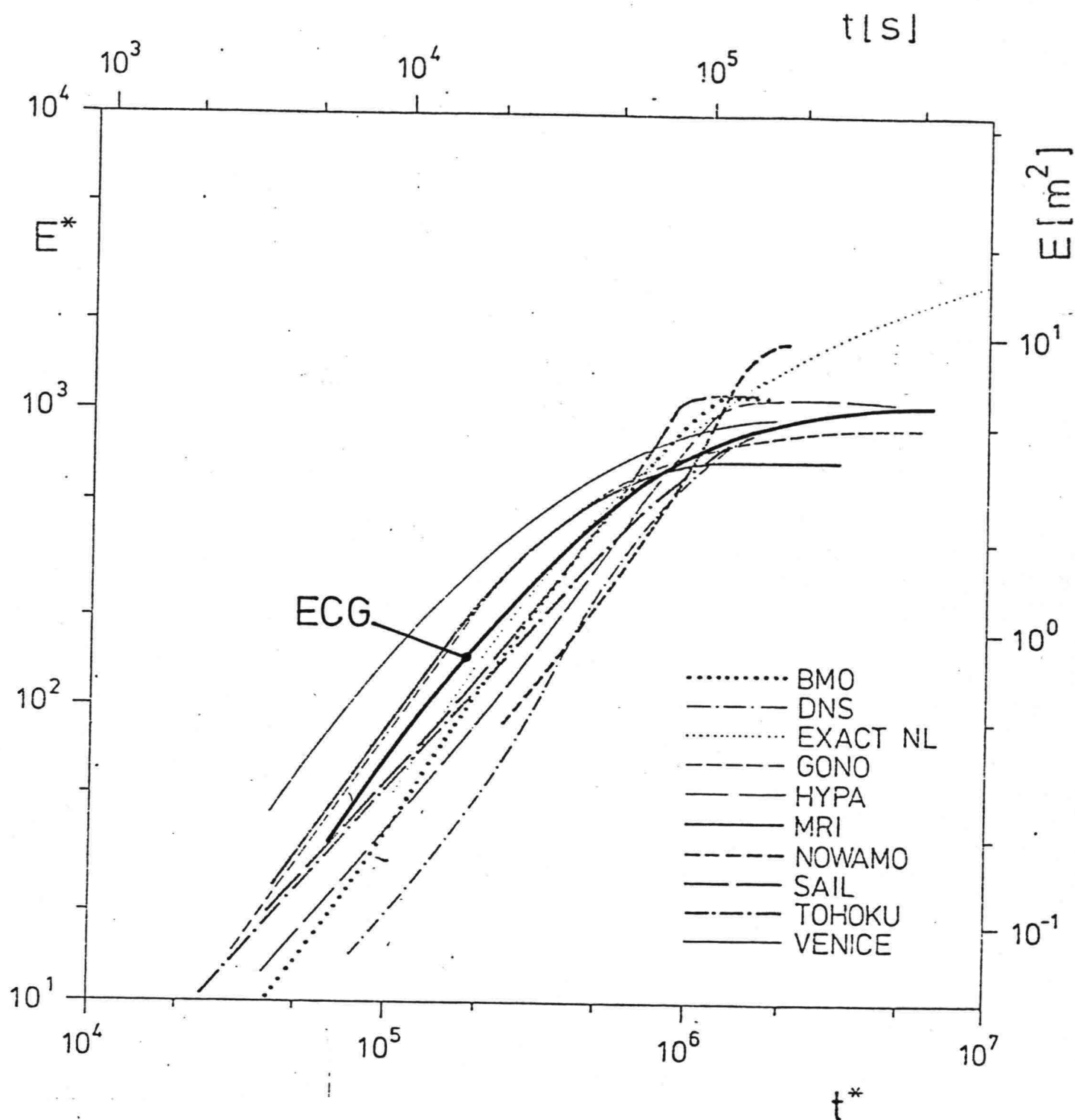
De waarde van f_m wordt bij gegeven E en windsnelheid bepaald door de relatie gegeven door Mitsuyasu (1980). f_m is te vergroten door deze relatie aan te passen.

In de figuren 5.1 en 5.3 is te zien dat de groeikrommen voor E en f_m als functie van de strijklengte een lichte slingering vertonen. Dit is een gevolg van de wijze van interpreteren van de informatie, die door de karakteristieken op willekeurige plaatsen in het model wordt gegeven. Bij de interpretatie wordt de exacte plaats van de informatie als het ware afgerond naar bepaalde vaste punten in het model.

- Groeikromme voor E als functie van t . Figuren 5.5 en 5.6



5.5 E als functie van t

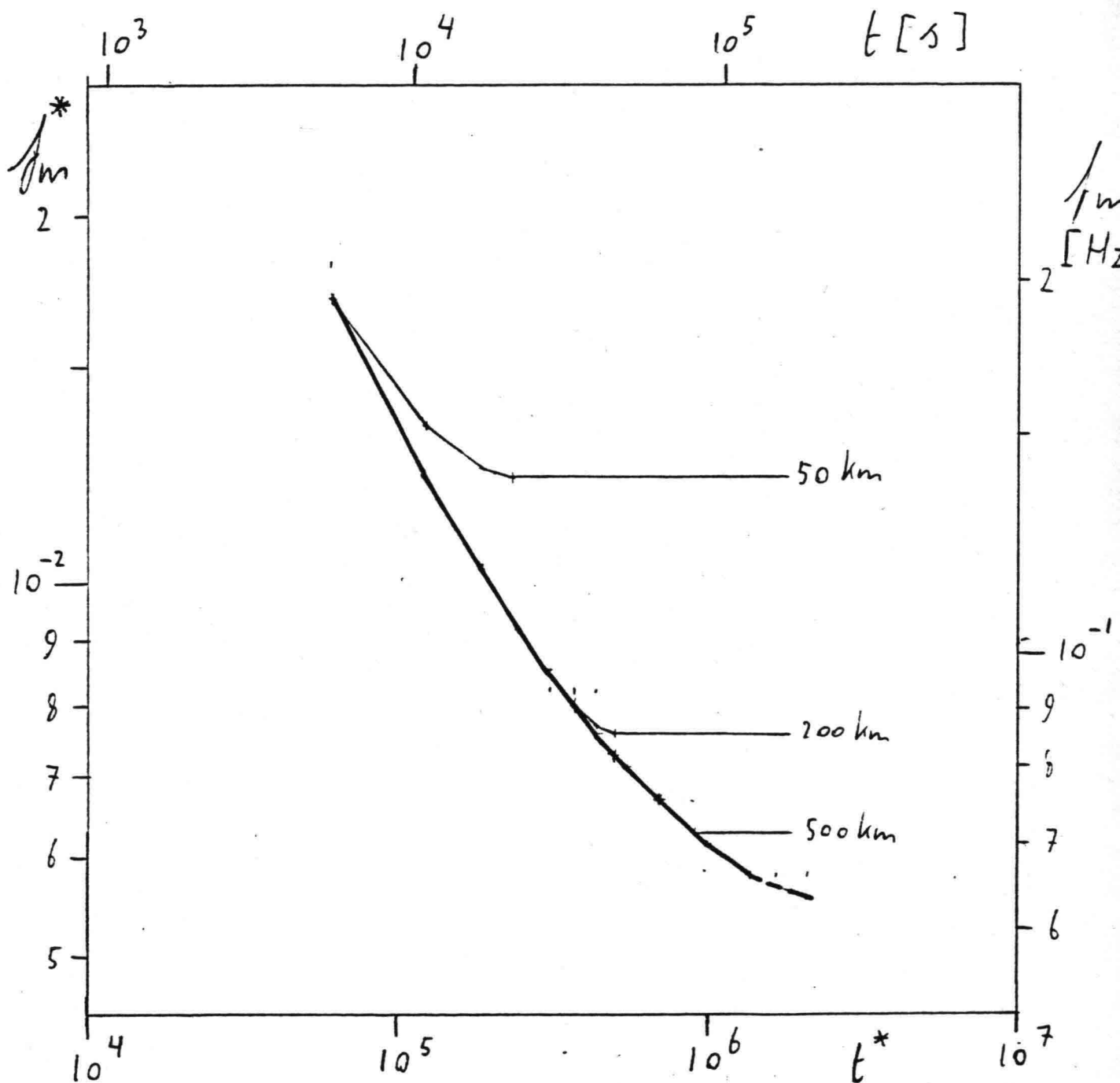


5.6 E als functie van t

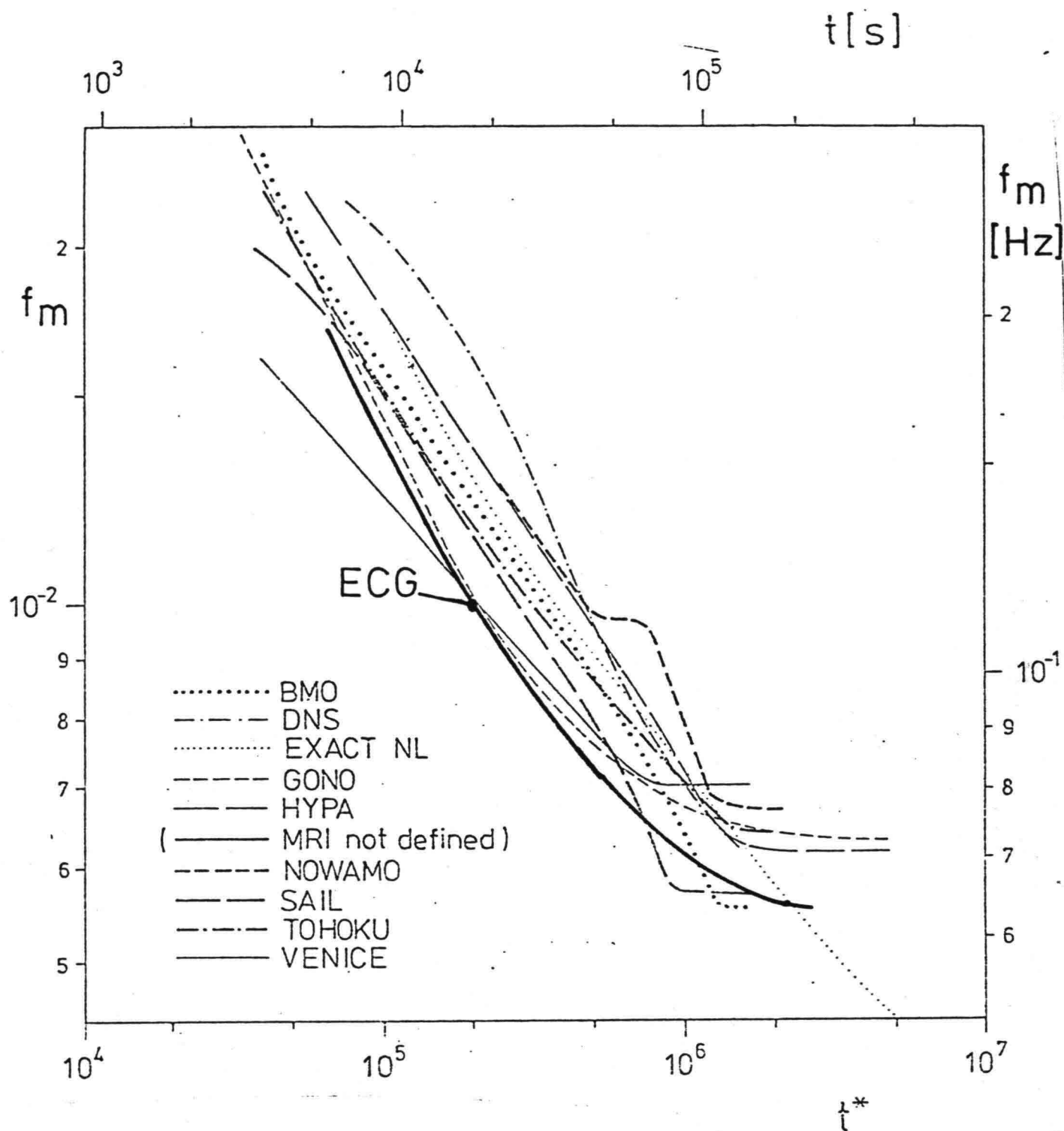
De kromme $E(t)$ voor $x=\infty$ is gebruikt om de waarde van coëfficiënt q te bepalen (par.5.2). In fig.5.6 is deze kromme getekend tesamen met de SWAMP-krommen. Tezien is, dat de kromme bij de gekozen waarde voor q , $q=0.8$, een zelfde positie tussen de SWAMP krommen inneemt als de kromme voor E als functie van

x in fig.5.2. De krommen van de twee DP-modellen, MRI en VENICE, zijn voor de bepaling van q buiten beschouwing gelaten omdat de DP-modellen door het ontbreken van de wisselwerkingen te hoge waarden voor E bij een zelfde t voorspellen. In figuur 5.5 zijn behalve de kromme bij onbeperkte strijklengte, $x=0$, ook de krommen voor $x= 50$ km, $x= 200$ km en $x= 500$ km getekend.

- Groeikromme als f_m als functie van t. Figuren 5.7 en 5.8



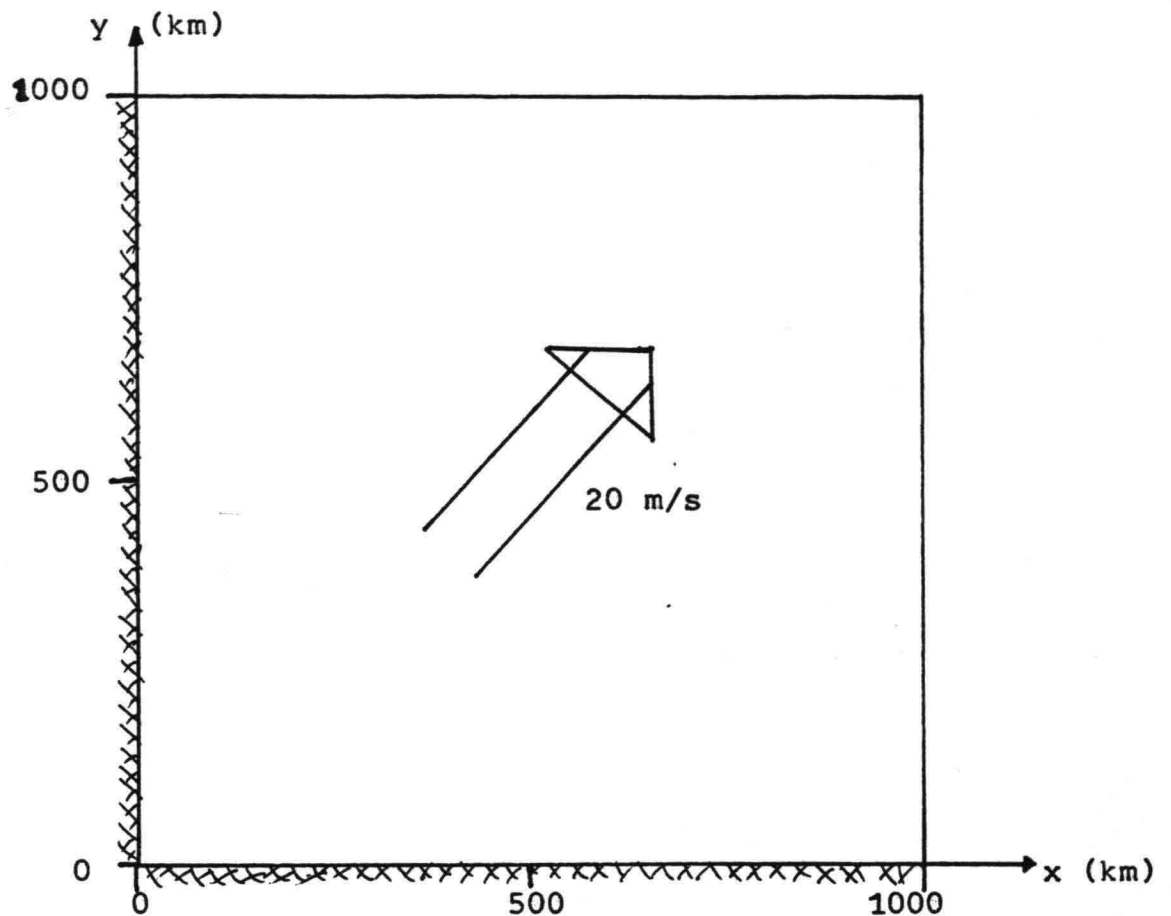
5.7 f_m als functie van t.



5.8 f_m als functie t

In fig.5.7 zijn de krommen bij onbeperkte strijklengte, $x=\infty$, en respectievelijk voor x is 50 km, 200 km en 500 km getekend. In fig.5.8 is de kromme bij $x=\infty$ tesamen met de SWAMP-krommen geplott. Evenals de kromme voor f_m als functie van x valt de kromme voor f_m als functie van t beneden in de bundel.

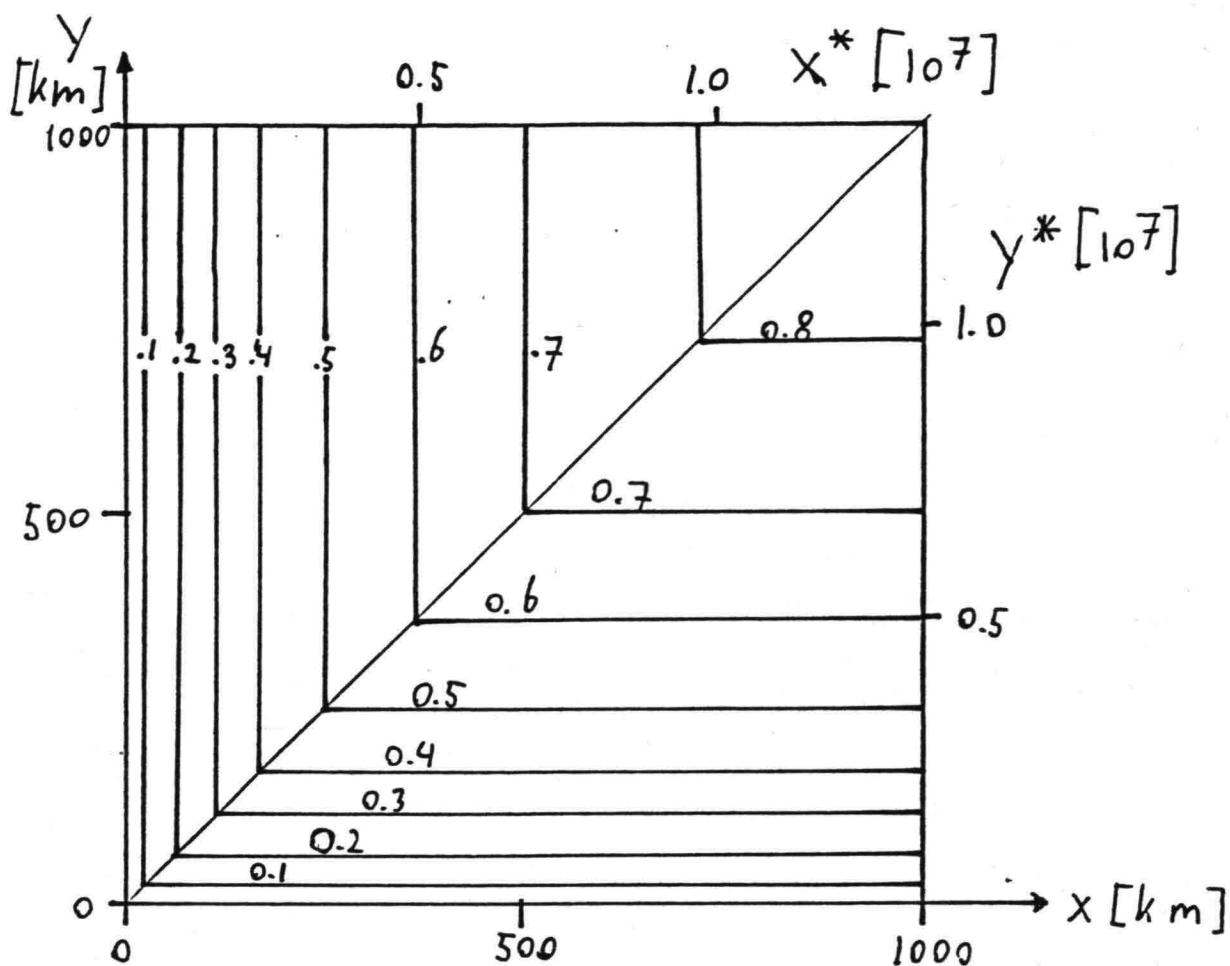
5.3.2 Windrichting onder een hoek van 45° met de kust. (Test 2)



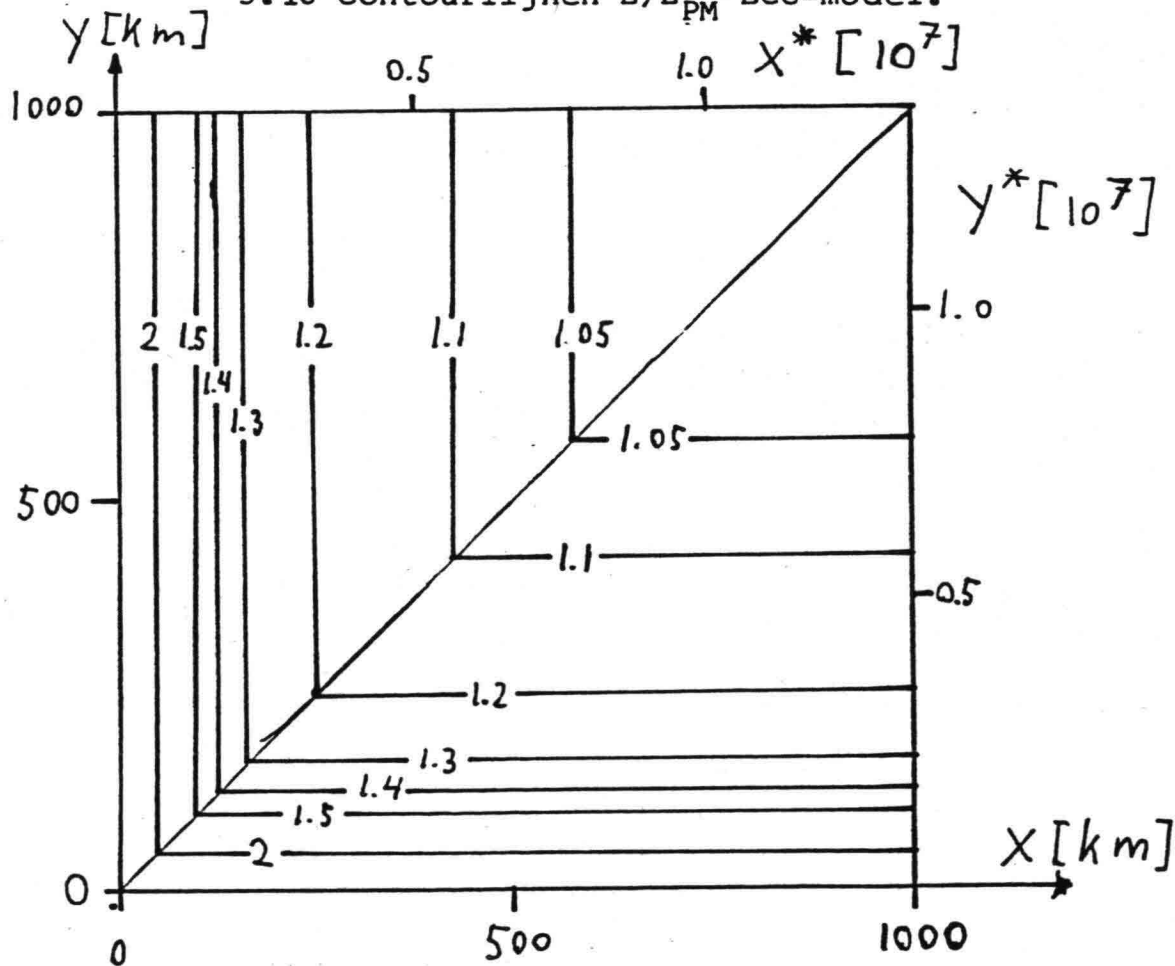
5.9 Windveld test 2.

Op $t = 0$ begint de wind te waaien met een constante snelheid van 20 m/s en een richting, die een hoek van 45° met de x-as van het model maakt. (Zie fig.5.9). De zee is gedefinieerd als een vierkant van 1000 km bij 1000 km met een x-as, die in oostelijke richting wijst, en een y-as, die naar het noorden gericht is. De x-as en de y-as zijn gedefinieerd als kust. Aan de kust worden karakteristieken gestart met als beginvoorwaarde $E = 0$. De berekening wordt gestopt als een stationaire situatie is bereikt. Op $t = 0$ wordt gestart met een rimpelloze zee; $E = 0$.

De resultaten van de berekende stationaire situatie zijn weergegeven in de figuren 5.10 en 5.11.



5.10 Contourlijnen E/E_{PM} ECG-model.

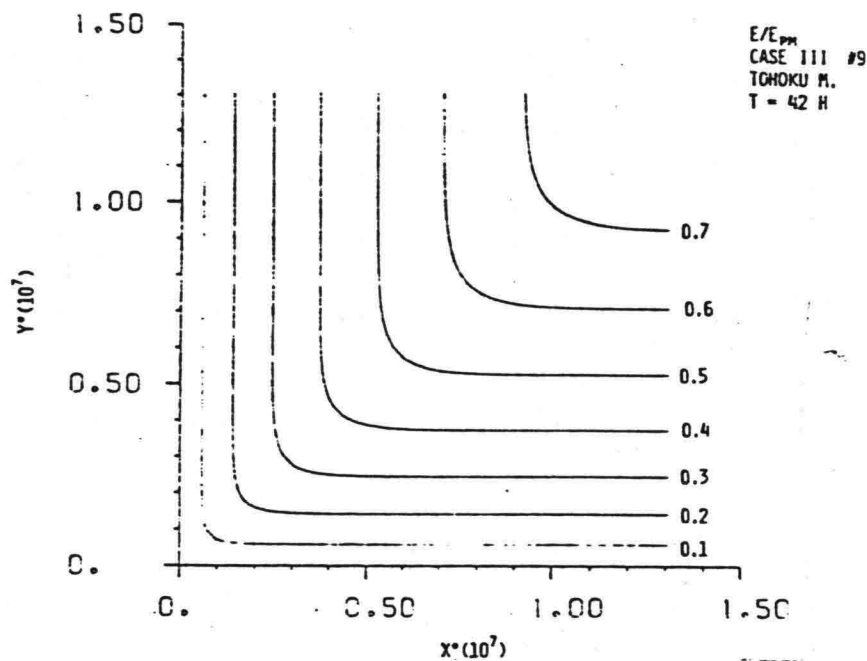


5.11 Contourlijnen $f_m/f_{m_{PM}}$ ECG-model.

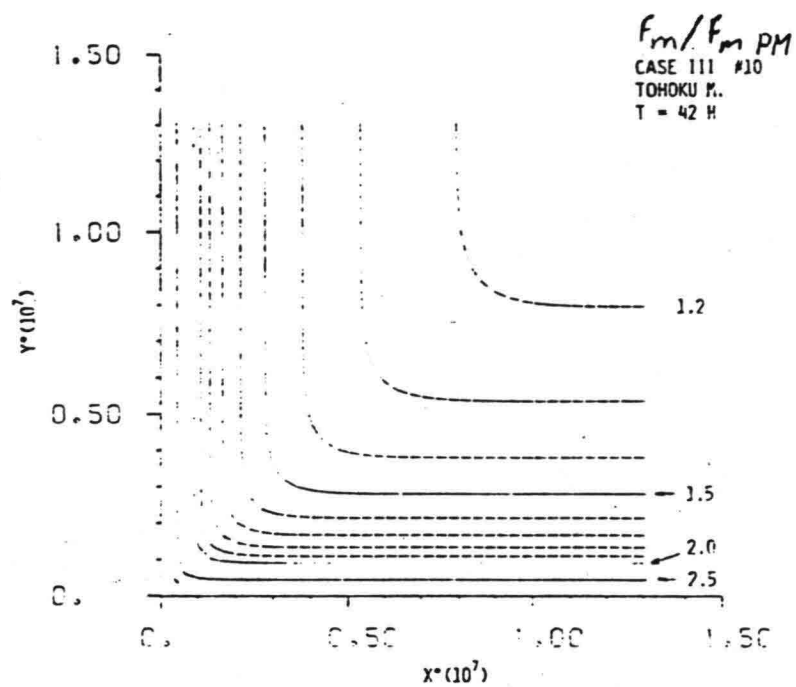
Fig.5.10 is een contourplot van de energie van het golfveld gedeeld door de energie van het volgroeide PM-spectrum; E/E_{PM} . Fig.5.11 is een contourplot van $f_m/f_{m PM}$. De resultaten van de berekening laten zien, dat alleen de afstand tot de kust gemeten in de windrichting bepalend is voor het golfbeeld. Zo wordt b.v. $E/E_{PM} = 0.5$ in fig.5.10 bereikt op $250\sqrt{2} = 353$ km uit de kust, gemeten in de windrichting. In het standaard windveld wordt de waarde van $E/E_{PM} = 0.5$ bereikt op 362 km uit de kust.

Bij de karakteristieke methode is de rand van het model alleen van invloed op de startwaarde voor de energie. De berekening maakt geen onderscheid tussen een karakteristiek midden op de oceaan en één vlak aan de kust. Gevolg is, dat het model in een kanaal even hoge golven zal voorspellen als op volle zee.

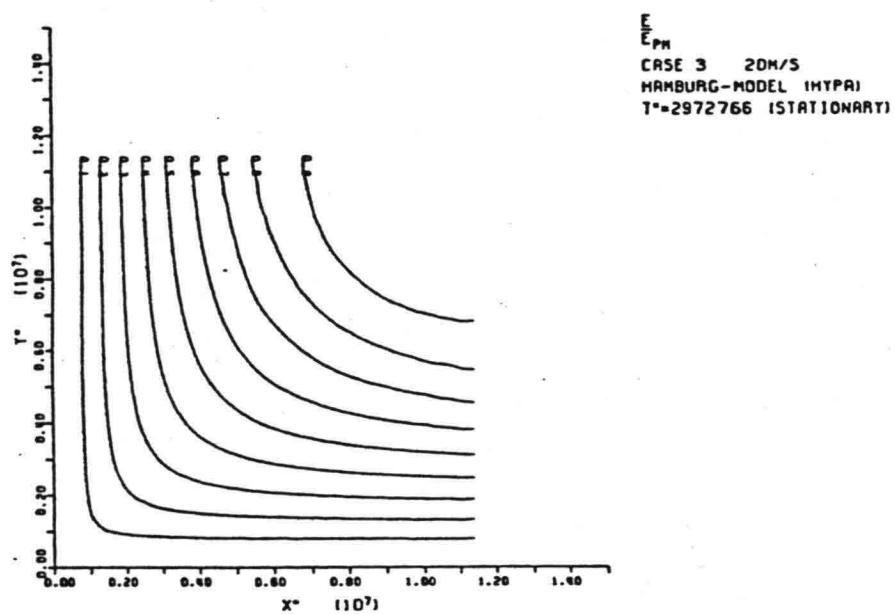
Vergelijken van fig.5.10 en 5.11 met de resultaten van de SWAMP-modellen figuren 5.12 t/m 5.15 laat zien dat het gedrag van het ECG-model vrij extreem is.



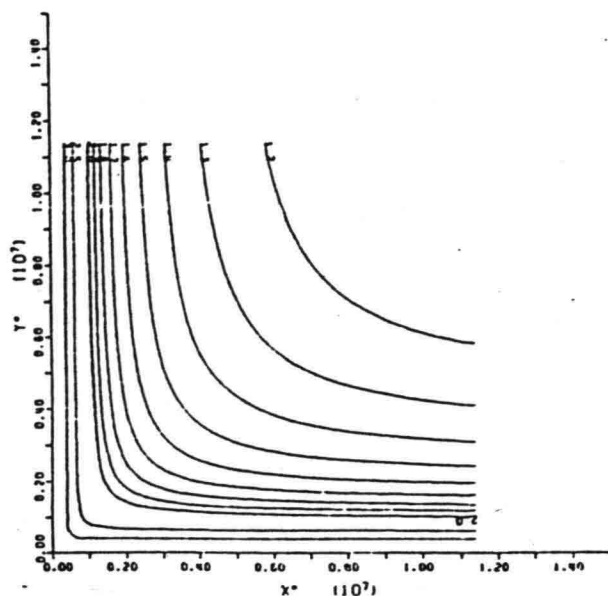
5.12 Contourlijnen E/E_{PM} TOHOKU-model.



5.13 Contourlijnen $f_m/f_{m\text{ PM}}$ TOHOKU-model.



5.14 Contourlijnen E/E_{PM} HYPA-model.



f_m/f_{mPM}
CASE 3 20M/S
HAMBURG-MODEL (HYPRI)
I* = 2972766 (STATIONARY)

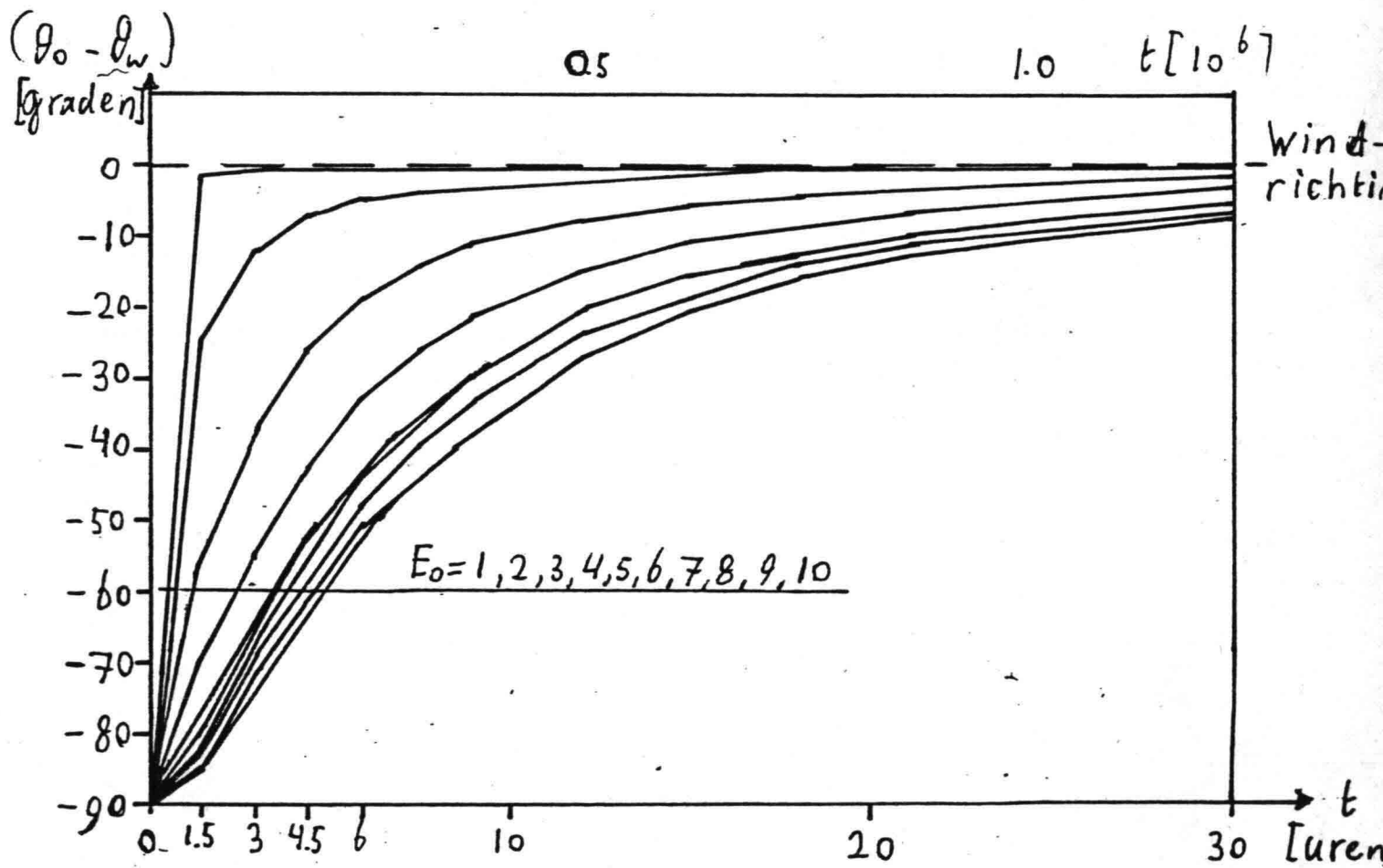
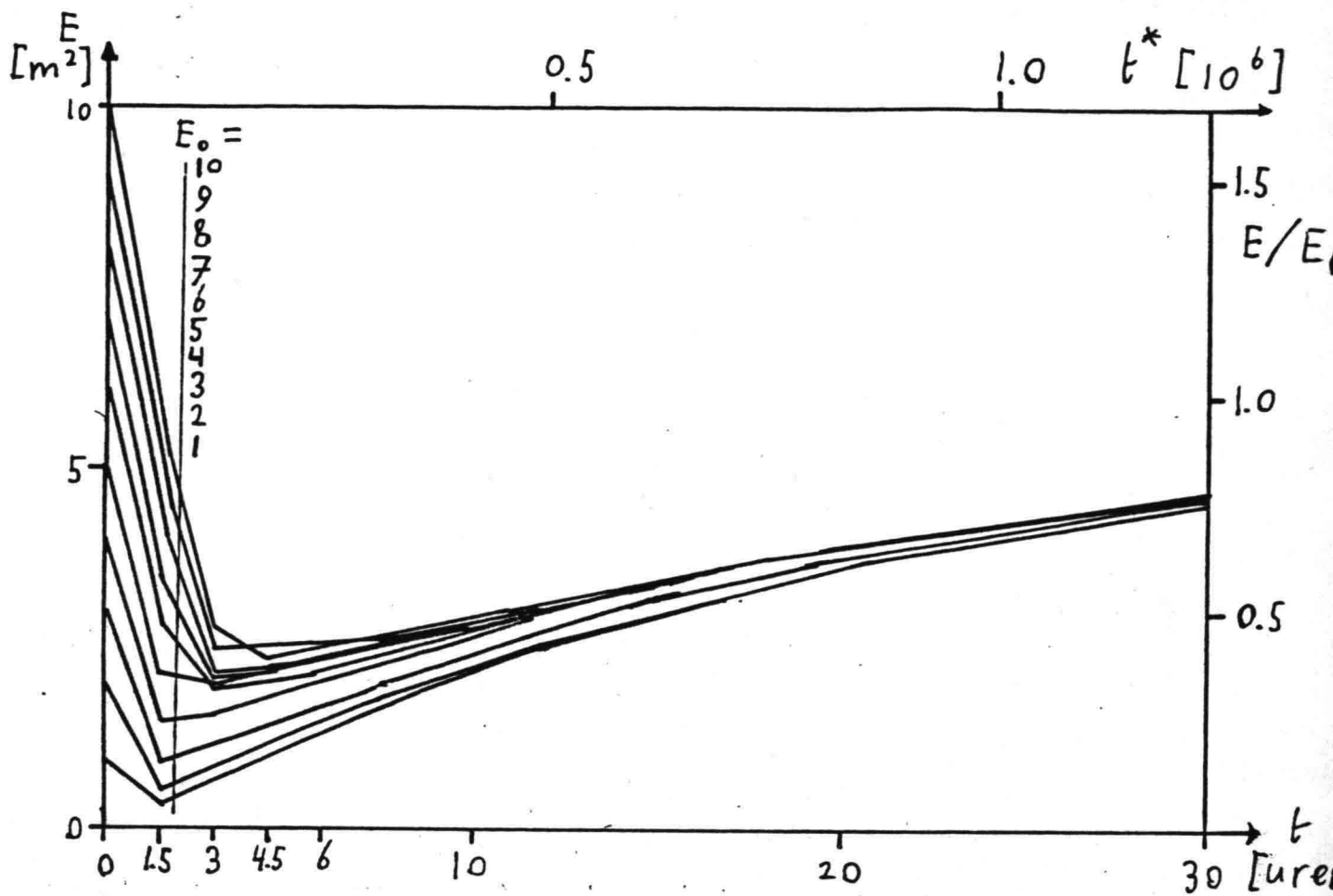
5.15 Contourlijnen f_m/f_{mPM} HYPA-model.

De energie op de diagonaal $x = y$ neemt bij de SWAMP-modellen minder sterk toe met de strijklengte dan bij het ECG-model. De resultaten van SWAMP-modellen geven een beeld te zien, dat ligt tussen het gedrag van het TOHOKU-model, fig. 5.12 en 5.13 en dat van het HYPA-model fig. 5.14 en 5.15. Het gedrag van het TOHOKU-model lijkt daarbij het meest op dat van het ECG-model.

5.3.3 90° draaiing van de wind. (Test 3)

Een uniform windveld met windsnelheid $u = 20$ m/s draait op $t = 0$ ineens 90°. De windsnelheid blijft daarbij gelijk. Gevolg van deze draaiing is dat de windrichting, θ_w , loodrecht op de voortplantingsrichting van het golfveld, θ_0 , komt te staan. Voor de ontwikkeling van het golfveld is in dit geval alleen de tijd van belang. De situatie is in wezen één dimensionaal. Berekend is, hoe het verloop van E en θ_0 in de tijd is. Dit is gebeurd met tien verschillende waarden van E op $t = 0$: E_0 is resp. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 en 10 m².

Het verloop van E als functie van t is weergegeven in fig. 5.16, dat van $\theta_0 - \theta_w$ als functie van t in fig. 5.17



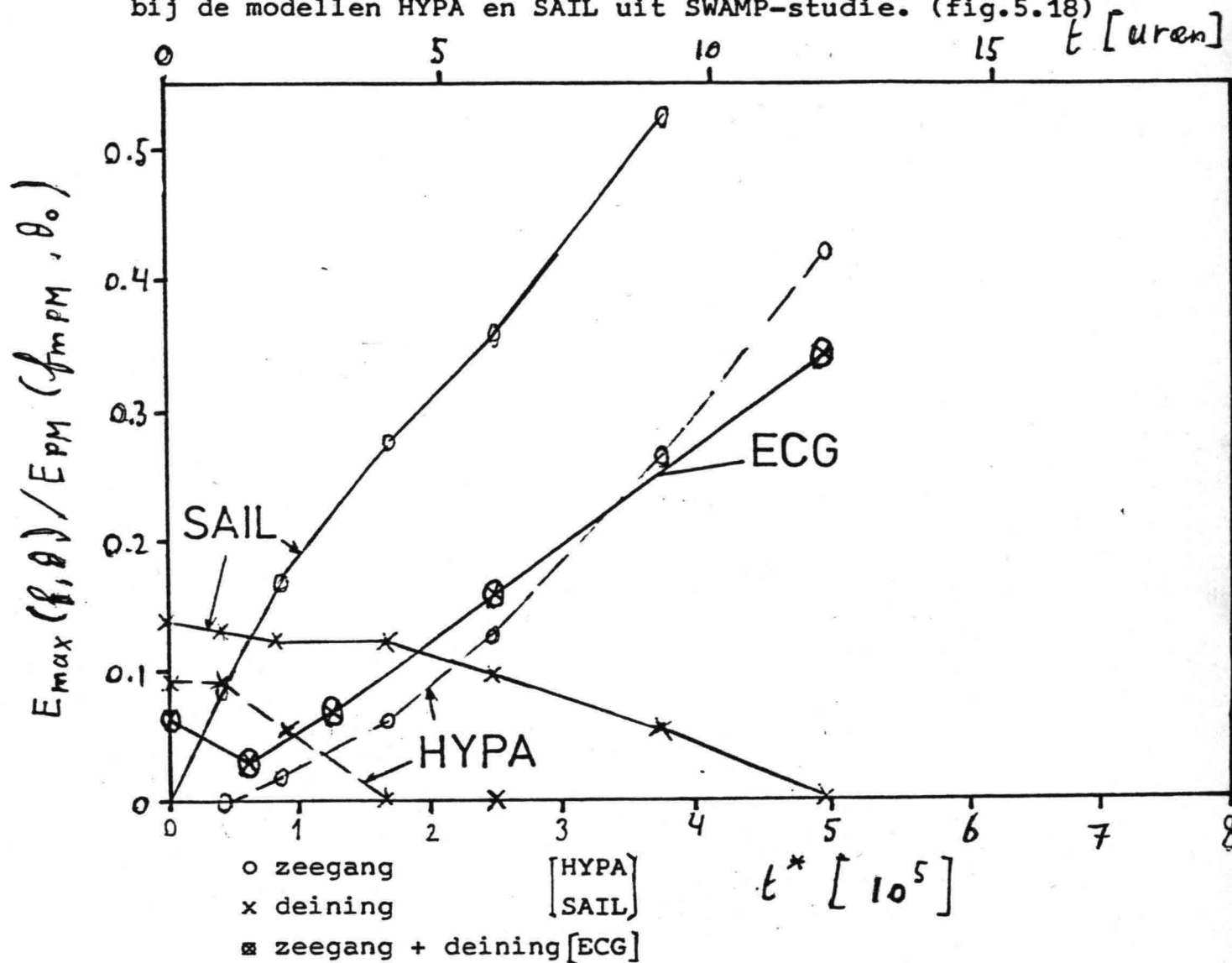
Bij de methode van berekening voor de golfparameters, zoals deze beschreven is in par. 3.2.2, wordt als $\cos(\theta_0 - \theta_w) = 0$ het gehele golfveld als deining beschouwd. In eerste instantie neemt dan de dimensieloze energieflex exponentieel af, terwijl tegelijkertijd ontwikkeling van zeegang plaatsvindt. Door de ontwikkeling van zeegang neemt $\theta_0 - \theta_w$ af.

In fig.5.16 is te zien dat na een afname van E , E vervolgens weer toeneemt in de tijd. Als $E_0 \geq 5 \text{ m}^2$ (vergelijk $E_{PM} = 6 \text{ m}^2$ bij $u = 20 \text{ m/s}$) wordt een minimum bereikt, dat nagenoeg onafhankelijk van E_0 tussen 2 en 2.5 m^2 ligt. Bij verder toenemen van t neemt E toe. Het verloop van E in de tijd is als $E_0 \geq 5 \text{ m}^2$ voor de verschillende waarden van E_0 nagenoeg gelijk. Bekijken we het verloop van $(\theta_0 - \theta_w)$, fig.5.17, dan blijkt dat alleen bij geringe E_0 , $E_0 \leq 2 \text{ m}^2$, het verschil tussen θ_0 en θ_w snel afneemt. Met toenemen van E_0 verloopt het bijdraaien trager. In de onderstaande tabel zijn de tijden die nodig zijn voor het bereiken van $(\theta_0 - \theta_w) = 45^\circ$ en van $(\theta_0 - \theta_w) = 22.5^\circ$ gegeven afhankelijk van E_0 :

| E_0 ($\theta_0 - \theta_w = 90^\circ$) (m^2) | t (in uren) nodig voor bereiken van: | |
|--|--|------------------------------------|
| | $\theta_0 - \theta_w = 45^\circ$ | $\theta_0 - \theta_w = 22.5^\circ$ |
| 1 | 0.7 | 1.0 |
| 2 | 1.0 | 1.6 |
| 3 | 2.4 | 5.0 |
| 4 | 4.2 | 8.6 |
| 5 | 5.6 | 11.5 |
| 6 | 5.8 | 11.5 |
| 7 | 6.0 | 11.5 |
| 8 | 6.5 | 13 |
| 9 | 7.0 | 14 |
| 10 | 7.0 | 14 |

In de SWAMP-studie is het testgeval dat in par. besproken wordt, doorgerekend met als beginvoorwaarde dat op t_0 $f_m = \frac{1}{2} \times f_{m \text{ PM}}$. Deze voorwaarde komt bij het ECG-model overeen met de eis dat

op t_0 $E = 0.7 \text{ m}^2$ bij $u = 20 \text{ m/s}$. Voor deze situatie is het verloop van de maximale energie van het tweedimensionale spectrum gedeeld door de maximale energie van het tweedimensionale PM-spectrum, $E_{\max}(f, \theta) / E_{\text{PM}}(f_{\text{m PM}}, \theta_0)$ bij het ECG-model vergeleken met dat bij de modellen HYPA en SAIL uit SWAMP-studie. (fig. 5.18)



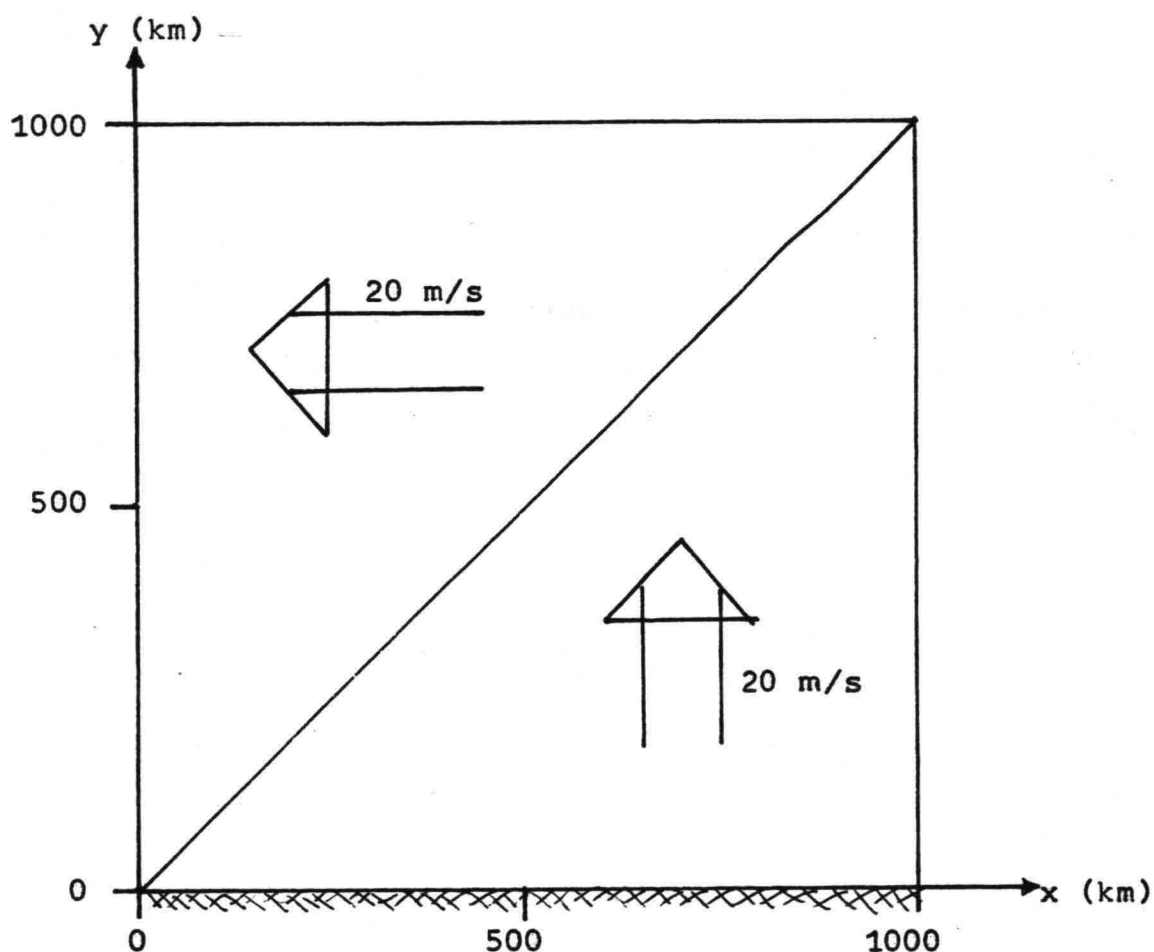
5.18 $E_{\max}(f, \theta) / E_{\text{PM}}(f_{\text{m PM}}, \theta_0)$ als functie van t .

Bij deze SWAMP-modellen worden deining en zeegang gescheiden behandeld. Zodoende zijn in fig. 5.18 per model twee lijnen getekend. Een vergelijk met de modellen HYPA en SAIL is gemaakt omdat bij deze twee modellen de deining na ± 12 uur weer volledig in de zeegang is opgenomen. In de figuur is te zien dat de energie van de zeegang bij de modellen HYPA en SAIL sneller toeneemt met t dan bij het ECG model. Dit is o.a. een gevolg van het opnemen van energie van de

deining door de zeegang bij HYP A en SAIL. Bij het ECG-model gaat eenmaal afgescheiden deining voor het model verloren. Een deel van de deining wordt in het zeegangsspectrum vastgehouden.

5.3.4 Diagonaal front. (Test 4)

Over een "vierkante" zee van 1000×1000 km loopt een front diagonaal van de zuid-west hoek naar de noord-oost hoek. Ten zuiden van het front waait de wind met 20 m/s in de noordrichting. Ten noorden van het front waait de wind eveneens met 20 m/s , echter naar het westen. (Zie fig.5.19).



5.19 Windveld test 4

De x -richting is in oostelijke richting gekozen, de y -richting naar het noorden. De zuidelijke rand van het model, $y=0$, is als kust gedefinieerd en hier worden karakteristieken gestart. Op $t=0$ wordt de berekening gestart met een kalme zee; $E=0$ in het hele model. De berekening wordt gestopt als een stationaire

toestand bereikt is.

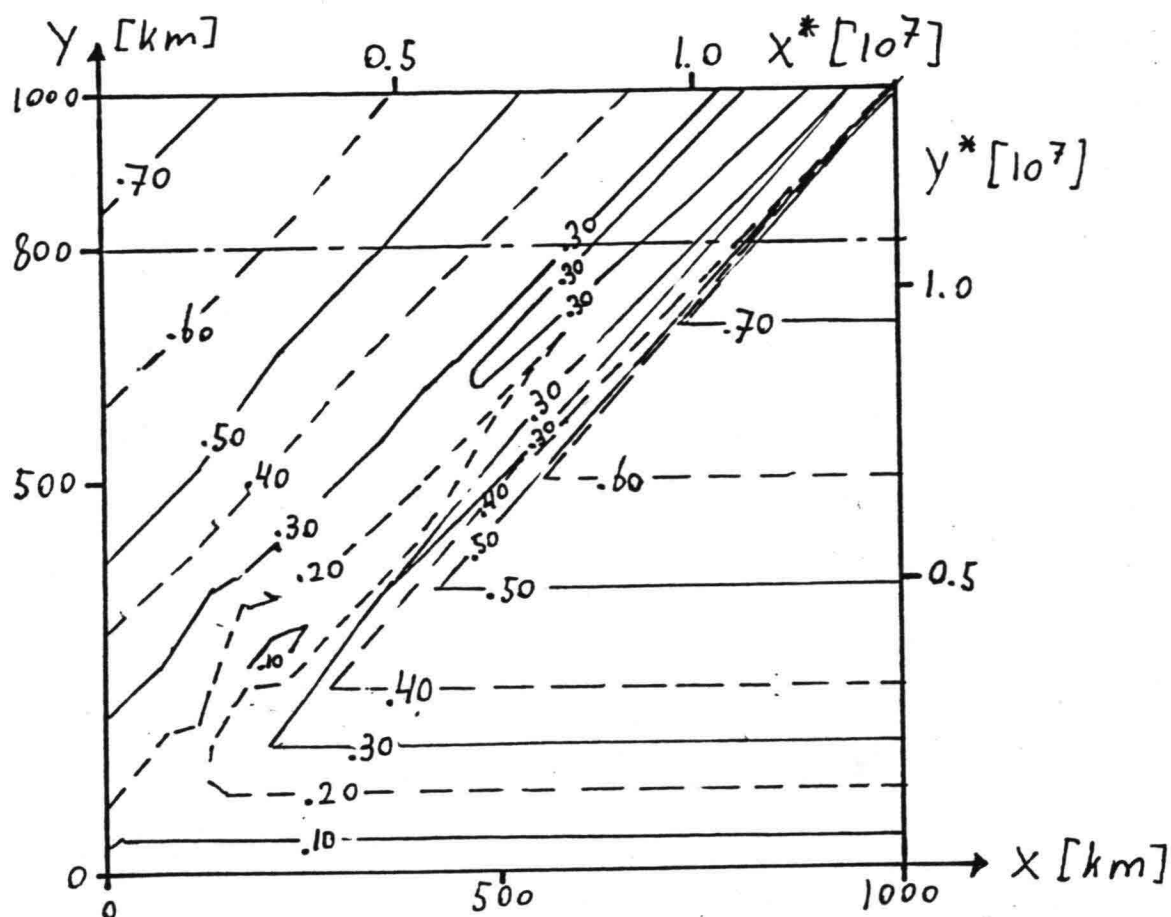
Deze test is te zien als een uitbreiding van de vorige test, 90° draaiing van de wind, van een één dimensionale situatie tot een tweedimensionale. Voor het gedrag van het model is het in dit geval belangrijk hoeveel deining uit het model verwijderd wordt. Veel deining verwijderen veroorzaakt snel bijdraaien van het golfveld over het front, waarbij E sterk afneemt. Weinig afname van deining geeft langzaam bijdraaien, terwijl E minder sterk afneemt. Bij een vergelijking met andere modellen is het belangrijk zich te realiseren, dat bij het ECG-model snel bijdraaien van het golfveld gekoppeld is aan sterk afnemen van E .

Deze test is gebruikt om tot een keuze voor de uitdrukking voor \tilde{F}_{relax} te komen. De gevolgen van de gedane keuze van \tilde{F}_{relax} worden besproken aan het eind van deze paragraaf.

De resultaten van de test zijn weergegeven in de figuren 5.20 t/m 5.24:

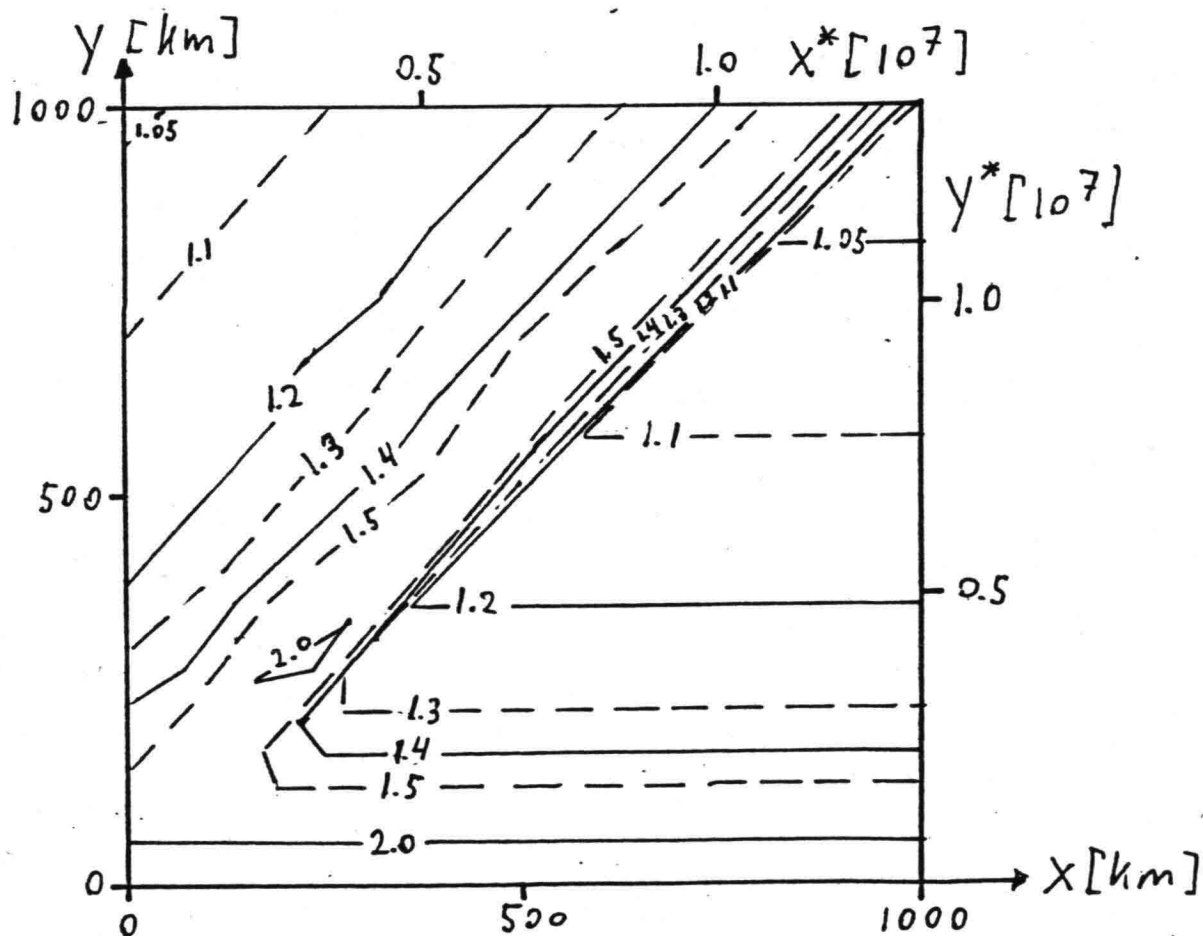
- Fig.5.20 is een contourplot van E/E_{PM} .

In de figuur is te zien dat de energie over het front sterk afneemt; met ruim de helft. De contourlijnen lopen dicht na het front niet recht, maar vertonen onregelmatigheden. Deze onregelmatigheden nemen af als de afstand tot het front toeneemt. Vanaf $E/E_{\text{PM}} = 0.50$ zijn de lijnen nagenoeg recht en lopen praktisch evenwijdig aan het front. In de rechter bovenhoek blijft E/E_{PM} over enige afstand schommelen rond de waarde 0.30. Dit is een gevolg van numerieke onnauwkeurigheden. Verkleinen van de tijdstap zal de schommelingen doen verdwijnen.



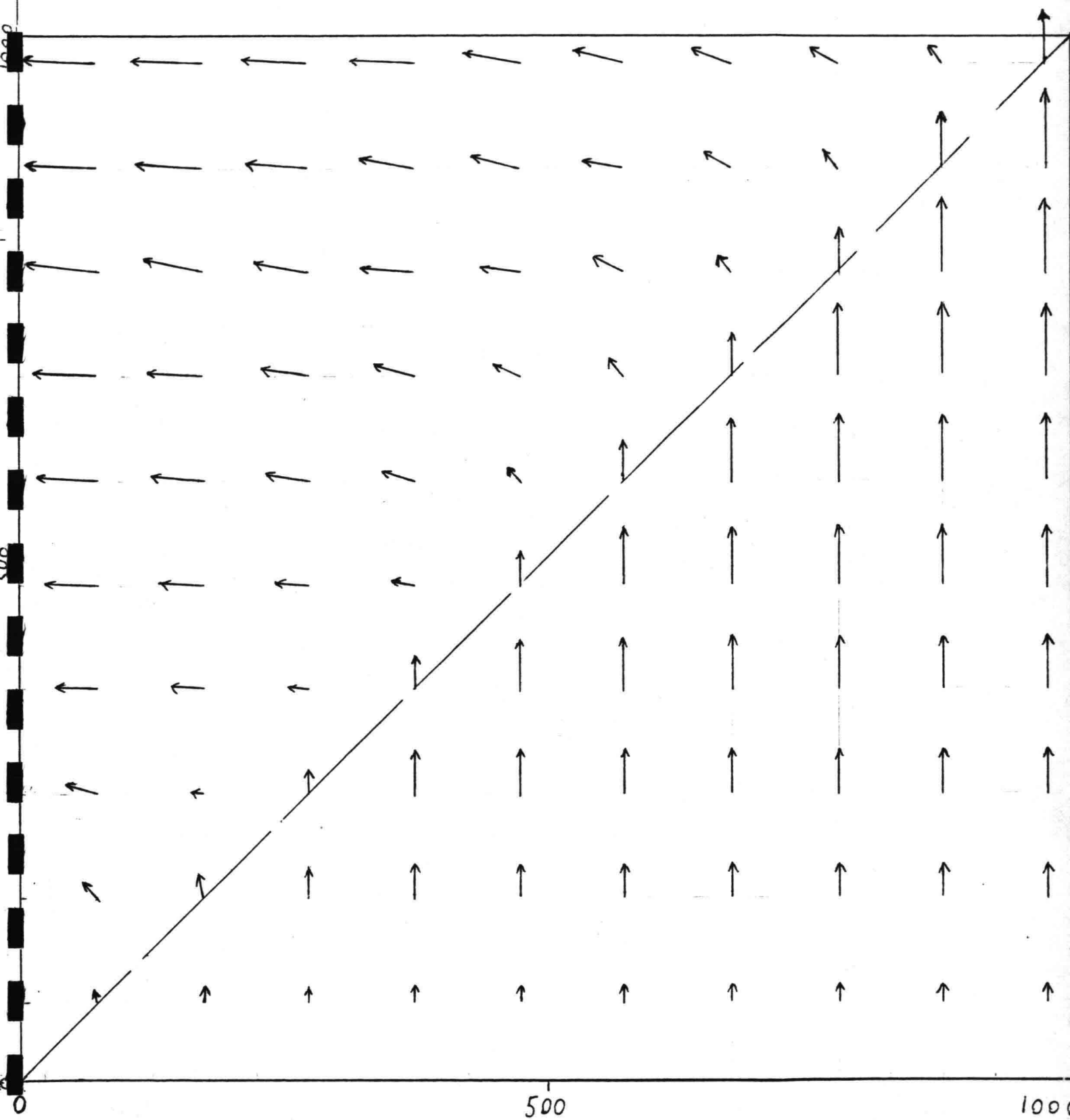
5.20 Contourlijnen E/E_{PM} ECG-model

- Figuur 5.21 is een contourplot van $f_m/f_{m PM}$.



5.21 Contourlijnen $f_m/f_{m PM}$ ECG-model

← : $E/E_{PM} = 1$



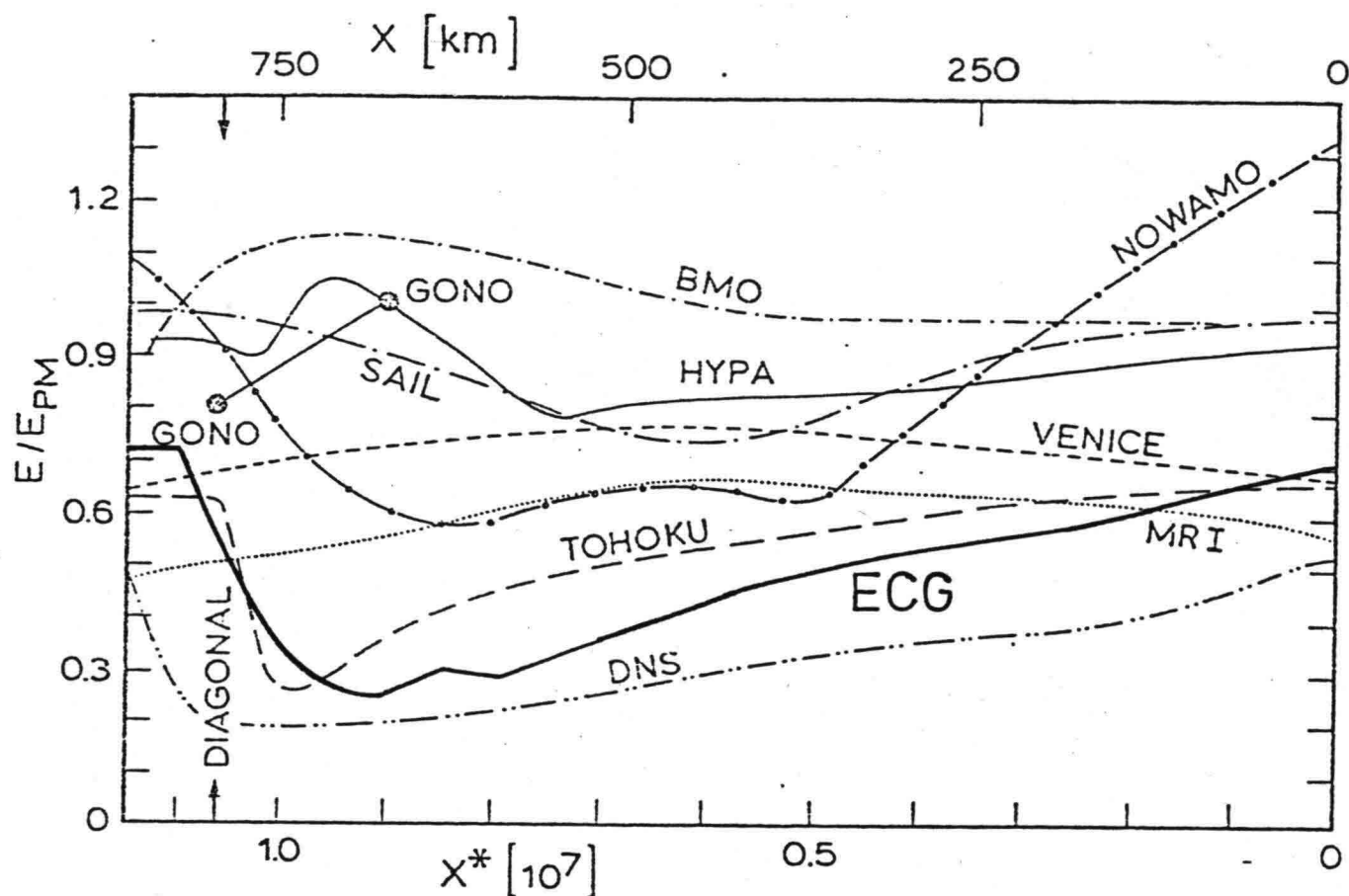
5.22 Vectorplot E/E_{PM} en θ_0

Figuur 5.21 is goed in overeenstemming met de plot voor E/E_{PM} . De schommelingen in de rechter bovenhoek zijn in deze figuur niet te zien door de grote stapgrootte van $f_m / f_{m PM}$ van 2 naar 1.5

- Fig.5.22 is een vector diagram.

In deze figuur zijn E/E_{PM} en θ_0 tesamen weergegeven door pijlen met lengte E/E_{PM} en richting θ_0 .

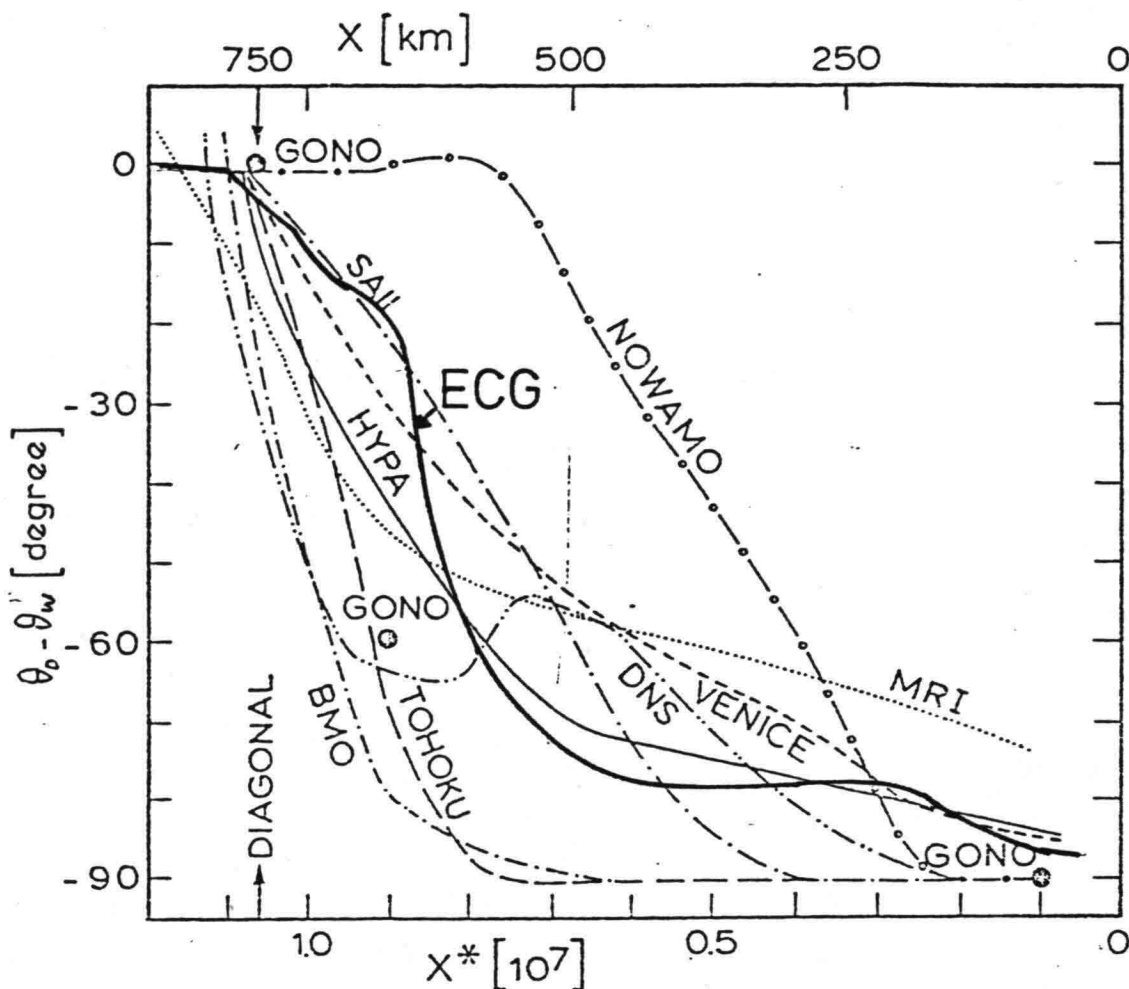
- Fig.5.23 geeft het verloop van E/E_{PM} als functie van x bij een vaste waarde voor y ; $y = 800$ km.



5.23 E/E_{PM} als functie van x bij $y = 800$ km.

In fig.5.23 zijn tevens de resultaten van de SWAMP-modellen getekend. In de figuur is te zien dat het ECG-model lagere waarden voor E/E_{PM} geeft dan de meeste andere modellen. Dit is o.a. een gevolg van het geheel verdwijnen van een deel van de deining uit het model.

- Fig.5.24 geeft het verloop van $\theta_0 - \theta_w$ als functie van x , voor $y = 800$ km.

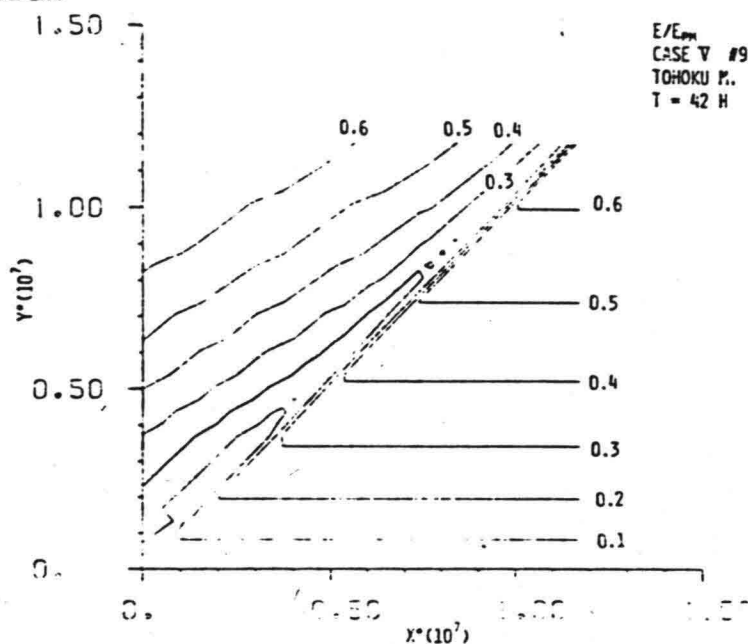


5.24 $\theta_0 - \theta_w$ als functie van x bij $y = 800$ km.

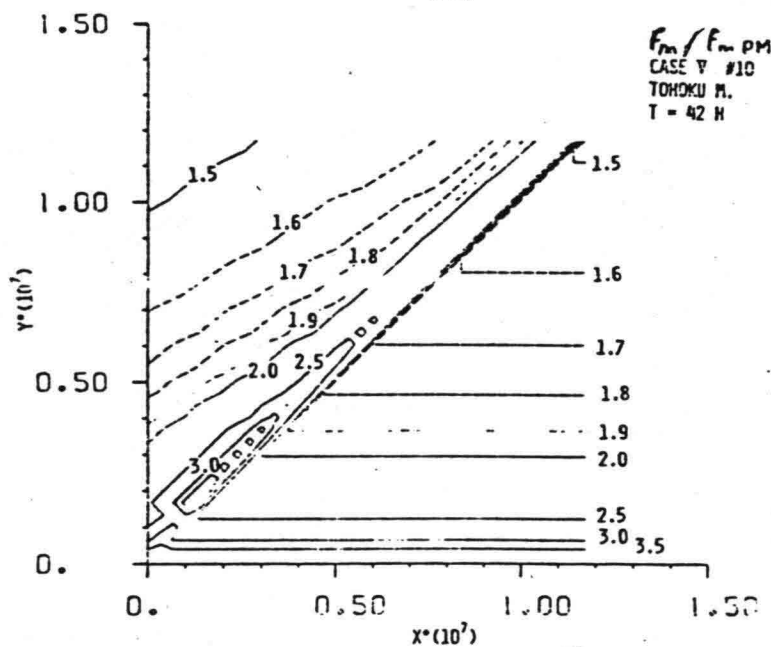
De kromme van het ECG-model valt ergens midden in de bundel SWAMP krommen. Alle modellen verschillen, wat het verloop van $\theta_0 - \theta_w$ als functie van x betreft, overigens erg veel van elkaar. Vergelijken van de resultaten van het ECG-model met die van alle modellen uit de SWAMP-studie laat zien; dat wat betreft de snelheid waarmee θ_0 bijdraait na het front het ECG-model het meest overeenkomt met de modellen HYPA en SAIL. Vergelijk de vectorplots; fig.5.22, 5.30 en 5.33 en fig.5.24. De contourplots van E/E_{PM} en $f_m/f_{m PM}$, fig.5.20 en 5.21, komen echter meer overeen met die van het TOHOKU-model, fig.5.25 en 5.26.

(Voor de volledigheid zijn ook de contourplots van de modellen HYPA en SAIL fig.5.28, 5.29, 5.31 en 5.32 en de vectorplot van het TOHOKU-model fig.5.27 toegevoegd).

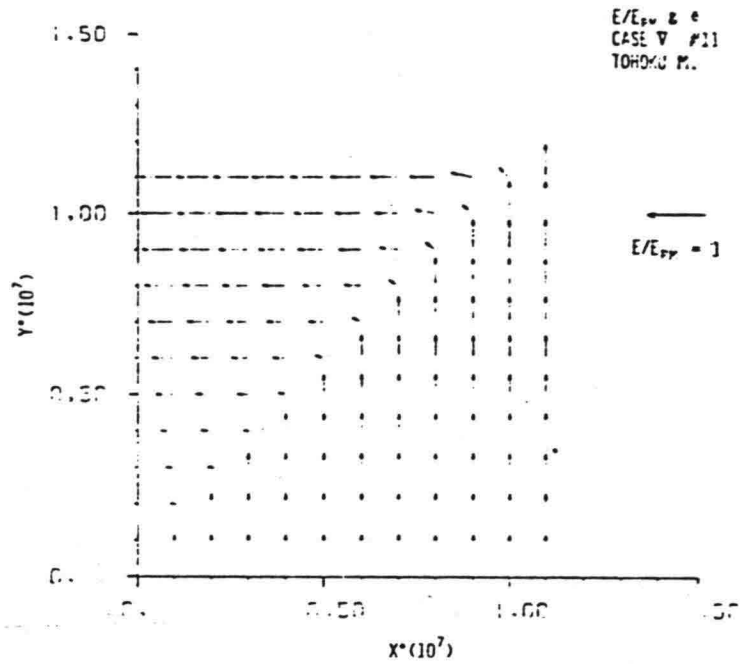
Het gedrag van het ECG-model in deze test is te beïnvloeden door de keuze van de uitdrukking van \tilde{F}_{relax} . Aan de invloed van \tilde{F}_{relax} is de rest van deze paragraaf gewijd.



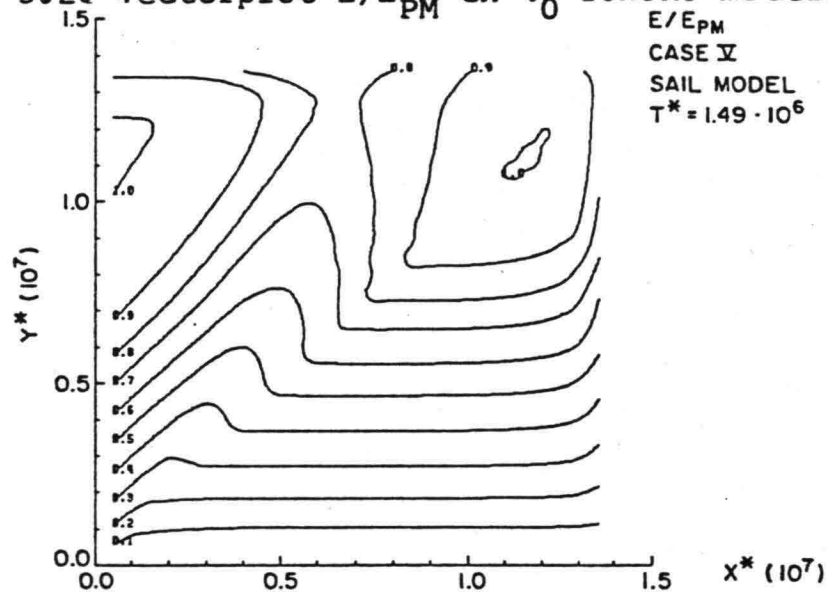
5.25 Contourlijnen E/E_{PM} Tohoku-model.



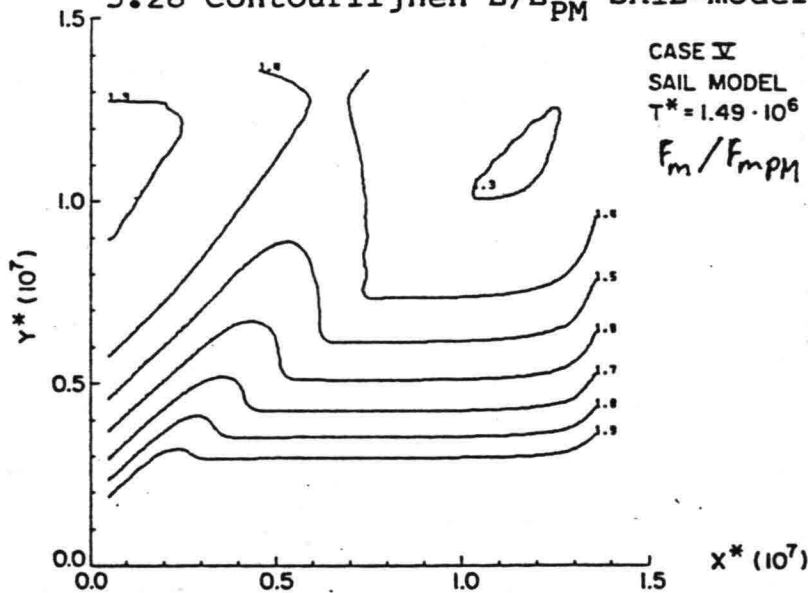
5.26 Contourlijnen $f_m/f_{m PM}$ TOHOKU-model.



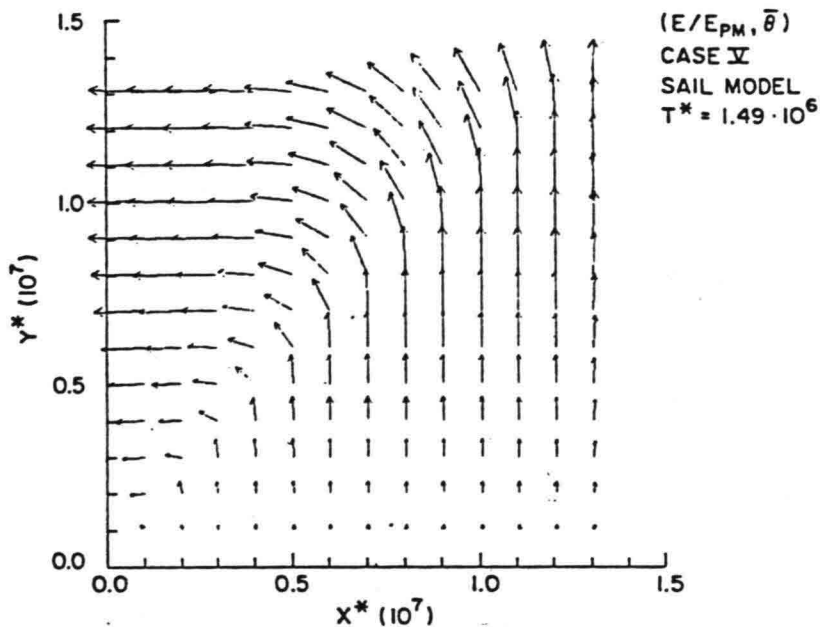
5.27 Vectorplot E/E_{PM} en θ_0 TOHOKU-model.



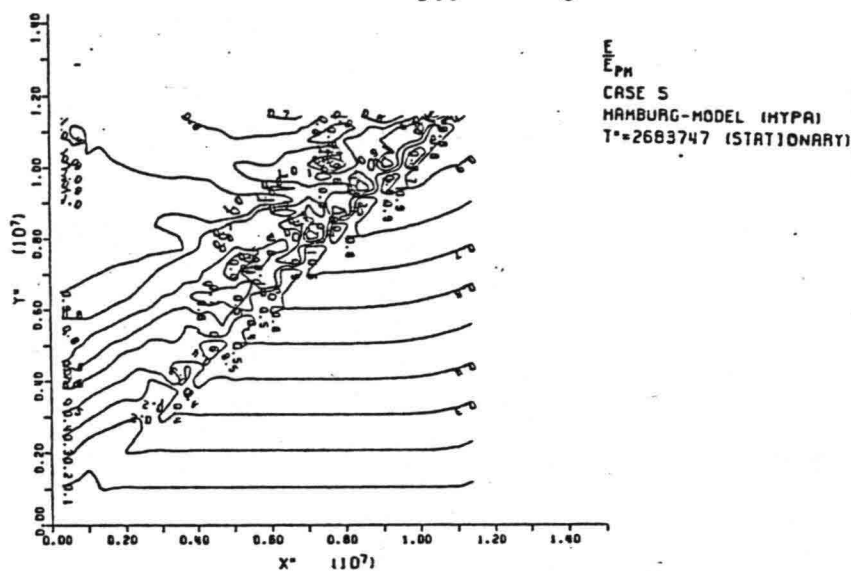
5.28 Contourlijnen E/E_{PM} SAIL-model.



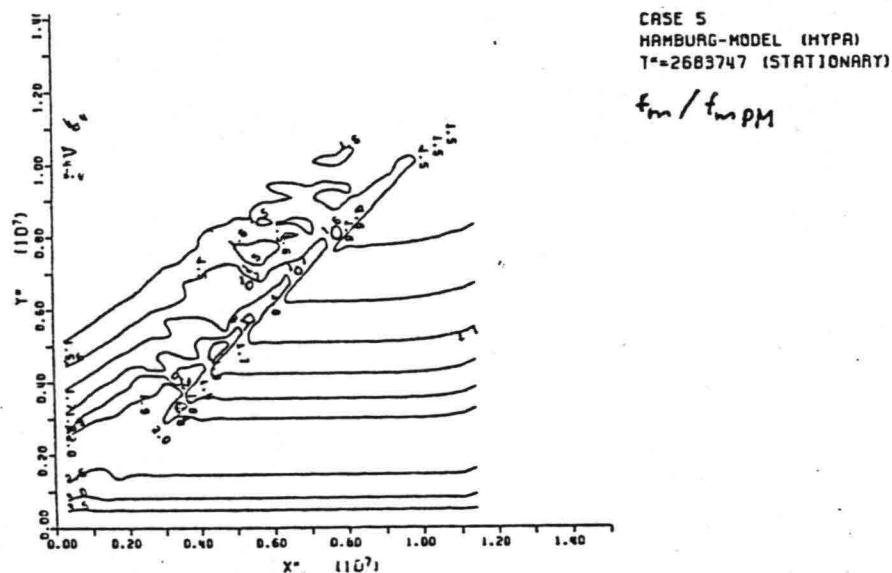
5.29 Contourlijnen f_m/f_{mPM} SAIL-model.



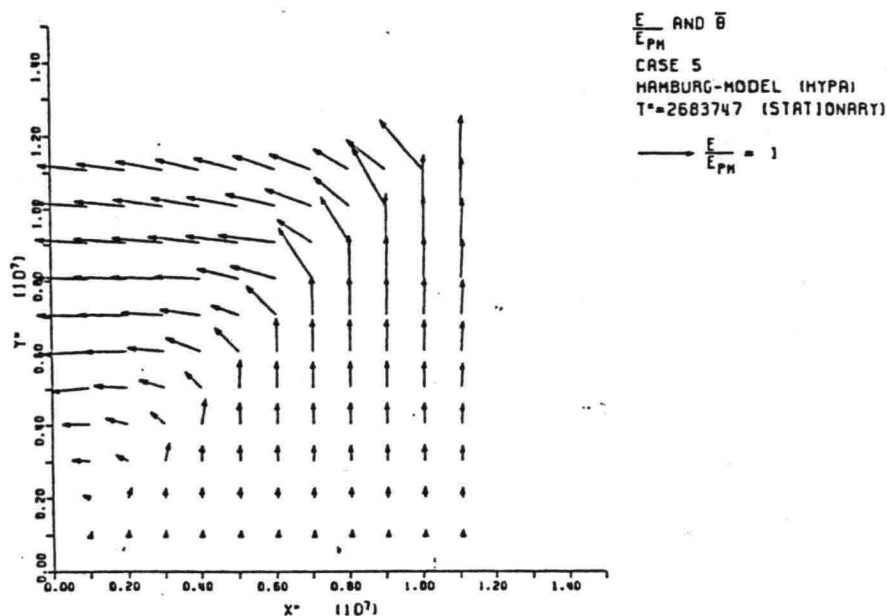
5.30 Vectorplot E/E_{PM} en θ_0 SAIL-model.



5.31 Contourlijnen E/E_{PM} HYPA-model.



5.32 Contourlijnen f_m/f_{mPM} HYPA-model



5.33 Vectorplot E/E_{PM} en θ_0 HYPA-model

Relaxatie afstand \tilde{F}_{relax}

In het algemeen zal de waarde van \tilde{F}_{relax} relatief klein moeten zijn, omdat het model niet in staat is deining goed te beschrijven. Alleen bij plotseling of plaatselijk sterk afnemen van de windsnelheid moet de waarde van \tilde{F}_{relax} relatief groot zijn, om te voorkomen dat dan praktisch alle energie van het golfveld verdwijnt.

Om aan te geven wat de gevolgen zijn van de gedane keuzes voor de constanten, $const = 7000$ en $p = 3$ zie par. 5.2, is berekend hoe groot de relaxatie afstand is afhankelijk van de windsnelheid. Hieronder wordt aangegeven hoe de relaxatie afstand verandert als de waarden van $const.$ en p anders gekozen worden en hoe de ontwikkeling van het golfveld daardoor beïnvloed wordt.

Bij een waarde van $E = 3 \text{ m}^2$ (dit is de helft van de energie van de volgroeide zeevang bij $u = 20 \text{ m/s}$) is de relaxatie afstand afhankelijk van de windssnelheid berekend voor verschillende waarden van p . De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel:

$$E = 3 m^2 \Rightarrow c_g (f_m) = 10.8 \text{ m/s}^*$$

$$q = 0.8 \Rightarrow c_g = 31.1 \text{ km/uur}$$

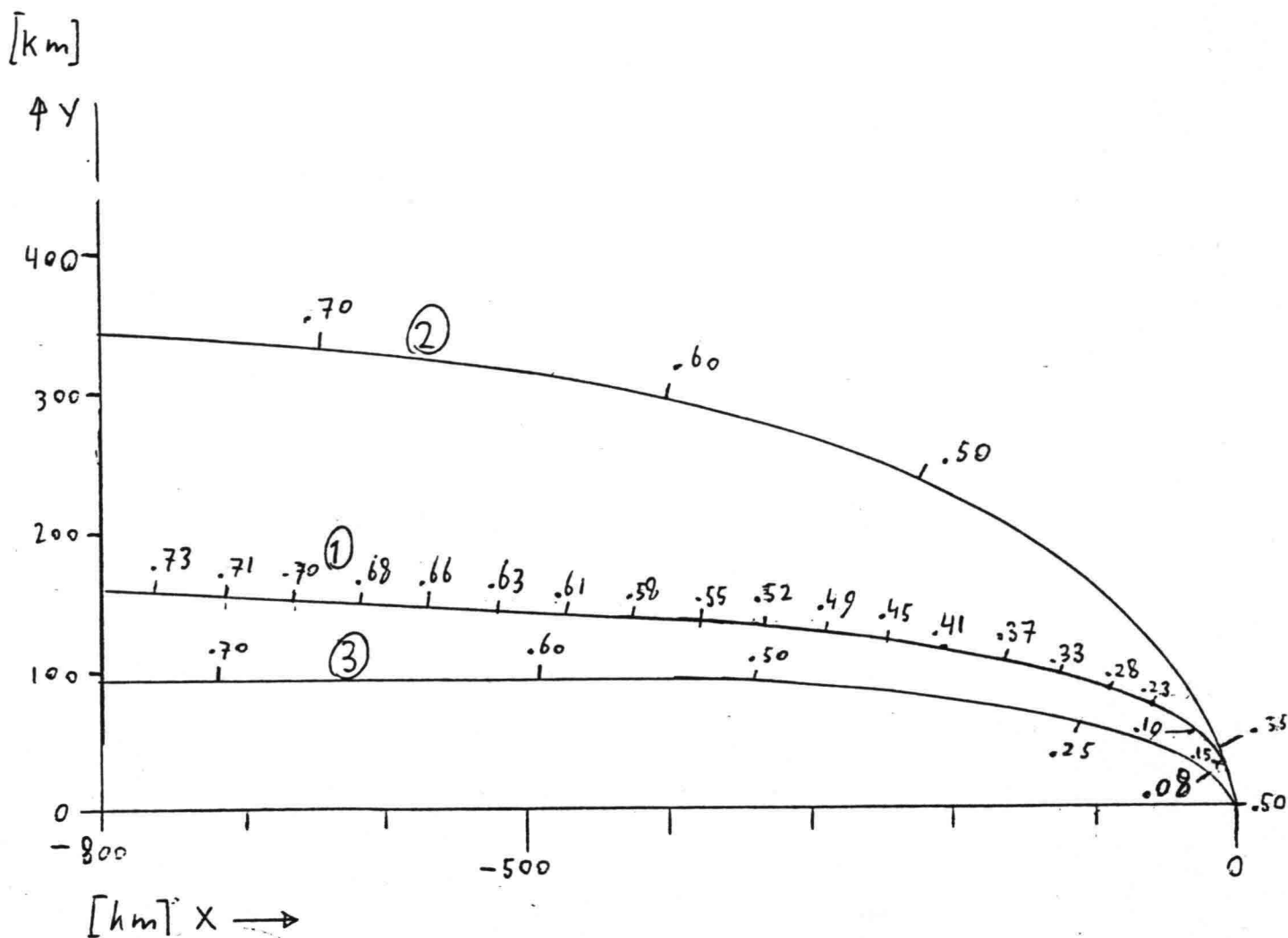
$$\text{const.} = 7000$$

| E/E_{PM} | U | $\bar{p} = 3$ | | $p = 2$ | $p = 4$ |
|-----------------|---------|----------------------------|--------------------|--|--|
| | | \tilde{F}_{relax} | F_{relax} | $\frac{F_{\text{relax}}}{F_{\text{relax}} \text{ bij } p=3}$ | $\frac{F_{\text{relax}}}{F_{\text{relax}} \text{ bij } p=3}$ |
| 8×10^8 | 0.1 m/s | 8.84×10^9 | 9000 km | $1/100$ | 100 |
| 8×10^4 | 1 m/s | 8.84×10^6 | 900 km | $1/10$ | 10 |
| 8 | 10 m/s | 8.84×10^3 | 90 km | 1 | 1 |
| 0.50 | 20 m/s | 1.11×10^3 | 45 km | 2 | 0.5 |
| 0.10 | 30 m/s | 328 | 30 km | 3 | 0.3 |

Een verandering in de keuze van de const. werkt lineair door in de grootte van \tilde{F}_{relax} , zodat:

$$\tilde{F}_{\text{relax}} = \frac{\text{const.}}{7000} \times (\tilde{F}_{\text{relax}} \text{ bij const.} = 7000)$$

* De waarde van 10.8 m/s is correct bij een volgroeid spectrum. Als de windsnelheid zoveel toeneemt, dat $E < E_{\infty}$ zal bij de gevolgde benadering voor de berekening van c_g , c_g wat afwijken van 10.8 m/s. Voor de berekening is aangenomen dat in dat geval $c_g \approx 10.8 \text{ m/s}$.



5.34 E/E_{PM} uitgezet langs een karakteristiek die berekend is voor verschillende uitdrukkingen van \tilde{F}_{relax} .

In fig.5.34 is aangegeven hoe de ontwikkeling van het golfveld door de grootte van relaxatie afstand wordt beïnvloed. Daartoe is het verloop van E langs een karakteristiek berekend voor een golfveld dat start in punt $x = 0$, $y = 0$ in fig.5.34 met als beginvoorwaarden:

- $E = E_0 = 3 \text{ m}^2$; $E/E_{PM} = 0.5$
- voortplantingsrichting van het golfveld evenwijdig aan de y -as; $\theta_0 = 90^\circ$
- windrichting in negatieve x -richting; $\theta_w = 180^\circ$
- windsnelheid $u = 20 \text{ m/s}$

De middelste lijn, lijn 1, in fig.5.34 geeft het verloop van de karakteristiek als $\text{const.} = 7000$ en $p = 3$.

De bovenste lijn, lijn 2, in fig. 5.34 geeft aan hoe de karakteristiek bij benadering* verloopt als $\text{const} = 2 \times 7000$ en $p = 3$. De onderste lijn, lijn 3, in fig 5.34 geeft bij benadering* het verloop van de karakteristiek als $\text{const} = \frac{1}{2} \times 7000$ en $p = 3$.

De uiteindelijke keuze van de uitdrukking voor \tilde{F}_{relax} , met $\text{const} = 7000$ en $p = 3$ (lijn 1 in fig. 5.34) is gebaseerd op de overweging dat deining niet te lang moet worden vastgehouden in het model en op een vergelijking met de resultaten van test 4 van het ECG-model met de SWAMP-modellen. Achteraf blijkt met de gedane keuze voor \tilde{F}_{relax} het gedrag van het ECG-model overeenstemming te vertonen met de modellen SAIL en HYPA. vergelijk de figuren 5.22, 5.30 en 5.32.

Wat de gevolgen zijn van een andere keuze van \tilde{F}_{relax} is te zien als het verloop van de karakteristieken in fig. 5.34 beschouwd wordt. Als const toeneemt (lijn 2 in fig. 5.34) zal het golfveld na passeren van het front langzamer bijdraaien, terwijl de energie minder sterk afneemt. Het gedrag van het model gaat dan meer lijken op dat van b.v. het MRI-model, fig 5.35.

BY T.UJI (M.R.I.)

CASE 5

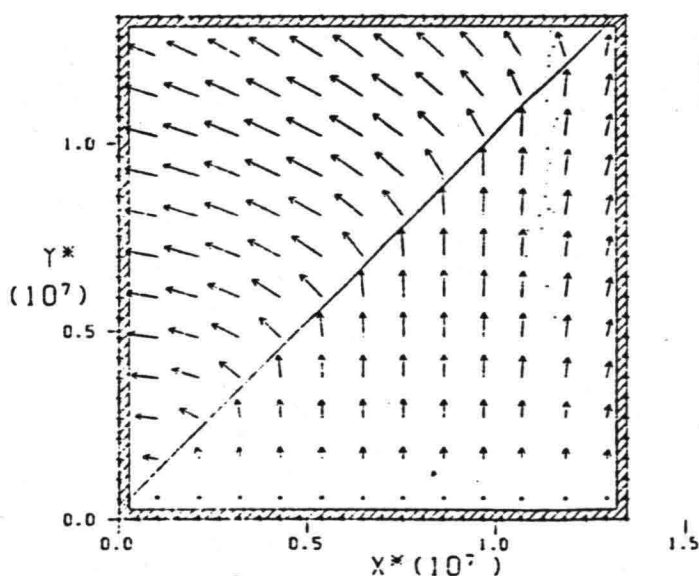
DX : 40 KM. DT : 1.0 HOUR
IMAX=26 : JMAX=26
X EXTENT:0-1000 KM
Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTH
BELOW THE FRONT

EAST
ABOVE THE FRONT
VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME : 72 HOURS
TM IS 2972764.

ARROW LENGTH : E/E_{PM}
DIRECTION=θ

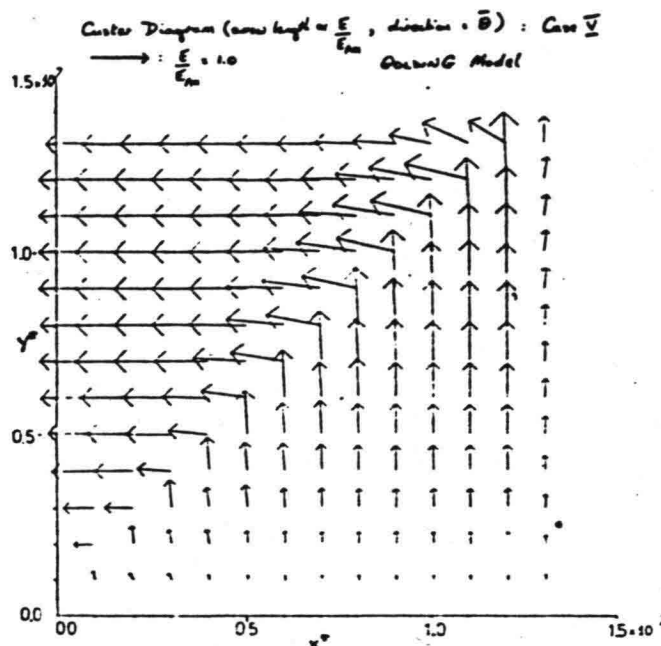


5.35 Vectorplot E/E_{PM} en θ_0 MRI-model

* Lijn 2 en 3 zijn berekend met een eerdere versie van het programma met kleine, maar hier ondergeschikte verschillen met de uiteindelijke versie.

Als const afneemt is het tegengestelde het geval en zal het ECG-model nog sterker het karakter van het TOHOKU-model krijgen, zie fig. 5.27.

Een gedrag waarbij het golfveld snel bijdraait terwijl E weinig afneemt, zoals bij b.v. het BMO-model, fig 5.36, is bij het ECG-model niet mogelijk.

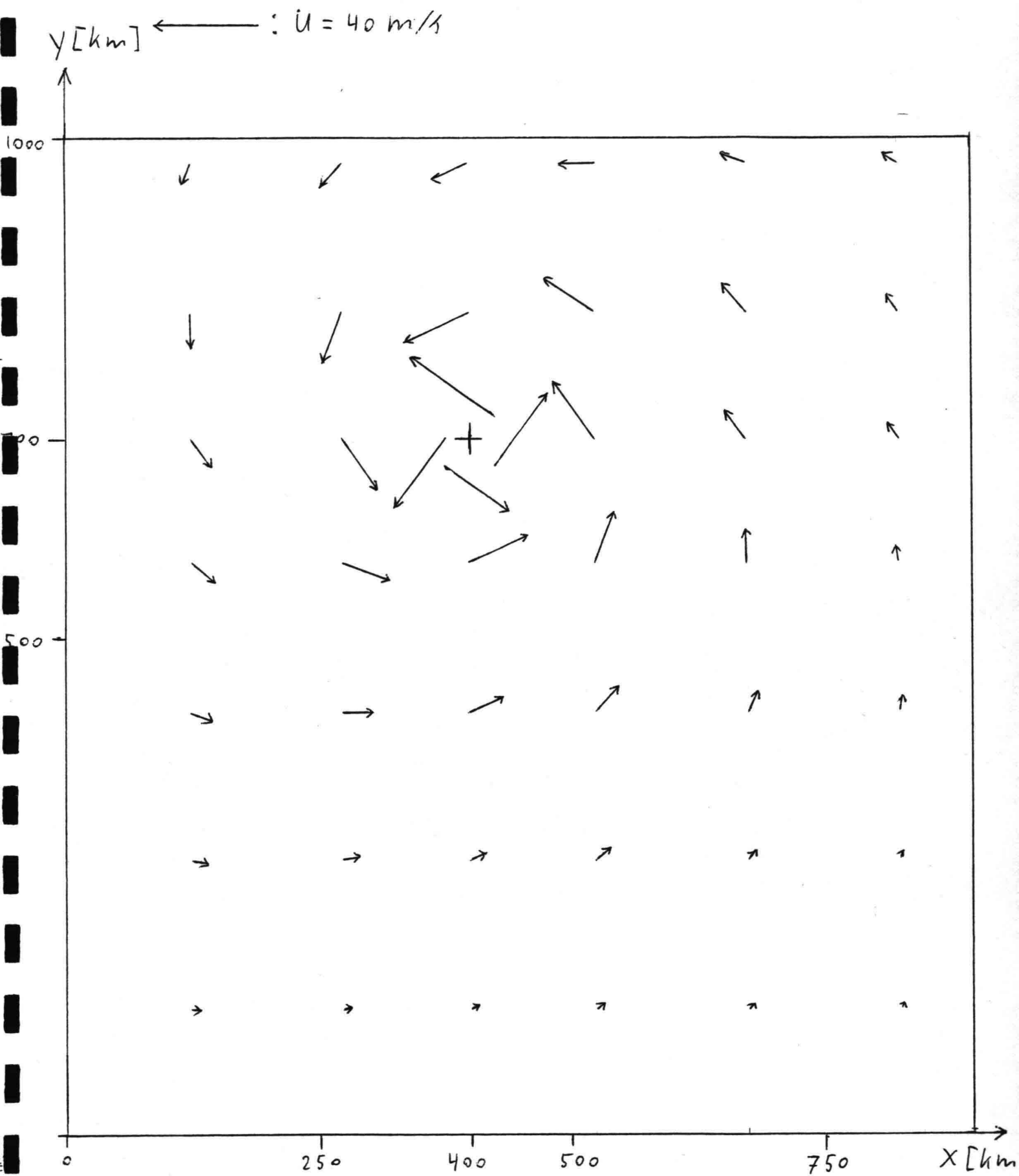


5.36 Vectorplot E/E_{PM} en θ_0 BMO-model.

5.3.5 Stationaire orkaan. (Test 5)

Voor deze test is een analytisch windveld van een stationaire orkaan gebruikt met een windsnelheidsverdeling, die in het NO-quadrant grotere windsnelheden heeft dan in het ZW-quadrant. De maximale windsnelheid, u_{max} , is 41.5 m/s en deze wordt bereikt op een afstand van 33 km ten oosten en 22 km ten noorden van het oog van de orkaan. Het windveld is beschreven in bijlage IV en weergegeven in fig. 5.37.

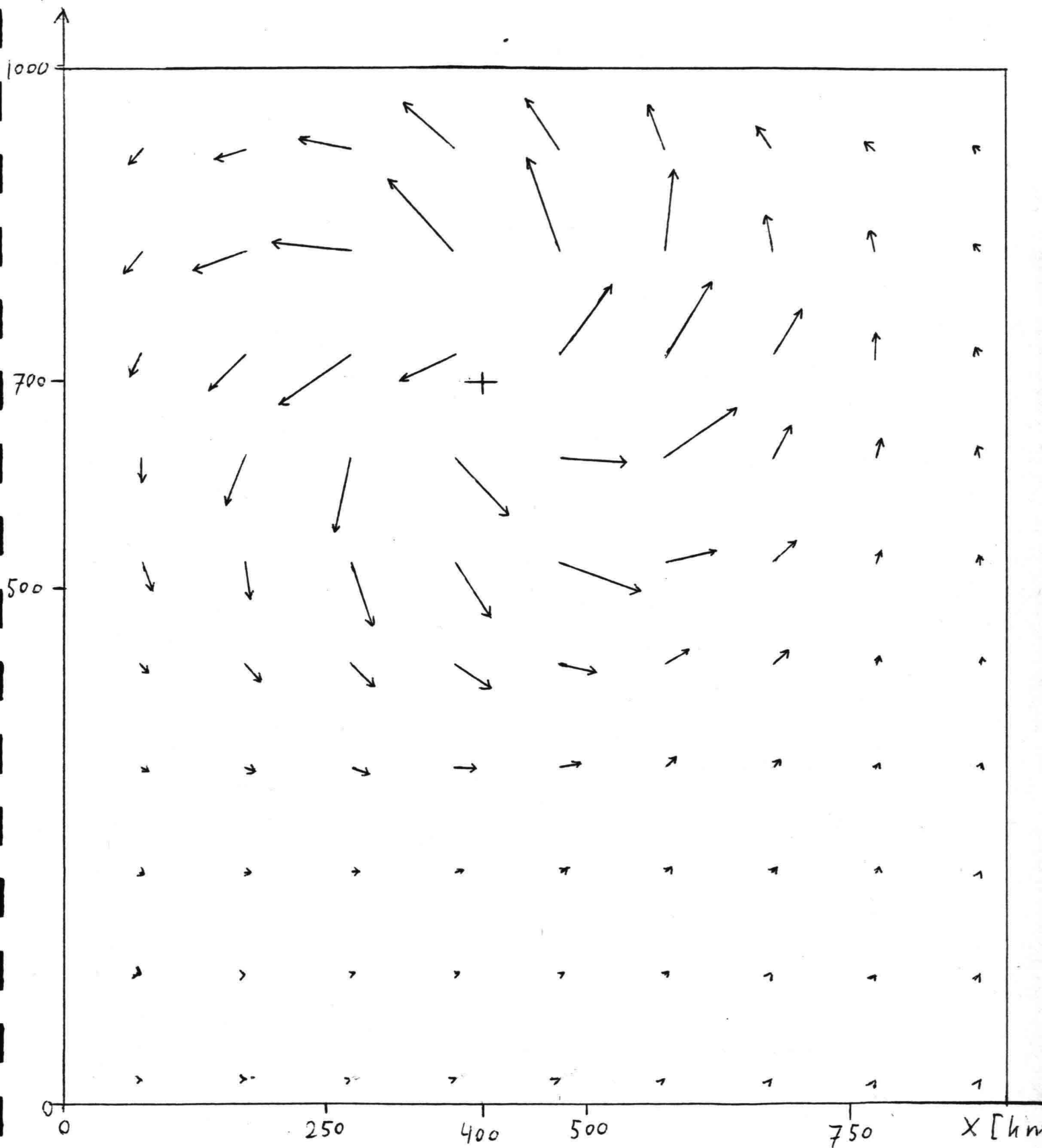
Het modelgebied is weer de vierkante zee van 1000 x 1000 km met de x-as in oostrichting en de y-as in noordrichting. Het oog van de orkaan bevindt zich in het punt $x = 400$ km, $y = 700$ km. Het model wordt gestart met als beginsituatie een kalme zee; $H_s = 0$ in het hele modelgebied ($H_s = 4\sqrt{E}$). Aan de randen van het model worden geen karakteristieken gestart. Het starten van



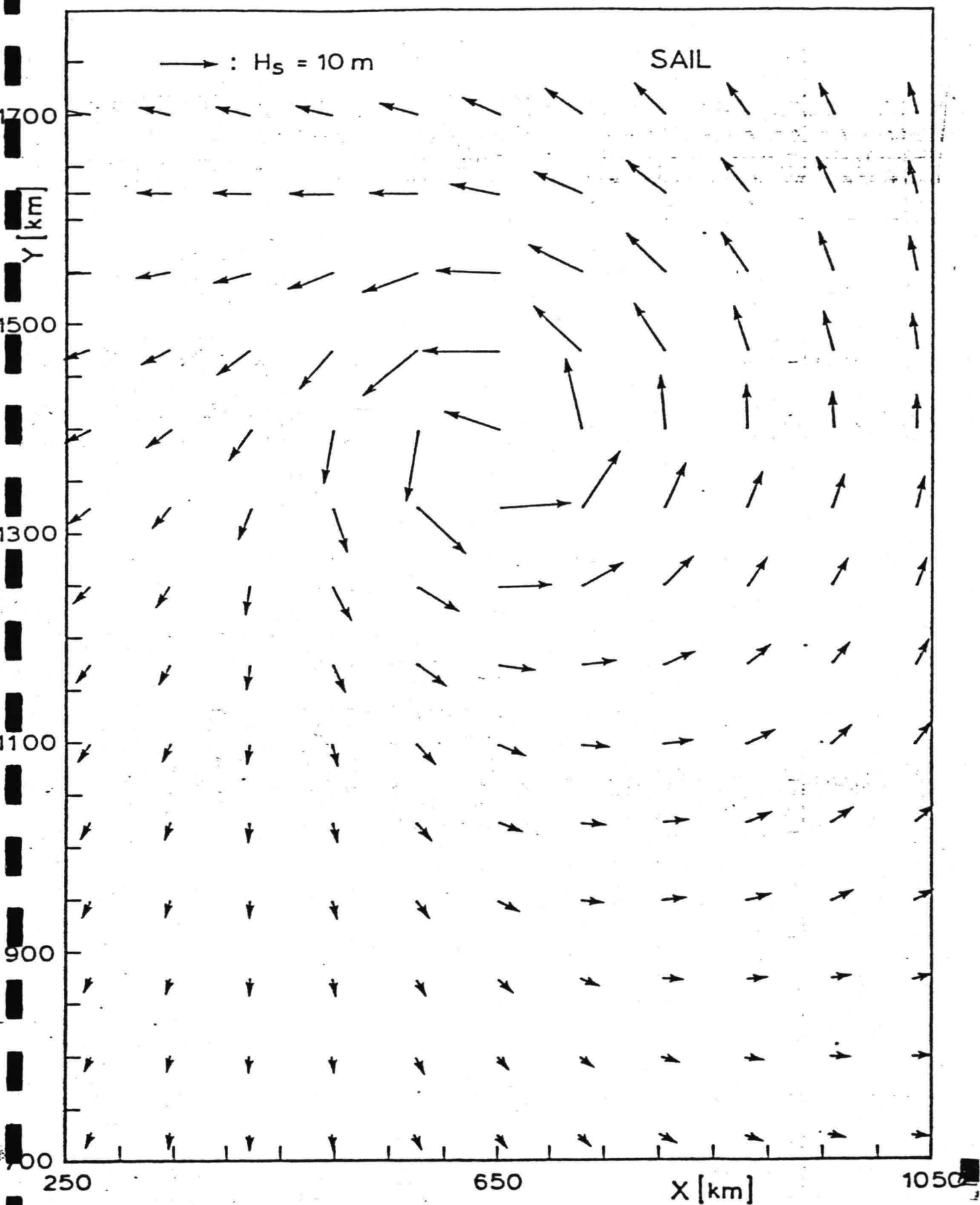
5.37 Windveld orkaan, test 5.

← : $H_s = 10\text{m}$

$Y [\text{km}]$



5.38 Golfveld van het ECG-model bij stationaire orkaan.



5.39 Golfveld van het SAIL-model bij stationaire orkaan.

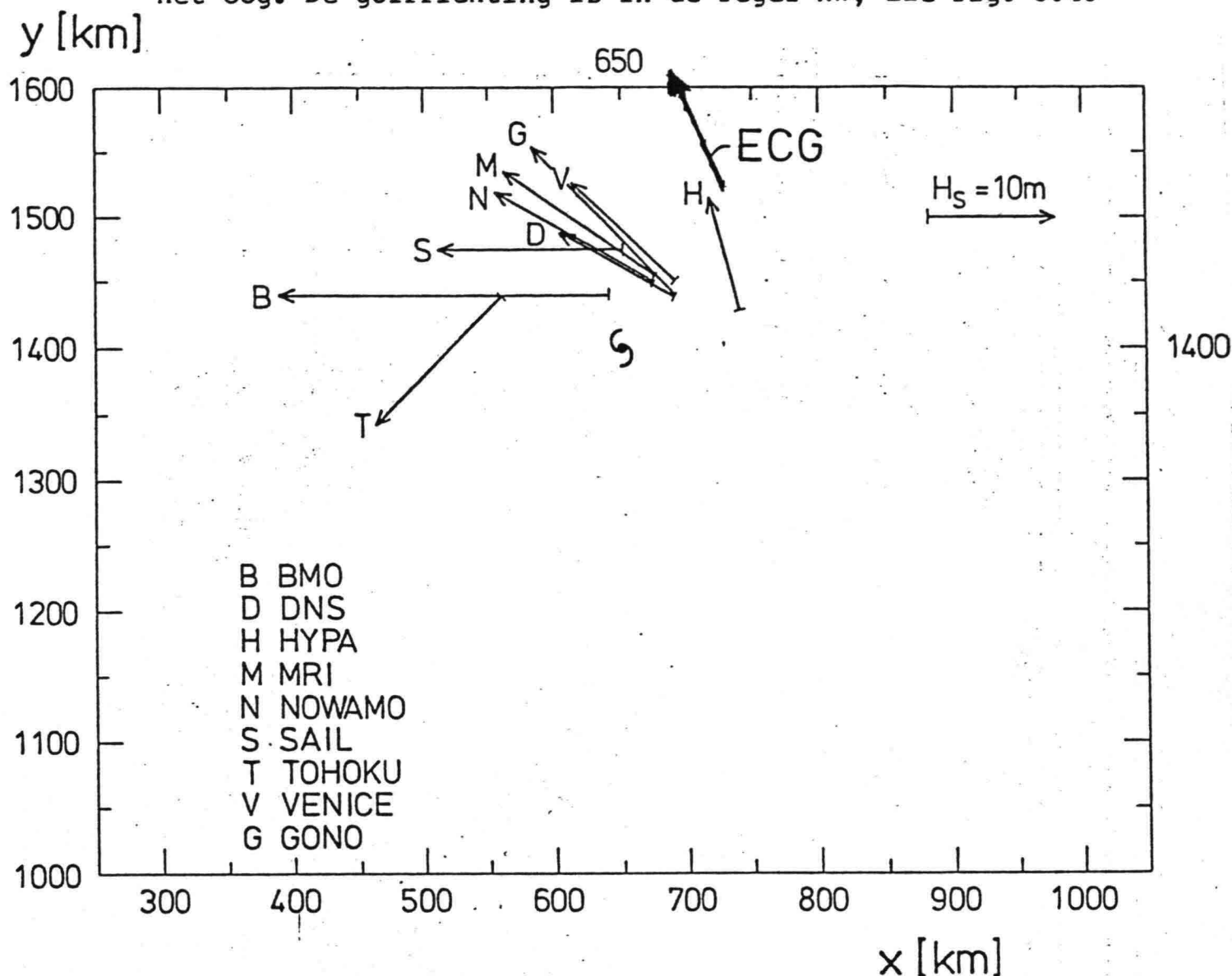
karakteristieken aan de rand blijkt, behalve extra rekentijd, dezelfde resultaten te geven, omdat het golfveld voornamelijk wordt bepaald door uitstraling van golven vanuit het oog van de orkaan. Met het model is een periode van 45 uur "echte tijd" doorgerekend. De golfhoogte neemt dan niet meer toe. Wel is in de buurt van het oog enige fluctuatie van de golfhoogte en de richting, θ_0 , waar te nemen. Dit is een gevolg van het feit dat de tijdstap van 1.5 uur bij dergelijke grote verschillen in de windsnelheid en -richting over een relatief korte afstand aan de grote kant is. Verder van het oog verwijderd nemen deze fluctuaties snel af.

Het golfveld is weergegeven door een vectordiagram in fig. 5.38. De golfhoogten zijn het grootst ten N en NO van het oog. Duidelijk is te zien dat de golven vanuit het oog worden uitgestraald. Het model onderdrukt de uitstraling van deining, zodat de golfhoogten verder van het oog verwijderd afnemen en voornamelijk bepaald worden door de lokale wind. Dit is een aannemelijk resultaat voor een golfveld dat voornamelijk uit zeegang bestaat. De maximale golfhoogte is 9.5 m en deze wordt bereikt op 150 km NNO van het oog. De piekfrequentie is daarbij 0.07 Hz ($T = 14$ s) en de voortplantingsrichting van het golfveld is in NNW richting.

Een vergelijk met de resultaten van de SWAMP-modellen is wat moeilijk, omdat het windveld van de SWAMP-orkaan nogal verschilt van het in deze par. gebruikte; vooral als de afstand tot het oog toeneemt. Bij de SWAMP-orkaan neemt de windsnelheid minder sterk af met de afstand tot het oog. Ook is er bij de SWAMP-orkaan een sterke instroming in het ZW-quadrant.

Het golfveld van de SWAMP-modellen geeft een geringere uitstraling van golven vanuit het oog te zien. De golven volgen meer circelvormige banen rond het oog. Zie b.v. het golfveld van het SAIL-model fig. 5.39. De golfhoogten nemen bij de SWAMP-modellen minder sterk af met toenemende afstand tot het oog dan bij het ECG-model. Dit is o.a. een gevolg van het niet meenemen van deining in het ECG-model.

De maximale golfhoogte varieert bij de SWAMP-modellen van 9 tot 16 m. De plaats waar deze golfhoogte optreedt is NO van het oog. De golfrichting is in de regel NW, zie fig. 5.40



5.40 Maximale golfhoogte, stationaire orkaan.

5.3.6 Roterend windveld (Test 6).

Een uniform windveld roteert met constante hoeksnelheid. De windsnelheid is 20 m/s. Het berekenen van één karakteristiek is in deze situatie voldoende, omdat de ontwikkeling van het golfveld hier alleen afhankelijk is van de tijd. De situatie is evenals het 90° gedraaide windveld in wezen één dimensionaal.

De gebruikte rotatiesnelheden zijn 5°/uur, 10 °/uur en 20 °/uur.

Bij 20 °/uur wordt het golfveld niet stationair, maar blijft fluctueren. Voor een rotatiesnelheid van 20 °/uur is de tijdstap van 1.5 uur blijkbaar te groot. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in onderstaande tabel. Omdat het model rekent met een gemiddelde wind gedurende de tijdstap, wordt het verschil $\theta_0 - \theta_w$ gem vermeld in de tabel in plaats van $\theta_0 - \theta_w$.

| rotatiesnelheid | E/E_{PM} | $\theta_0 - \theta_w$ gem |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 5 °/uur | 0.55 | 56° |
| 10 °/uur | 0.29 | 64° |
| 20 °/uur | niet stationair bij $t = 1.5$ uur | |

Het verschil $\theta_0 - \theta_w$ gem lijkt vrij groot. Er is echter geen vergelijkingsmateriaal van andere modellen. Omdat een test met een sterk variërende wind, als het orkaanveld, echter redelijke uitkomsten geeft, is te verwachten dat andere modellen een soortgelijk gedrag te zien zullen geven.

6 Samenvatting conclusies en voorstellen tot nader onderzoek.

Samenvatting conclusies

De groeikrommen voor standaard windveld van E en f_m als functie van strijklengte en windduur stemmen redelijk overeen met andere modellen (uit de SWAMP-studie), zij het dat f_m aan de lage kant is t.o.v. de andere modellen. Overigens is het zo dat de groeikrommen van de ver schillende modellen onderling nog aanzienlijke verschillen vertonen. Omdat de groeikrommen voor E en f_m als functie van de strijklengte als input aan het model opgelegd worden, is de keuze van deze krommen in principe vrij.

Het bijdraaien van de voortplantingsrichting van het golfveld, θ_0 , indien er een verschil is met de windrichting, θ_w , lijkt gezien de resultaten van test 4, het diagonale front, snel genoeg te gebeuren. Het bijdraaien verloopt ook niet te snel gezien de resultaten van test 5, de stationaire orkaan. Sneller bijdraaien zal bij de orkaan de golfhoogten in de buurt van het oog van de orkaan doen toenemen, omdat de karakteristieken dan langer in het gebied met maximale windsnelheden in de buurt van het oog blijven. In het extreme geval zullen de golven met de wind mee het oog binnenlopen.

De gekozen criteria voor het onderscheid tussen zeegang en deining en de snelheid waarmee deining uit het model verwijderd wordt blijken in geen van de testgevallen te leiden tot resultaten die vreemd zijn te noemen voor een zeegangsmodeel. De gekozen uitdrukking voor de relaxatieafstand voor de afname van deining, \tilde{F}_{relax} , heeft tot gevolg dat $\tilde{F}_{relax} \rightarrow \infty$ als de windsnelheid $u \rightarrow 0$ bij gelijkblijvende E . Bij geleidelijke afname van de windsnelheid langs een karakteristiek vindt echter toch een sterke afname van deining plaats. Dit blijkt uit de geringe uitstraling van deining in gebieden met lage windsnelheden bij test 5, de stationaire orkaan.

De grootte van de tijdstap van 1.5 uur blijkt bij enkele gevallen tot numerieke onnauwkeurigheden te leiden:

Bij test 4, het diagonale front, in het gebied waar het golfveld met maximale energie het front passeert.

Bij test 5, de stationaire orkaan, in de buurt van het oog van de orkaan, waar de windsnelheden maximaal zijn en de verandering van de windrichting over een korte afstand erg groot is.

Bij test 6, het roterend windveld, blijkt het golfveld bij een rotatiesnelheid van 20° /uur niet stationair te worden.

Voor het nauwkeurig berekenen van het golfveld in dergelijke situaties, waarin de windsnelheid en/of -richting in korte tijd of over geringe afstand zeer sterk variëren is het nodig de tijdstap wat kleiner te kiezen.

Geconcludeerd kan worden dat de resultaten van het model bemoedigend zijn en dat de gevolgde benaderingswijze voor de berekening van zeegang inderdaad perspectieven biedt.

Aanbevelingen voor nader onderzoek

Het zal nodig zijn het model uit te breiden met een deiningsdeel. De deining, die nu uit het model verdwijnt, kan dan overgebracht worden naar het deiningsdeel. In samenhang met deze uitbreiding zullen het criterium voor het onderscheid tussen zeegang en deining en de snelheid waarmee deining naar het deiningsdeel wordt overgebracht kritisch bestudeerd moeten worden. Tevens zal een procedure moeten worden opgenomen die de overgang van energie uit het deiningsdeel naar het zeegangsdeel beschrijft.

Het model zal uitgebreid moeten worden met mogelijkheden voor andere randvoorwaarden dan alleen een kust en voor andere beginvoorwaarden dan alleen een kalme zee. Tevens zullen ingewikkeldere geometiën als modelgebied ingevoerd moeten kunnen worden. Bedenk daarbij dat het modelgebied voor de interpretatie van het karakteristiekenpatroon niet uitsluitend uit vierkante vakken hoeft te bestaan. Een meer creatieve vorm voor de vakken die beter een actuele kustvorm benadert is mogelijk.

Uiteraard zullen de inlees en uitvoerprocedures moeten worden uitgebreid. Te denken valt aan procedures voor de interpretatie van windvelden die op punten van een vast rooster gegeven zijn. Ook zal een plotprogramma voor de uitvoer erg nuttig zijn voor een vlotte interpretatie van de resultaten.

Naar aanleiding van de resultaten van test 6, het roterend windveld, is de vraag gerezen hoe andere golfvoorspellingsmodellen op deze test zullen reageren. In de SWAMP-studie komt deze test, die erg nuttig lijkt voor het testen van het richtingsrelaxatiegedrag van de modellen, niet voor. Mij lijkt het nuttig deze test ook met andere modellen te proberen.

Literatuur.

- C.E.R.C. (1973) Shore Protection Manual.
- Holthuijsen, L. H. (1980) Methoden voor golfvoorspelling, technische adviescommissie voor de waterkeringen.
- Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden (1973), Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*(8⁰), No. 12.
- Mitsuyasu e.a. (1980) *Journal of Physical Oceanography*, volume 10, p. 286 - 296.
- Sanders, J.W. (1976), A growth-stage scaling model for wind-driven sea, *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Band 29, Heft 4, blz. 136 - 161 (GONO).
- SWAMP (1982), Sea Wave Modelling Project, KNMI publicatie 161, (Eindrapport volgt medio 1983).
- Wilson, B.W. (1955), Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetches, Beach Erosion Board, Corps of Engineers, Departement of the Army, Tech. Memo 73.
- Young, I.R. and R.J. Sobey (1981), The numerical prediction of tropical cyclone wind waves. Department of Civil Engineering, James Cook University, North Queensland Australia, Research bulletin No. CS 20.
- Groen, P. en R. Dorrestein (1976), *Zeegolven KNMI, Opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied*, No. 12, Staatsdrukkerij, 's Gravenhage.

Bijlage I

Afleiding van de vergelijkingen voor de berekening van $|\vec{E_c}|$ uit \tilde{E} .

Omdat in deze bijlage steeds sprake is van scalaire grootheden wordt een afwijkende notatie gebruikt voor de lengte van een vector; $\tilde{E_c}$ i.p.v. $|\vec{E_c}|$.

$$\underline{1} \quad \tilde{E} \leq \tilde{E}_\infty$$

Als $\tilde{E} \leq \tilde{E}_\infty$ wordt de dimensieloze relatie vgl.(2.3.30) voor de berekening van \tilde{f}_m uit \tilde{E} gebruikt:

$$\tilde{E} = a \tilde{f}_m^b \quad (2.3.30) \quad (I.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{hierin is } a = 6.84 \times 10^{-6} \\ b = -3 \end{array} \right\} \text{Mitsuyasu (1980)}$$

De groepssnelheid volgt uit vgl.(3.2.1):

$$c_g = q \frac{g}{4 \pi \tilde{f}_m} \quad (3.2.1)$$

$$\Rightarrow \tilde{c}_g = q \frac{1}{4 \pi \tilde{f}_m} \quad (I.2)$$

met vgl.(I.1) volgt uit vgl.(I.2):

$$\tilde{c}_g = a_1 \tilde{E}^{-1/b} \quad (I.3)$$

$$\text{met } a_1 = \frac{q}{4 \pi (1/a)^{1/b}}$$

$$\Rightarrow \tilde{E_c} = a_1 \tilde{E}^{b_1} \quad (I.4)$$

$$\text{met } b_1 = 1 - 1/b$$

De inverse relatie van vgl.(I.4) is:

$$\tilde{E} = a_2 \tilde{E_c}^{b_2} \quad (I.5)$$

$$\begin{array}{l} \text{met } a_2 = (1/a_1)^{1/b_1} \\ b_2 = 1/b_1 \end{array}$$

$$\underline{2} \quad \tilde{E} > \tilde{E}_\infty$$

Als $\tilde{E} > \tilde{E}_\infty$ kan vgl.(2.3.30) niet meer gebruikt worden voor de berekening van \tilde{f}_m . In dat geval wordt de volgende benadering gevolgd. Aangenomen wordt, dat de piekfrequentie, behorende bij de aanwezige energie, gelijk is aan de piekfrequentie in een situatie met volgroeide zeegang met dezelfde energie als aanwezig is:

aanwezig: E met piekfrequentie f_m

volgroeide zeegang: E_{volgr} met piekfrequentie $f_m \text{ volgr}$,
de bijbehorende windsnelheid is u_{volgr}

$$\text{Stel } E = E_{\text{volgr}} \text{ en } \tilde{E}_{\text{volgr}} = \tilde{E}_\infty$$

$$\left. \begin{aligned} E &= E_{\text{volgr}} \\ \tilde{E}_{\text{volgr}} &= \frac{E_{\text{volgr}} g^2}{4 u_{\text{volgr}}} = \tilde{E}_\infty \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{\tilde{E}_\infty u_{\text{volgr}}^4}{g^2} \quad (\text{I.6})$$

$$\Rightarrow u_{\text{volgr}} = \left(\frac{E g^2}{\tilde{E}_\infty} \right)^{1/4} \quad (\text{I.7})$$

$$\text{Stel } f_m = f_m \text{ volgr en } \tilde{f}_m \text{ volgr} = \tilde{f}_{m\infty}$$

$$\left. \begin{aligned} f_m &= f_m \text{ volgr} \\ \tilde{f}_m \text{ volgr} &= \frac{f_m \text{ volgr } u_{\text{volgr}}}{g} = \tilde{f}_{m\infty} \end{aligned} \right\} \Rightarrow f_m = \frac{\tilde{f}_{m\infty} g}{u_{\text{volgr}}} \quad (\text{I.8})$$

Invullen van u_{volgr} vgl.(I.7) in vgl.(I.8) geeft:

$$f_m = \tilde{f}_{m\infty} g \left(\frac{E g^2}{\tilde{E}_\infty} \right)^{-1/4} \quad (\text{I.9})$$

Vgl.(I.9) in vgl.(3.2.1) geeft:

$$\begin{aligned} c_g &= \frac{g}{4 \pi \tilde{f}_{m\infty}} \left(\frac{g^2}{\tilde{E}_\infty} \right)^{1/4} E^{1/4} \\ c_g &= \tilde{c}_{g\infty} \left(\frac{g^2}{\tilde{E}_\infty} \right)^{1/4} E^{1/4} \end{aligned} \quad (\text{I.10})$$

$$\text{hierin is } \tilde{c}_{g\infty} = \frac{g}{4 \pi \tilde{f}_{m\infty}} \quad (\text{is constant})$$

$$Ec_g = a_3 E^{5/4}$$

(I.11)

$$\text{met } a_3 = \tilde{c}_g \propto \left(\frac{g^2}{\tilde{E}_g} \right)^{1/4}$$

$$\tilde{Ec}_g = \frac{Ec_g g^2}{u^5}$$

Bijlage II

Rekenmodel voor de ontwikkeling van het golfveld gebaseerd op aannamen over de ontwikkeling van het spectrum.

De gevolgde benadering komt er in principe op neer, dat elke tijdstap min of meer in detail wordt nagegaan hoe het spectrum zich ontwikkelt. Nagegaan wordt bijvoorbeeld welk deel van het spectrum als zeegang beschouwd moet worden en welk deel als deining. Uit de aangenomen ontwikkeling van het spectrum gedurende de tijdstap worden vergelijkingen voor de golfparameters afgeleid.

De bedoeling is differentiaalvergelijkingen voor de golfparameters af te leiden, waarbij een verschil tussen de voortplantingsrichting van het golfveld en de windrichting mogelijk is. Daartoe wordt de ontwikkeling van het golfveld langs een karakteristiek benaderd door een rekenmodel, dat deze ontwikkeling tijdens een tijdstap, Δt , berekent, uitgaande van het golfveld aan het begin van de tijdstap en de tijdens de tijdstap heersende wind. Aangenomen is dat de tijdstap zo is gekozen t.o.v. een voor de variatie van de wind langs de baan van het golfveld kenmerkende tijdschaal, dat de wind gedurende de tijdstap constant kan worden verondersteld.

Het rekenmodel splitst de ontwikkeling van het golfveld tijdens de tijdstap op in een aantal stappen:

- 1) Het golfveld, dat aanwezig is aan het begin van de tijdstap, wordt gesplitst in een deel dat door de wind wordt beïnvloed, zeegang, en een deel dat niet door de wind wordt beïnvloed, deining.
- 2) Het zeegangsdeel ontwikkelt zich tijdens de tijdstap onder invloed van de wind, die gedurende de tijdstap constant wordt verondersteld. Deze ontwikkeling van zeegang kan b.v. door een groeikromme beschreven worden.
- 3) Het deiningsdeel van het golfveld verdwijnt uit het zeegangsmodel

- 4) Het golfveld, dat aan het einde van de tijdstap over is, neemt een standaard spectrumvorm aan.

Om de problemen, die bij deze benadering naar voren kwamen, te illustreren wordt een situatie bekeken, waarbij geen groei van zeegang plaatsvindt.

Het onderscheid tussen zeegang en deining wordt gemaakt op basis van de energie van de golfcomponenten met eenzelfde richting geïntegreerd over de frequenties:

$$E_r(\theta) = \int_0^{\infty} E(f, \theta) df \quad (\text{II.1})$$

Aangenomen wordt dat de aanwezige energie volgens een \cos^2 -verdeling over de richtingen verdeeld is, met als gemiddelde richting θ_0 :

$$\begin{aligned} E_{r \text{ aanw}}(\theta) &= E_{\text{aanw}} \times \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \theta_0) \quad \text{als } |\theta - \theta_0| \leq \frac{\pi}{2} \\ E_{r \text{ aanw}}(\theta) &= 0 \quad \text{als } |\theta - \theta_0| > \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

Als criterium voor het onderscheid tussen zeegang en deining wordt een volgroeide zeegangssituatie gedefinieerd. De geïntegreerde energie van het golfveld bij volgroeide zeegang, E_{∞} , is daarbij verdeeld over de richtingen volgens een \cos^2 -verdeling, met als hoofdrichting de windrichting, θ_w , dus $\theta_{0\infty} = \theta_w$. De energie van de golfcomponenten met eenzelfde richting geïntegreerd over de frequenties wordt bij volgroeide zeegang gedefinieerd als:

$$\begin{aligned} E_{r\infty}(\theta) &= E_{\infty} \times \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \theta_w) \quad \text{als } |\theta - \theta_w| \leq \frac{\pi}{2} \\ E_{r\infty}(\theta) &= 0 \quad \text{als } |\theta - \theta_w| > \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

Het deel van de aanwezige energie van het golfveld, $E_{r \text{ aanw}}(\theta)$, dat kleiner of gelijk aan $E_{r\infty}(\theta)$ is, wordt beschouwd als zeegang. De rest van het golfveld wordt beschouwd als deining.

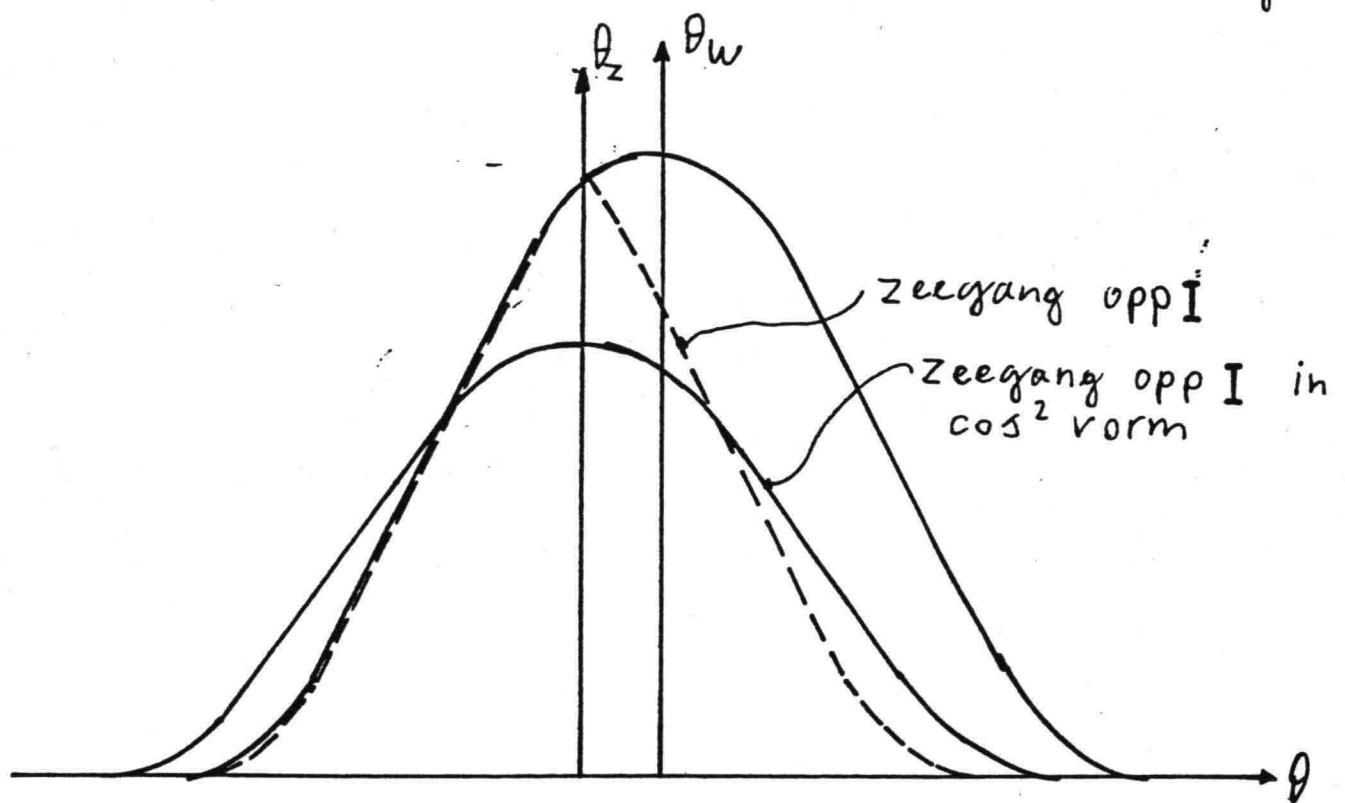
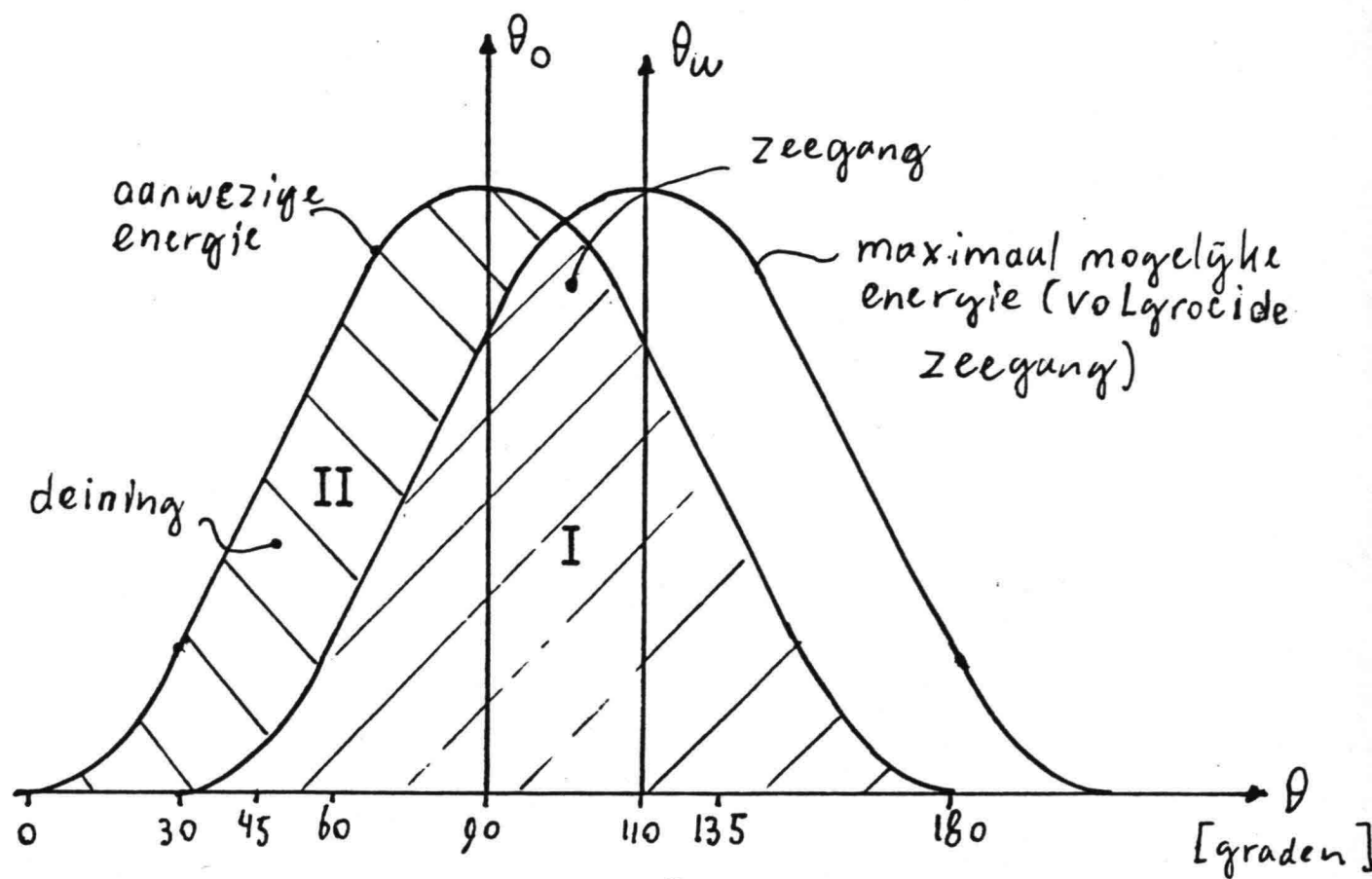


Fig. II.1 Tijdstap $\Delta t = \Delta t_1$

zeegang: $E_{r \text{ aanw}}(\theta) \leq E_{r\infty}(\theta)$

deining: $E_{r \text{ aanw}}(\theta) > E_{r\infty}(\theta)$

In figuur II.1 is een situatie weergegeven, waarbij aan het begin van een tijdstap $E_{\text{aanw}} = E_{\infty}$ en waarbij de voortplantingsrichting van het golfveld, θ_0 , en de windrichting, θ_w , 20° verschillen. In deze situatie wordt oppervlakte I in fig. II.1 als zeegang beschouwd en oppervlakte II als deining.

In een situatie waarin de zeegangsenergie gelijk blijft, zal na één tijdstap, Δt_1 , alleen oppervlakte I overblijven. De deining, oppervlakte II, verdwijnt uit het model. Aan het einde van de tijdstap neemt de resterende energie weer de standaard \cos^2 -verdeling aan. Dit is weergegeven in de onderste figuur van fig. II.1. Het verschil tussen de voortplantingsrichting van de zeegang, θ_z , en de windrichting, θ_w , is kleiner dan het verschil tussen θ_0 en θ_w aan het begin van de tijdstap. Er blijft echter een verschil tussen golfrichting en windrichting bestaan.

Nagegaan wordt nu wat er gebeurt als de tijdstap verkleind wordt. Daartoe wordt het volgende gedachtenexperiment uitgevoerd: De tijdstap wordt gehalveerd, $\Delta t = \frac{1}{2}\Delta t_1$. Nagegaan wordt hoeveel energie er overblijft na een tijd Δt_1 , dus na twee tijdstappen van $\frac{1}{2}\Delta t_1$. Aangenomen wordt dat de windsnelheid en windrichting gedurende een tijd gelijk aan Δt_1 , dus gedurende twee tijdstappen van $\frac{1}{2}\Delta t_1$, gelijk blijven. De hoeveelheid zeegang die na één tijdstap $\frac{1}{2}\Delta t_1$ overblijft is hetzelfde als na één tijdstap Δt_1 . Wordt nu een tweede stap $\frac{1}{2}\Delta t_1$ uitgevoerd, dan ontstaat een situatie waarin minder zeegangsenergie overblijft na een tijd Δt_1 , dan na één tijdstap van Δt_1 . Tevens is het verschil tussen de golfrichting, θ_z , en de windrichting, θ_w , kleiner na twee tijdstappen $\frac{1}{2}\Delta t_1$ dan na één tijdstap Δt_1 . Dit is weergegeven in fig. II.2.

Verkleinen van de tijdstap $\Delta t \rightarrow 0$ zal na een tijdsduur Δt_1 , dus na $\Delta t / \Delta t_1$ stappen, leiden tot een situatie waarbij $\theta_z = \theta_w$. Dit

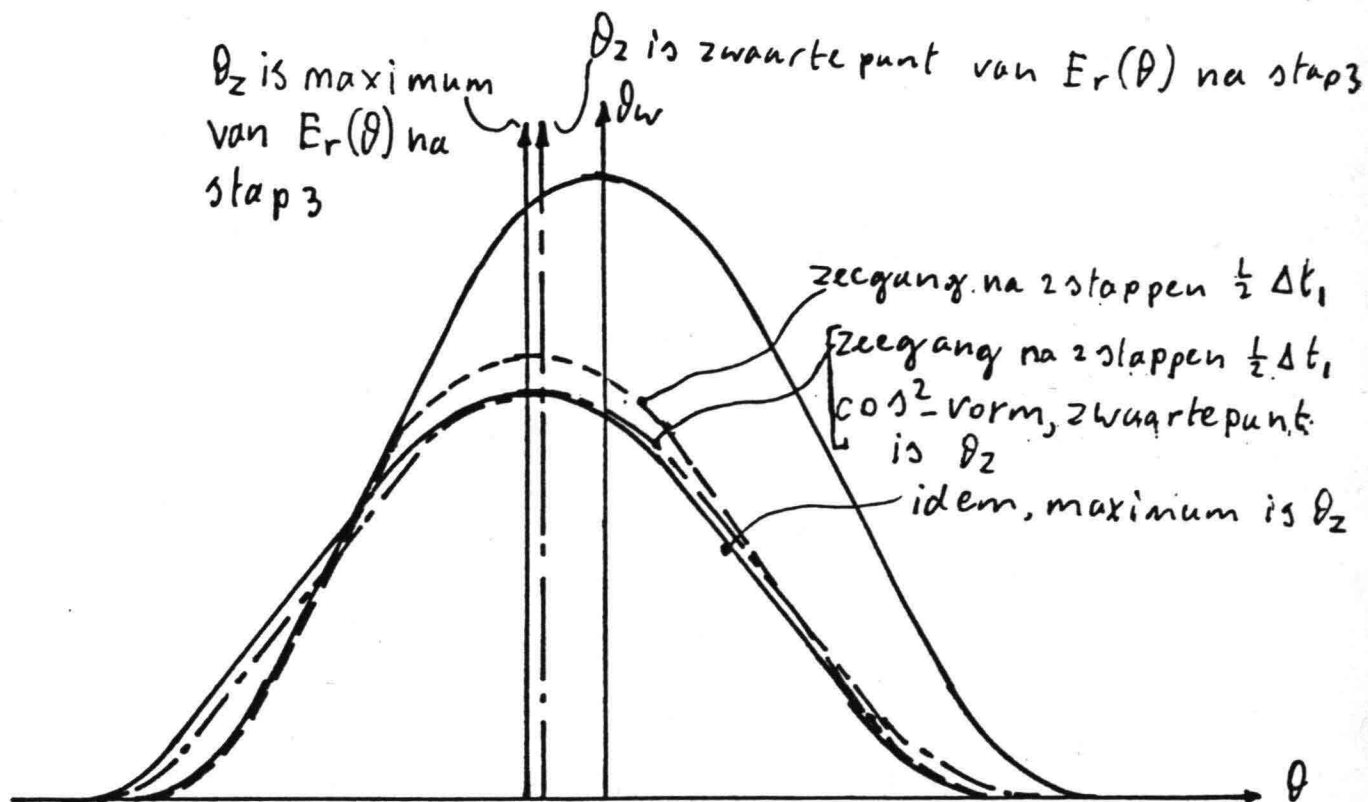


Fig. II.2 Twee tijdstappen $\Delta t = \frac{1}{2} \Delta t_1$

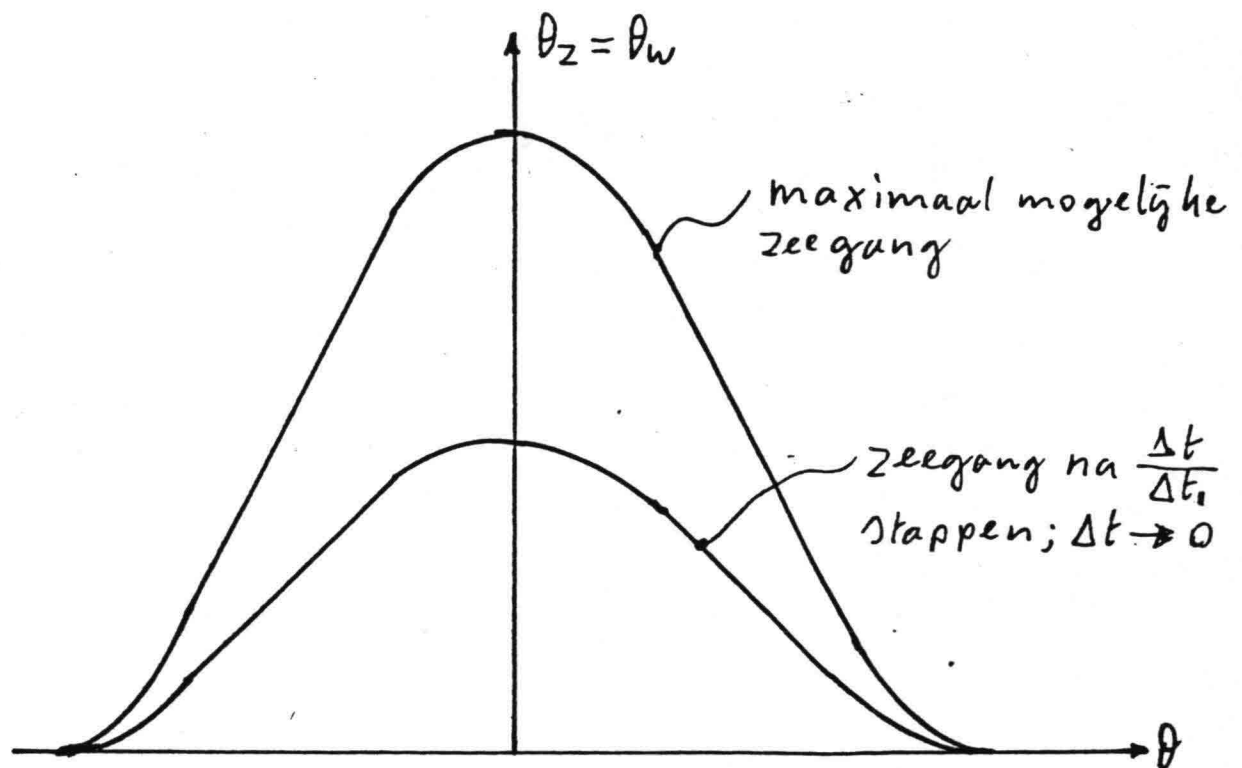


Fig. II.3 $\Delta t \rightarrow 0, \frac{\Delta t}{\Delta t_1}$ tijdstappen

is weergegeven in fig. II.3. De hoeveelheid energie die als zeegang uiteindelijk overblijft hangt af van de wijze waarop de gemiddelde golfrichting van de zeegang, θ_z , gedefinieerd is. Het maakt verschil voor de hoeveelheid (deinings)energie die in de volgende tijdstap "afgesneden" wordt, of θ_z wordt gedefinieerd als de richting die samenvalt met het zwaartepunt van de na stap 3 (pag. 85) overblijvende (zeegangs)energie, voor het aannemen van de standaard \cos^2 -vorm, of als de richting waarbij E_r zeegang(θ) maximaal is, zie fig. II.2.

Het blijkt dat het resultaat van het algoritme voor de ontwikkeling van het spectrum afhankelijk is van de gekozen tijdstap. Als $\Delta t \rightarrow 0$ zal na eindige tijdsduur altijd $\theta_z = \theta_w$ in plaats dat $\theta_z \neq \theta_w$ mogelijk is. Gevolg van het afhankelijk zijn van de tijdstap, is, dat het niet mogelijk is vergelijkingen voor de parameters van het golfveld uit de modellering te destilleren, die onafhankelijk zijn van de bij de modellering gekozen tijdstap. Dit is de reden dat de in deze bijlage beschreven benadering losgelaten is. Voor het rekenmodel is gebruik gemaakt van relaties die min of meer direkt met de parameters van het golfveld rekenen.

Bijlage III

Het numerieke model.

III.1 Hoofdpijnen van het model.

Het numerieke model, zoals dat in hoofdpijnen beschreven is in hoofdstuk 4, wordt in deze bijlage verder uitgewerkt. Voordat een struktuurdiagram van het programma wordt gegeven, volgt eerst een overzicht van de parameters van de stralen en de vakken, zoals die in het rekenmodel gebruikt worden.

Parameters van de stralen en de vakken.

De parameters van de stralen en de vakken worden in het model weergegeven door een aantal arrays.

Parameters van straal nummer i:

Aan het begin van de tijdstap hebben de parameters van de stralen binnen het model betrekking op het tijdstip t_1 aan het begin van de tijdstap. Na het doorrekenen van een tijdstap hebben alle parameters betrekking op het eind van de tijdstap, $t_2 = t_1 + \Delta t$. De parameters zijn:

| | |
|---|------------------|
| geïntegreerde energie van het golfveld: | $E(i)$ |
| voortplantingsrichting van het golfveld | $\theta_0(i)$ |
| piekfrequentie: | $f_m(i)$ |
| coördinaten: | $x(i)$ en $y(i)$ |
| logische parameter die aan geeft of de straal nog binnen het model valt: | $STRAAL(i)$ |
| straal binnen het model | " =T |
| straal buiten het model | " =F |

Parameters van vak (jx,jy):

Aan het begin van de tijdstap worden alle parameters van de vakken gelijk aan nul gesteld. Na het doorrekenen van een tijdstap hebben alle parameters betrekking op de tijd aan het einde van de tijdstap.

De parameters van vak (jx,jy) zijn:

| | |
|--|-------------------------|
| energie van het golfveld: | $E_{vak}(jx,jy)$ |
| voortplantingsrichting van het golfveld: | $\theta_0_{vak}(jx,jy)$ |
| piekfrequentie: | $f_m_{vak}(jx,jy)$ |
| nummers van de stralen in het vak: | $Nstr(jx,jy,j)$ |

De structuur van het numerieke model is in hoofdlijnen weergegeven in onderstaand structuurdiagram.

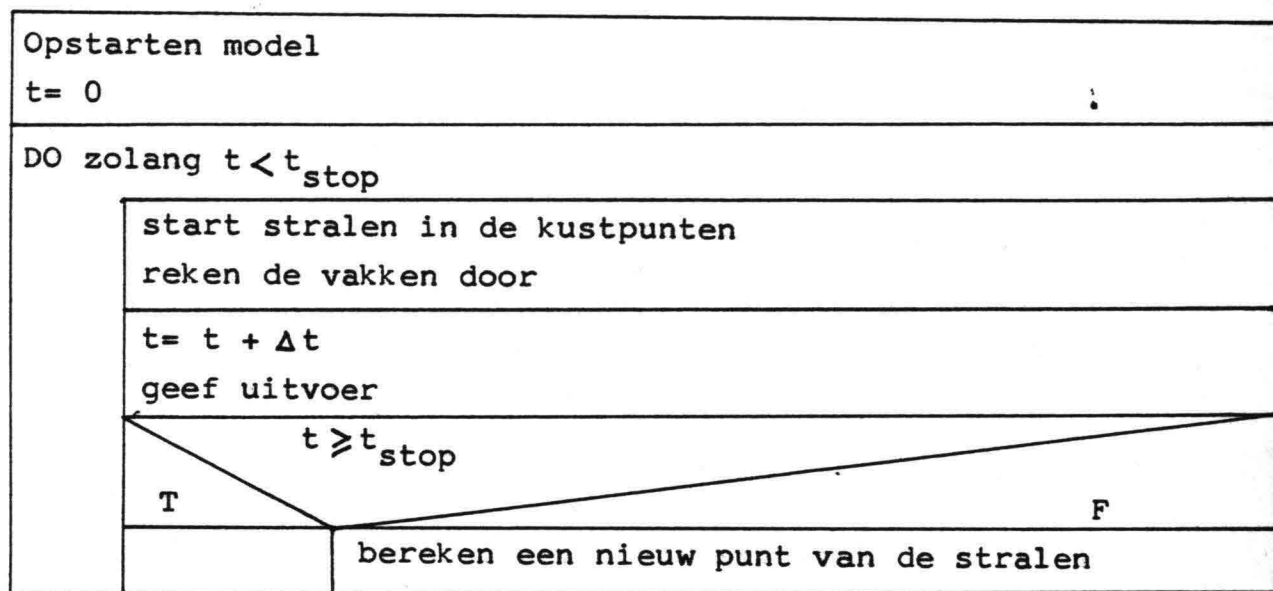


Fig. III.1 Structuur van het model.

In het volgende structuurdiagram zal deze structuur nader worden uitgewerkt.

Hoofdprogramma

Initialisatie

totaal aantal vakken in: x - richting = Mx

y - richting = My

totaal aantal stalen in het model = N

totaal aantal startpunten aan de kust = N_{kust}

Lees de coördinaten van de startpunten aan de kust in

$t = 0$

Zet de parameters van alle vakken = 0

DO $jx = 1, Mx$ start in elk vak een straal

DO $jy = 1, My$

$x1 = (jx - \frac{1}{2})\Delta x$

$y1 = (jy - \frac{1}{2})\Delta y$

$i = jy + (jx - 1)My$

Start straal nr i in punt $(x1, y1)$ op tijdstip t

eindpunt $(x(i), y(i))$ en golfparameters (i) ;

CALL START(in: $x1, y1, t$ uit: $x(i), y(i), E(i), f_m(i), \theta_0(i)$)

Ga na of het eindpunt $(x(i), y(i))$ binnen het model

valt. Zo ja, ga na in welk vak het punt valt en koppel

straal nr i aan het vaknr.

CALL VAK(in: $x(i), y(i), i$ uit: $Nstr, STRAAL(i)$)

de array $NSTR(jx, jy, j)$ koppelt de straalnummers

aan de vaknummers. $STRAAL(i)$ geeft aan of de straal

binnen het model valt; zo ja $STRAAL(i) = TRUE$

zo nee $STRAAL(i) = FALSE$

$N = Mx \cdot My$

DO zolang $t < tstop$

$imax = 1$

DO $j = 1, N_{kust}$ start stralen in de startpunten aan de kust

Zoek de eerste straal met $STRAAL(i) = FALSE$:

$i = 0$

DO zolang $STRAAL(i) = TRUE$

$i = i + 1$

T

$i \leq N_{max}$

F

Geef foutmelding; maximum aantal stralen
te klein gedefinieerd.

T

$i > imax$

F

$imax = i$

Start straal nr i in kustpunt nr j :

CALL START(in: $x_{kust}(j), y_{kust}(j), t$ uit: $x(i), y(i), E(i), f_m(i), \theta_0(i)$)

CALL VAK(in: $x(i), y(i), i$ uit: $Nstr, STRAAL(i)$)

Bereken de golfparameters per vak uit de golfparameters van

de stralen die in dat vak terecht zijn gekomen:

CALL VAKPAR(in: parameters stralen, $Nstr$ uit: golfparameters vakken)

Zoek de vakken waarin geen stralen beland zijn:

DO $jx = 1, Mx$

DO $jy = 1, my$

T

bevat vak (jx, jy) stralen

F

- Bereken de golfparameters van vak (jx, jy) door
middelen uit omliggende vakken.

- Start een nieuwe straal in vak (jx, jy) met als

beginvoorwaarde de golfparameters van vak (jx, jy) .

Zoek de eerste straal met $STRAAL(i) = FALSE$

CALL VAKMID(in: $jx, jy, \text{golfparameters vakken}$ uit: golf-

parameters vak $(jx, jy), x(i), y(i), E(i), f_m(i), \theta_0(i),$

$STRAAL(i)$)

$t \leftarrow t + \Delta t$

Geef uitvoer van de golfparameters per vak op tijdstip t

CALL UIT(.....)

T $t \geq tstop$

F

T

$imax > N$

F

$N = imax$

Zet de parameters van alle vakken = 0

DO $i = 1, N$

ga alle stralen langs

T

$STRAAL(i)$

Bereken een nieuw punt van straal nr i , als de
straal nog binnen het model valt:

CALL NEWPT(in: $x(i), y(i), E(i), \theta_0(i), t$ (waarden op tijd-
stip t) uit: $x(i), y(i), E(i), f_m(i), \theta_0(i)$ (waarden op
tijdstip $t + \Delta t$)

CALL VAK(in: $x(i), y(i), i$ uit: $Nstr, STRAAL(i)$)

III.2 Invoer, uitvoer en COMMON parameters.

Startpunten aan de kust.

Aan het begin van het hoofdprogramma worden het aantal startpunten aan de kust, N_{kust} , en de coördinaten van deze punten ingelezen. Eerst wordt N_{kust} ingelezen. Daarna worden de coördinaten $x_{kust}(j)$ en $y_{kust}(j)$ ingelezen in de volgorde $x_{kust}(1)$, $y_{kust}(1)$, $x_{kust}(2)$, $y_{kust}(2)$, etc. De coördinaten worden ingelezen in free format, in meters.

Modelgebied.

Het modelgebied is een rechthoek, die zich in x-richting uitstrekt van 0 tot $x_{max} = Mx * \Delta x$ en in y-richting van 0 tot $y_{max} = My * \Delta y$. Aan Mx , My , Δx en Δy wordt aan het begin van het hoofdprogramma een waarde toegekend. Δx en Δy worden gegeven in meters. Omdat bij de testgevallen steeds deze eenvoudige geometrie gebruikt wordt, is geen procedure ontworpen om een ingewikkelde geometrie in te lezen.

Windveld.

Het windveld wordt ingebouwd als een aparte subroutine: $WIND(x, y, t, u, \theta_w)$. Als invoer worden de coördinaten x en y en de tijd t gegeven. Als uitvoer volgen hieruit de windsnelheid, u , in m/s en de windrichting, θ_w , in radialen t.o.v. de x-richting in het model. Omdat het model met eenvoudige analytische windvelden **getest** wordt, is geen procedure om een windveld in te lezen ontworpen.

Uitvoer.

De uitvoer wordt verzorgd door de subroutine **UIT**. Deze subroutine geeft de waarden van de parameters als blokken getallen. Deze uitvoer is met de hand verwerkt tot de figuren die in hoofdstuk 5 bij de behandeling van de testgevallen gegeven zijn.

COMMON parameters.

Aan de coëfficiënten, exponenten en constanten van de benodigde formules, zoals die voor de berekening van E_{c_g} (zie bijlage I), wordt een waarde toegekend aan het begin van het programma.

Met een COMMON statement worden de coëfficiënten, exponenten en constanten doorgegeven aan die subroutines, die ze gebruiken bij de berekeningen. De COMMON parameters zijn beschreven door commentaar aan het begin van het programma (zie bijlage V, programmalisting).

Als het nodig is coëfficiënten, exponenten of constanten te wijzigen, dan moet dit gebeuren aan het begin van het programma. Via de COMMON statement worden de gewijzigde waarden dan doorgegeven aan de subroutines.

III.3 De subroutines.

De subroutines zijn deels een nadere uitwerking van de in hoofdstuk 3 beschreven methode voor de berekening van de ontwikkeling van zeevang, deels een uitwerking van in hoofdstuk 4 beschreven programmaonderdelen. De subroutines worden in de paragrafen III.3.1 t/m III.3.9 ieder apart beschreven. In deze paragrafen wordt een beknopte beschrijving gegeven van de taak van de subroutine, gevolgd door een struktuurdiagram. Zonodig wordt een afleiding gegeven van formules die bij de berekeningen gebruikt worden.

III.3.1 Subroutine NEWPT.

De subroutine NEWPT berekent een nieuw punt van een straal en de golfparameters E , f_m en θ_0 in dat punt. Tijdens de berekening worden de windveldparameters, u en θ_w , gegeven door de subroutine WIND. Om te voorkomen dat de dimensieloze grootheden oneindig groot worden als de windsnelheid $u \rightarrow 0$, wordt u naar beneden begrensd; $u \geq 0.1$ m/s (de golfhoogte bij volgroeiende zeevang is als $u = 0.1$ m/s in de orde van grootte van 1 mm).

De ontwikkeling van het golfveld volgt uit de ontwikkeling van de dimensieloze energieflex, \vec{E}_g , die wordt berekend door de subroutine GROKO (par. III.3.2).

Een nieuw punt wordt berekend volgens een iteratieve methode:

- 1) Uitgaande van de golfparameters aan het begin van de tijdstap wordt een beginschatting voor een volgend punt van de straal berekend. De afgelegde afstand langs de straal gedurende de tijdstap, Δt , is ΔF . (berekening volgens par. 3.2.1 en formules bijlage I)
- 2) De gemiddelde windsnelheid en richting, vectorieel gemiddeld over Δt en ΔF , zijn nu te berekenen.
- 3) Met de gemiddelde windsnelheid en -richting en met ΔF is de ontwikkeling van \vec{E}_g te berekenen. Uit de golfparameters aan het begin en het einde van de tijdstap kan een verbeterde schatting van het volgende punt van de straal berekend worden.
- 4) De stappen 2) en 3) worden éénmaal herhaald.

Bovenstaande procedure is nader uitgewerkt in een structuurdiagram.

In- en uitvoer van de subroutine NEWPT

Invoer:

| | |
|--|---------------|
| Parameters van de straal op tijdstip | $t_1 = t$ |
| coördinaten | x_1, y_1 |
| energie van het golfveld | E_1 |
| gemiddelde golfrichting | θ_{01} |
| Tijdstip aan het begin van de tijdstap | t |

Uitvoer:

| | |
|--------------------------------------|----------------------|
| Parameters van de straal op tijdstip | $t_2 = t + \Delta t$ |
| coördinaten | x_2, y_2 |
| energie van het golfveld | E_2 |
| piekfrequentie | f_m |
| gemiddelde golfrichting | θ_{02} |

Subroutine NEWPT

iteratie= 0 t1= 0 t2= t + Δt

Geef windsnelheid en -richting op t1 in (x1,y1):

CALL WIND(in: x1,y1,t1 uit: u1,θ_w1)

IF(u1<0.1) u1= 0.1

$\tilde{E}1 = E1 g^2 / u1^4$

θ₀ gem = θ₀1

T $\tilde{E}1 \leq \tilde{E}_\infty$ F

c_g1 = u_w1 $\tilde{E}1^{-1/b}$ (dimensieloze relaties)

c_g1 = a3 E₁^{1/4} (volgroeid spectrum)

ΔF = Δt * c_g1

x2 = x1 + ΔF cos θ₀ gem
y2 = y1 + ΔF sin θ₀ gem } bereken beginschatting (x2,y2)

DO zolang iteratie ≤ 1

CALL WIND(in: x2,y2,t2 uit: u2,θ_w2)

IF(u2<0.1) u2= 0.1

Bereken gem. windsnelheid en -richting, vectorieel gemiddeld

CALL AVVEC(in: u1,u2,θ_w1,θ_w2 uit: u_{gem},θ_wgem) over Δt en ΔF:

$\tilde{\Delta F} = \Delta F g / u_{gem}^2$

$\tilde{E}1 = E g^2 / u_{gem}^4$

T $\tilde{E}1 \leq \tilde{E}_\infty$ F

c_g1 = u_{gem} * a1 $\tilde{E}1^{-1/b}$

c_g1 = a3 E₁^{1/4}

$\tilde{E}c_g1 = \tilde{E}1 c_g1 / u_{gem}$

Bereken de ontwikkeling van het golfveld:

CALL GROKO(in: $\tilde{E}c_g1$,θ₀1,θ_wgem,ΔF uit: $\tilde{E}c_g2$,θ₀2)

T $\tilde{E}c_g2 \leq \tilde{E}c_{g\infty}$ F

$\tilde{E}2 = a2 \tilde{E}c_g2^{b2}$

c_g2 = u_{gem} $\tilde{E}c_g2 / \tilde{E}2$
E2 = $\tilde{E}2 u_{gem} / g^2$ | dimensie-
loze re-
laties

E_cg2 = $\tilde{E}c_g2 u_{gem}^5 / g^2$

E2 = (E_cg2/a3)^{4/5} | volgroeid
spectrum
c_g2 = E_cg2/E2

Bereken c_g gem en θ₀ gem, vectorieel gemiddeld over Δt en ΔF:

CALL AVVEC(in: c_g1,c_g2,θ₀1,θ₀2 uit: c_g gem,θ₀ gem)

ΔF = Δt * c_g gem

x2 = x1 + ΔF cos θ₀ gem
y2 = y1 + ΔF sin θ₀ gem } bereken verbeterde schatting (x2,y2)
iteratie = iteratie + 1

f_m2 = q $\frac{g}{4\pi c_g2}$

III.3.2 Subroutine GROKO.

De subroutine GROKO berekent de ontwikkeling van de dimensieloze energieflex, \widetilde{Ec}_g , onder invloed van de wind. De methode van berekening is beschreven in par. 3.2.2. In deze paragraaf worden de differentiaalvergelijkingen uit par. 3.2.2 uitgewerkt in differentievorm en verwerkt in een structuurdiagram voor de subroutine GROKO.

De notatie van de lengte van de vectoren wijkt in deze paragraaf af van de tot nog toe gebruikte. De lengte van de vector \widetilde{Ec}_g wordt weergegeven door \widetilde{Ec}_g i.p.v. door $|\widetilde{Ec}_g|$.

Als invoer voor de subroutine GROKO worden gegeven:

\widetilde{Ec}_g i, de dimensieloze energieflex met grootte \widetilde{Ec}_g i en richting $\theta_{0 i}$
 θ_w , de windrichting
 ΔF , de dimensieloze afstand, die afgelegd is door het golfveld langs de straal tijdens de tijdstap, Δt .

De subroutine GROKO berekent hieruit:

$$\widetilde{Ec}_g \text{ i}+1 = \widetilde{Ec}_g \text{ i} + \frac{d\widetilde{Ec}_g}{dF} \cdot \Delta F$$

Bij de in par. 3.2.2 afgeleide differentiaalvergelijkingen voor $d\widetilde{Ec}_g/dF$ is onderscheid gemaakt tussen situaties met zeegang en met deining. Tevens zijn er situaties waarin zeegang en deining tegelijk voorkomen. Voor zeegang, deining en voor de mogelijke combinaties van deining en zeegang zullen nu differentievergelijkingen afgeleid worden uit de differentiaalvergelijkingen.

1) Alleen zeegang:

dit is het geval als zowel $0 \leq \widetilde{Ec}_g \text{ i} \cos(\theta_{0 i} - \theta_w) < \widetilde{Ec}_{g\infty}$
 en $\frac{\widetilde{Ec}_g \text{ i}}{\cos(\theta_{0 i} - \theta_w)} < Ec_{g\infty}$

$\widetilde{Ec}_g \text{ i}+1$ en $\theta_{0 i+1}$ worden als volgt berekend:

$$p_i = \widetilde{Ec}_g \cos(\theta_{0i} - \theta_w)$$

$$q_i = \widetilde{Ec}_g \sin(\theta_{0i} - \theta_w)$$

$$\widetilde{F}_i = \left[\frac{1}{k} \operatorname{arctanh} \left(\frac{p_i}{\widetilde{Ec}_{g\infty}} \right)^{1/2b1} \right]^{1/m}$$

$$\widetilde{F}_{i+1} = \widetilde{F}_i + \Delta \widetilde{F}$$

$$p_{i+1} = \widetilde{Ec}_{g\infty} \left[\tanh(k \widetilde{F}_{i+1}^m) \right]^{2b1}$$

$$q_{i+1} = q_i - (p_{i+1} - p_i) \frac{q_i}{\widetilde{Ec}_{g\infty} - p_i}$$

$$\widetilde{Ec}_{gi+1} = \sqrt{p_{i+1}^2 - q_{i+1}^2}$$

$$(\theta_{0i+1} - \theta_w) = \arctan \left(\frac{q_{i+1}}{p_{i+1}} \right)$$

θ_{0i+1} wordt berekend met een bereik van $0 \leq \theta_{0i+1} < 2\pi$ door de subroutine ANG uit q_{i+1} , p_{i+1} en θ_w (par. III.3.9).

2) Zeegang en deining:

2a) als $0 \leq \widetilde{Ec}_g \cos(\theta_{0i} - \theta_w) < \widetilde{Ec}_{g\infty}$

$$\text{en } \frac{\widetilde{Ec}_g}{\cos(\theta_{0i} - \theta_w)} \geq \widetilde{Ec}_{g\infty}$$

2b) als $\cos(\theta_{0i} - \theta_w) < 0$

Berekening \widetilde{Ec}_{gi+1} en θ_{0i+1} in geval 2a):

$$\widetilde{F}_{\text{relax}} = \text{const} \left(\frac{c_g/q}{u_{\text{gem}}} \right)^p$$

$$\Delta \widetilde{Ec}_g = \left[\widetilde{Ec}_g - \widetilde{Ec}_{g\infty} \cos(\theta_{0i} - \theta_w) \right] * \left(\exp \left(- \frac{\Delta \widetilde{F}}{\widetilde{F}_{\text{relax}}} \right) - 1 \right)$$

$$p_i = (\widetilde{Ec}_g + \frac{1}{2} \Delta \widetilde{Ec}_g) \cos(\theta_{0i} - \theta_w)$$

$$q_i = (\widetilde{Ec}_g + \frac{1}{2} \Delta \widetilde{Ec}_g) \sin(\theta_{0i} - \theta_w)$$

$$\widetilde{F}_i = \left[\frac{1}{k} \operatorname{arctanh} \left(\frac{p_i}{\widetilde{Ec}_{g\infty}} \right)^{1/2b1} \right]^{1/m}$$

$$\widetilde{F}_{i+1} = \widetilde{F}_i + \Delta F$$

$$\Delta p = \widetilde{Ec}_{g\infty} \left[\tanh(k \widetilde{F}_{i+1}^m) \right]^{2b1} - p_i$$

$$\Delta q = -\Delta p \frac{q_i}{\widetilde{Ec}_{g\infty} - p_i}$$

$$p_{i+1} = (\widetilde{Ec}_g i + \Delta \widetilde{Ec}_g) \cos(\theta_{0i} - \theta_w) + \Delta p$$

$$q_{i+1} = (\widetilde{Ec}_g i + \Delta \widetilde{Ec}_g) \sin(\theta_{0i} - \theta_w) + \Delta q$$

$$\widetilde{Ec}_g i+1 = \sqrt{p_{i+1}^2 + q_{i+1}^2}$$

$$\theta_{0i+1} \text{ volgt uit } p_{i+1}, q_{i+1} \text{ en } \theta_w \text{ (subroutine ANG)}$$

Berekening $\widetilde{Ec}_g i+1$ en θ_{0i+1} in geval 2b):

$$\Delta \widetilde{Ec}_g = \widetilde{Ec}_g i * (\exp(-\frac{\Delta F}{F_{relax}}) - 1)$$

$$p_i = (\widetilde{Ec}_g i + \frac{1}{2} \Delta \widetilde{Ec}_g) \cos(\theta_{0i} - \theta_w)$$

$$q_i = (\widetilde{Ec}_g i + \frac{1}{2} \Delta \widetilde{Ec}_g) \sin(\theta_{0i} - \theta_w)$$

$$\Delta p = \widetilde{Ec}_{g\infty} \left[\tanh(k \Delta F^m) \right]^{2b1}$$

$$\Delta q = -\Delta p \frac{q_i}{\widetilde{Ec}_{g\infty} - p_i}$$

$$p_{i+1} = (\widetilde{Ec}_g i + \Delta \widetilde{Ec}_g) \cos(\theta_{0i} - \theta_w) + \Delta p$$

$$q_{i+1} = (\widetilde{Ec}_g i + \Delta \widetilde{Ec}_g) \sin(\theta_{0i} - \theta_w) + \Delta q$$

$$\widetilde{Ec}_g i+1 = \sqrt{p_{i+1}^2 + q_{i+1}^2}$$

$$\theta_{0i+1} \text{ volgt uit } p_{i+1}, q_{i+1} \text{ en } \theta_w \text{ (subroutine ANG).}$$

3) Alleen deining

Dit is het geval als $\widetilde{Ec}_g i \cos(\theta_{0i} - \theta_w) \geq \widetilde{Ec}_{g\infty}$

De berekening van $\widetilde{Ec}_g i+1$ en θ_{0i+1} is als volgt:

$$\Delta \widetilde{Ec}_g = (\widetilde{Ec}_g i - \widetilde{Ec}_{gw} \cos(\theta_{0i} - \theta_w)) * (\exp(-\frac{\Delta F}{F_{relax}}) - 1)$$

$$\widetilde{Ec}_{gi+1} = \widetilde{Ec}_{gi} + \Delta \widetilde{Ec}_g$$

$$\theta_{0i+1} = \theta_{0i}$$

De berekeningswijze voor de ontwikkeling van \widetilde{Ec}_g is weergegeven in het volgende structuurdiagram voor de subroutine GROKO.

In- en uitvoer van de subroutine GROKO.

Invoer:

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| golfparameters op tijdstip t | |
| dimensieloze energieflex | \widetilde{Ec}_{g1} |
| gemiddelde golfrichting | θ_{01} |
| gemiddelde windrichting | $\theta_w \text{ gem}$ |
| dimensieloze lengte van het straal- | |
| segment | ΔF |

Uitvoer:

| | |
|----------------------------------|-----------------------|
| golfparameters op tijdstip t + t | |
| dimensieloze energieflex | \widetilde{Ec}_{g2} |
| gemiddelde golfrichting | θ_{02} |

Subroutine GROKO

$$\alpha = \theta_{01} - \theta_{w \text{ gem}}$$

$$\widetilde{Ec}_g 1 < \widetilde{Ec}_{g\infty} \cos \alpha$$

T (zeegang)

F (deining)

alleen ontwikkeling
zeegang

$$\cos \alpha \geq 0$$

T

F

$$\Delta \widetilde{Ec}_g = (\widetilde{Ec}_g 1 - \widetilde{Ec}_{g\infty} \cos \alpha) \exp\left(-\frac{\Delta F}{F_{\text{relax}}} - 1\right) \quad \Delta \widetilde{Ec}_g = \widetilde{Ec}_g 1 \exp\left(-\frac{\Delta F}{F_{\text{relax}}} - 1\right)$$

$$\widetilde{Ec}_g 1 \cos \alpha < \widetilde{Ec}_{g\infty}$$

T

F

$$\begin{aligned} p1 &= (\widetilde{Ec}_g 1 + \frac{1}{2} \Delta \widetilde{Ec}_g) \cos \alpha \\ q2 &= (\widetilde{Ec}_g 1 + \frac{1}{2} \Delta \widetilde{Ec}_g) \sin \alpha \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{afname deining en} \\ \text{ontwikkeling zeegang} \end{array}$$

alleen afname
deining:

$$\begin{aligned} p1 &= \widetilde{Ec}_g 1 \cos \alpha \\ q1 &= \widetilde{Ec}_g 1 \sin \alpha \end{aligned}$$

$$\widetilde{F1} = \left[\frac{1}{k} \operatorname{arctanh}\left(\frac{p1}{\widetilde{Ec}_{g\infty}}\right) \frac{1}{2b1} \right]^{1/m}$$

$$\widetilde{F2} = \widetilde{F1} + \Delta \widetilde{F}$$

$$p2 = \widetilde{Ec}_{g\infty} [\tanh(k \widetilde{F2}^m)]^{2b1}$$

$$q2 = q1 - (p2 - p1) \frac{q1}{\widetilde{Ec}_{g\infty} - p1}$$

$$p1 > 0$$

T

F

$$\begin{aligned} \widetilde{F1} &= \left[\frac{1}{k} \operatorname{arctanh}\left(\frac{p1}{\widetilde{Ec}_{g\infty}}\right) \frac{1}{2b1} \right]^{1/m} \\ \widetilde{F2} &= \widetilde{F1} + \Delta \widetilde{F} \\ p2 &= \widetilde{Ec}_{g\infty} [\tanh(k \widetilde{F2}^m)]^{2b1} \\ \Delta p &= p2 - p1 \end{aligned}$$

$$\Delta p = \widetilde{Ec}_{g\infty} [\tanh(k \Delta \widetilde{F}^m)]^{2b1}$$

$$\Delta q = -\Delta p \frac{q1}{\widetilde{Ec}_{g\infty} - p1}$$

$$p2 = (\widetilde{Ec}_g 1 + \Delta \widetilde{Ec}_g) \cos \alpha + \Delta p$$

$$q2 = (\widetilde{Ec}_g 1 + \Delta \widetilde{Ec}_g) \sin \alpha + \Delta q$$

$$\widetilde{Ec}_g 2 = \sqrt{p2^2 + q2^2}$$

CALL ANG(in:p2,q2, $\theta_{w \text{ gem}}$,uit: θ_{02})

bereken de golfrichting θ_{02} uit de
komponenten van $\widetilde{Ec}_g 2$ // $\theta_{w \text{ gem}}$, p2,
en $\perp \theta_{w \text{ gem}}$, q2.

$$\begin{aligned} \widetilde{Ec}_g 2 &= \widetilde{Ec}_g 1 + \Delta \widetilde{Ec}_g \\ \theta_{02} &= \theta_{01} \end{aligned}$$

III.3.3 Subroutine START.

Bij het opstarten van het model en in de startpunten aan de kust zijn de beginvoorwaarden voor de golfparameters:

$$E = 0$$

θ_0 is niet gedefinieerd als $E = 0$,
stel $\theta_0 = \theta_w$.

Omdat uit $E=0$ volgt dat de groepssnelheid $c_g = 0$, is de normale procedure voor de berekening van een nieuw punt van de straal niet bruikbaar. Voor het starten van stralen wordt gebruik gemaakt van het feit, dat het golfbeeld, opgewekt na een zekere strijklengte, F , gelijk is aan het golfbeeld opgewekt na een zekere windduur, t_{eq} . Tussen t_{eq} en F bestaat de dimensieloze relatie:

$$\tilde{t}_{eq} = \int_0^{\tilde{F}} \tilde{c}_g^{-1} d\tilde{F} \quad (\text{volgt uit vgl. (2.3.8)})$$

$$\text{waarin: } \tilde{t} = \frac{g}{u} t$$

$$\tilde{F} = \frac{g}{u^2} f$$

$$\tilde{c}_g = \frac{g}{4\pi \tilde{f}_m} \quad (\text{diep water benadering})$$

Deze relatie kan gecombineerd worden met de dimensieloze relatie tussen strijklengte en piekfrequentie:

$$\tilde{f}_m = a_5 \tilde{F}^{b_5}$$

$$\text{Mitsuyasu: } \tilde{f}_m = 2.92 \tilde{F}^{-\frac{1}{3}} \quad (2.3.17)$$

substitutie hiervan in de formule voor \tilde{t}_{eq} geeft:

$$\tilde{t}_{eq} = \int_0^{\tilde{F}} \frac{4\pi a_5}{q} \tilde{F}^{b_5} d\tilde{F}$$

integratie hiervan geeft:

$$\tilde{t}_{eq} = \frac{1}{q(1+b_5)} 4\pi a_5 \tilde{F}^{(1+b_5)}$$

$$\Rightarrow \tilde{F}_{eq} = \left(\frac{q(1 + b_5)}{4\pi a_5} \right) \left(\frac{1}{1 + b_5} \right) \tilde{t} \left(\frac{1}{1 + b_5} \right)$$

$$= -a_6 \tilde{t}^{b_6}$$

invullen van de waarden van Mitsuyasu met $q = 1$ geeft:

$$a_6 = 0.002449$$

$$b_6 = 1.5$$

Door invullen van \tilde{t} in de laatste vgl. is $\tilde{\Delta F}_{eq}$ te berekenen, met windsnelheid volgt dan ΔF_{eq} . Het volgende punt van de straal is nu, startpunt (x_1, y_1) :

$$x_2 = x_1 + \Delta F_{eq} \cos \theta_w$$

$$y_2 = y_1 + \Delta F_{eq} \sin \theta_w$$

De geïntegreerde energie, \tilde{E} , volgt met $\tilde{\Delta F}_{eq}$ uit de groeikromme:

$$\tilde{E} = \tilde{E}_\infty (\tanh(K \tilde{\Delta F}_{eq}^m))^2$$

en $\theta_0 = \theta_w$.

Met de bovenstaande berekeningswijze wordt door de subroutine START eerst een beginschatting voor het punt (x_2, y_2) berekend, uitgaande van de windsnelheid en -richting in het startpunt (x_1, y_1) op het tijdstip van starten, t_1 . Vervolgens wordt een verbeterde schatting van (x_2, y_2) berekend, uitgaande van windsnelheid en -richting in (x_1, y_1) op t_1 en in de beginschatting voor (x_2, y_2) op $t_1 + \Delta t$.

In- en uitvoer van de subroutine START:

Invoer: coördinaten startpunt x_1, y_1
 tijdstip van starten t_1

Uitvoer: parameters van de straal op tijdstip $t_2 = t_1 + \Delta t$

| | |
|--------------------------|--------------|
| coördinaten | x_2, y_2 |
| energie van het golfveld | E_2 |
| piekfrequentie | f_m^2 |
| gemiddelde golfrichting | θ_0^2 |

Subroutine START

t2= t1 + Δt

CALL WIND(in: x1,y1,t1 uit: u1,θ_{w1})

IF (u1<0.1) u1= 0.1

u_{gem} = u1

θ_{w gem} = θ_{w1}

iteratie= 0

DO zolang iteratie ≤ 1

$$\hat{\Delta t} = \frac{g \Delta t}{u_{gem}}$$

$$\hat{\Delta F}_{eq} = a_6 \hat{\Delta t}^{b_6}$$

$$\theta_{02} = \theta_{w gem}$$

$$\Delta F_{eq} = \frac{\hat{\Delta F}_{eq} u_{gem}^2}{g}$$

$$x_2 = x_1 + \Delta F_{eq} \cos \theta_{02}$$

$$y_2 = y_1 + \Delta F_{eq} \sin \theta_{02}$$

T

iteratie < 1

F

CALL WIND(in: x2,y2,t2 uit: u2,θ_{w2})

IF (u2<0.1) u2= 0.1

CALL AVVEC(in: u1,u2,θ_{w1},θ_{w2} uit: u_{gem},θ_{w gem})

iteratie= iteratie + 1

$$\tilde{E}_2 = \tilde{E}_\infty (\tanh(k \hat{\Delta F}_{eq}^m))^2$$

$$E_2 = \frac{\tilde{E}_2 u_{gem}^4}{g^2}$$

$$f_{m2} = \frac{g}{u_{gem}} \left(\frac{\tilde{E}_2}{a} \right)^{1/b}$$

III.3.4 Subroutine VAK.

De subroutine VAK controleert of het berekende punt van de straal binnen het modelgebied valt. Zo ja, dan krijgt de parameter STRAAL de waarde TRUE, zo nee dan STRAAL= FALSE;

Als STRAAL= TRUE, wordt nagegaan in welk vak het berekende punt van de straal is terecht gekomen en het nummer van het vak wordt gekoppeld aan het nummer van de straal via de array NSTR(jx,jy,j)

Hierin is: jx,jy het vaknummer
 j is een teller die het mogelijk maakt
 meerdere stralen aan één vak te koppelen
NSTR(jx,jy,j) is gelijk aan het betreffende straalnr.

Uit de parameters van de in het vak terecht gekomen stralen worden door de subroutine VAKPAR de golfparameters van dat vak berekend.

In- en uitvoer van de subroutine VAK.

Invoer: coördinaten van het punt van de straal x,y
 straalnummer i

Uitvoer: de array NSTR(jx,jy,j)
 de logische parameter STRAAL

Subroutine VAK

| | |
|---|--------|
| <p>Ga na of het punt (x,y) van de straal binnen het model valt: STRAAL= F IF ($x_{min} \leq x < x_{max}$ en $y_{min} \leq y < y_{max}$) STRAAL= T</p> | |
| T | STRAAL |
| <p>Ga na in welk vak (x,y) valt en koppel het straalnr. i aan het vaknr. (jx,jy): jx= IFIX(x/Δx + 1) jy= IFIX(y/Δy + 1)</p> | |
| <p>DO zolang $j < j_{max}$ en NSTR(jx,jy,j) \neq 0</p> | |
| <p>j= j + 1</p> | |
| <p>NSTR(jx,jy,j)= 0</p> | |
| T | F |
| NSTR(jx,jy,j)= i | |

In het model heeft j_{max} de waarde 10. Als er meer dan 10 stralen in een vak terecht komen, worden alleen de nummers van de eerste 10 stralen opgeslagen in de array NSTR(jx,jy,j).

III.3.5 Subroutine VAKPAR.

De subroutine VAKPAR berekent de golfparameters van de vakken uit de golfparameters van de stralen. De golfparameters van een vak worden berekend door middeling van de golfparameters van de stralen die in dat vak beland zijn. De nummers van deze stralen zijn opgeslagen in de array NSTR(jx,jy,j), zie par. III.3.4.

Voor E_{vak} en f_m vak worden respectievelijk het gemiddelde van $E(i)$ en $f_m(i)$ van de stralen genomen:

$$E_{vak} = (\sum E(i)) / \text{aantal stralen in het vak}$$

$$f_m \text{ vak} = (\sum f_m(i)) / \text{aantal stralen in het vak}$$

Voor θ_0 vak wordt een gewogen gemiddelde genomen van $\theta_0(i)$ van de stralen. Als gewicht voor de middeling wordt de energie, $E(i)$, van dezelfde straal gebruikt. θ_0 vak wordt als volgt berekend:

$$CS_{vak} = \sum (E(i) * \cos \theta_0(i))$$

$$SN_{vak} = \sum (E(i) * \sin \theta_0(i))$$

$$\theta_0 \text{ vak} = \arctan\left(\frac{SN_{vak}}{CS_{vak}}\right)$$

θ_0 vak wordt berekend met een bereik van $0 \leq \theta_0 \text{ vak} < 2\pi$.

In- en uitvoer van de subroutine VAKPAR.

Invoer:

| | |
|--|---------------|
| golfparameters van de stralen (arrays) | |
| energie van het golfveld | $E(i)$ |
| piekfrequentie | $f_m(i)$ |
| gemiddelde golfrichting | $\theta_0(i)$ |
| array die de straalnummers aan de vaknummers koppelt | NSTR(jx,jy,j) |
| aantal vakken in x-richting | M_x |
| aantal vakken in y-richting | M_y |

Uitvoer: golfparameters van de vakken (arrays)

energie van het golfveld $E_{vak}(jx, jy)$
 piekfrequentie $f_m vak(jx, jy)$
 gemiddelde golfrichting $\theta_0 vak(jx, jy)$

Subroutine VAKPAR

DO jx= 1, Mx

DO jy= 1, My

Istr= 0 Istr is een teller voor het aantal stralen in het vak

CSvak= 0

SNvak= 0

DO j= 1, 10

NSTR(jx, jy, j)=0

T

F

Sommeer de golfparameters van de stralen

Istr= Istr + 1

$E_{vak}(jx, jy) = E_{vak}(jx, jy) + E(NSTR(jx, jy, j))$

$f_m vak(jx, jy) = f_m vak(jx, jy) + f_m(NSTR(jx, jy, j))$

$CSvak = CSvak + E(NSTR(jx, jy, j)) \times \cos(\theta_0(NSTR(jx, jy, j)))$

$SNvak = SNvak + E(NSTR(jx, jy, j)) \times \sin(\theta_0(NSTR(jx, jy, j)))$

De waarde van $\theta_0(NSTR(jx, jy, j))$ wordt bewaard om de berekening van $\theta_0 vak$ te vereenvoudigen als slechts één straal in het vak terecht komt.

$\theta_{0res} = \theta_0(NSTR(jx, jy, j))$

Istr=0

T

F

geen
stralen
in vak
(jx, jy)

T

Istr > 1

F

meer dan één straal in vak
(jx, jy)

$E_{vak}(jx, jy) = E_{vak}(jx, jy) / Istr$

$f_m vak(jx, jy) = f_m vak(jx, jy) / Istr$

$\begin{bmatrix} CSvak \\ SNvak \end{bmatrix} \Rightarrow \theta_0 vak(jx, jy)$
(p. 110)

één straal in
vak (jx, jy)
 $\theta_0 vak(jx, jy) = \theta_{0res}$

Bereken $\theta_0 \text{ vak}$ uit CSvak en SNvak :

$$\begin{bmatrix} \text{CSvak} \\ \text{SNvak} \end{bmatrix} \Rightarrow \theta_0 \text{ vak}(jx, jy)$$

| $ \text{CSvak} > 10^{-20}$ | | | |
|---|---|--|--|
| $\text{CSvak} \geq 0$ | | $\text{SNvak} \geq 0$ | |
| T | F | T | F |
| $\theta_0 \text{ vak}(jx, jy) = \arctan(\frac{\text{SNvak}}{\text{CSvak}})$ | $\theta_0 \text{ vak}(jx, jy) = \arctan(\frac{\text{SNvak}}{\text{CSvak}}) + \pi$ | $\theta_0 \text{ vak}(jx, jy) = \pi/2$ | $\theta_0 \text{ vak}(jx, jy) = 1.5 \pi$ |
| $\theta_0 \text{ vak}(jx, jy) < 0$ | | | |
| T | F | | |
| $\theta_0 \text{ vak}(jx, jy) = \theta_0 \text{ vak}(jx, jy) + 2\pi$ | | | |

III.3.6 Subroutine VAKMID.

De subroutine VAKMID berekent de golfparameters van de vakken, waarin geen stralen terecht zijn gekomen. Deze golfparameters worden berekend door middeling van de golfparameters van de aangrenzende vakken waarin wel stralen terecht zijn gekomen (zie par. 4.2 fig. 4.2).

Als in twee of meer aangrenzende vakken stralen terecht zijn gekomen, worden de golfparameters op dezelfde wijze gemiddeld, als bij de berekening van de golfparameters van de vakken uit de stralen:

Ivak is aantal aangrenzende vakken met stralen

$$\text{Evak} = (\sum E \text{ aangrenzende vakken}) / \text{Ivak}$$

$$f_m \text{ vak} = (\sum f_m \text{ aangrenzende vakken}) / \text{Ivak}$$

$$\text{CSvak} = \sum (E \text{ aangr. vakken} * \cos(\theta_0 \text{ aangr. vakken}))$$

$$\text{SNvak} = \sum (E \text{ aangr. vakken} * \sin(\theta_0 \text{ aangr. vakken}))$$

$$\theta_0 \text{ vak} = \arctan\left(\frac{\text{SNvak}}{\text{CSvak}}\right) \quad (0 \leq \theta_0 \text{ vak} < 2\pi)$$

Als in één aangrenzend vak stralen terecht zijn gekomen, wordt voor Evak ($\frac{1}{2} * E$ aangrenzend vak) genomen. f_m vak is dan niet gedefinieerd en wordt gelijk nul gesteld. Dit wordt gedaan om te voorkomen, dat de parameters zich bij gebrek aan informatie ongedempt over het model kunnen verspreiden. Voor θ_0 vak wordt dezelfde waarde als in het aangrenzende vak genomen.

Als er in geen van de aangrenzende vakken stralen terecht zijn gekomen, blijven de golfparameters van het vak gelijk nul.

Als het "lege vak" door middeling opgevuld is, dus als één of meer aangrenzende vakken stralen bevatten, wordt in het midden van het lege vak een nieuwe straal gestart met als beginvoorwaarde de golfparameters van het vak, zoals die zojuist berekend zijn.

In- en uitvoer van de subroutine VAKMID.

Invoer:

| | |
|---------------------------------------|----------------|
| vaknummer | jx,jy |
| vakafmeting in x-richting | Δx |
| vakafmeting in y-richting | Δy |
| aantal vakken in x-richting | Mx |
| aantal vakken in y-richting | My |
| array met de straalnummers | NSTR(jx,jy,j)* |
| golfparameters van de vakken (arrays) | |
| energie van het golfveld | Evak |
| piekfrequentie | f_m vak |
| gemiddelde golfrichting | θ_0 vak |

Uitvoer:

| | |
|-----------------------------------|------------|
| golfparameters van vak (jx,jy) | |
| opgeslagen in de arrays | |
| parameters van de gestarte straal | |
| coördinaten | x,y |
| energie van het golfveld | E |
| gemiddelde golfrichting | θ_0 |
| logische parameter | STRAAL |

* Als het vak (jx,jy) geen stralen bevat is NSTR(jx,jy,1)= 0.

Subroutine VAKMID

Ivak= 0 CSvak= 0 SNvak= 0

| | | |
|--|--|--|
| jx-1 < 1 | | |
| T | | F |
| | NSTR(jx-1,jy,1)=0 | F |
| | Ivak= Ivak + 1 | |
| | Evak(jx,jy)= Evak(jx,jy) + Evak(jx-1,jy) | |
| | f _m vak(jx,jy)= f _m vak(jx,jy) + f _m vak(jx-1,jy) | |
| | CSvak= CSvak + Evak(jx-1,jy) * cos(θ ₀ vak(jx-1,jy)) | |
| | SNvak= SNvak + Evak(jx-1,jy) * sin(θ ₀ vak(jx-1,jy)) | |
| jx+1 > Mx | | F |
| T | | F |
| | NSTR(jx+1,jy,1)=0 | F |
| | Ivak= Ivak + 1 | |
| | Evak(jx,jy)= Evak(jx,jy) + Evak(jx+1,jy) | |
| | idem f _m vak, CSvak en SNvak | |
| jy-1 < 1 | | F |
| T | | F |
| | NSTR(jx,jy-1,1)=0 | F |
| | Ivak= Ivak + 1 | |
| | Evak(jx,jy)= Evak(jx,jy) + Evak(jx,jy-1) | |
| | idem f _m vak, CSvak en SNvak | |
| jy+1 > My | | F |
| T | | F |
| | NSTR(jx,jy+1,1)=0 | F |
| | Ivak= Ivak + 1 | |
| | Evak(jx,jy)= Evak(jx,jy) + Evak(jx,jy+1) | |
| | idem f _m vak, CSvak en SNvak | |
| Ivak= 0 | | F |
| T | | F |
| | Ivak > 1 | F |
| | Evak(jx,jy)=Evak(jx,jy)/Ivak | Evak(jx,jy)=Evak(jx,jy)/2 |
| | f _m vak(jx,jy)=f _m vak(jx,jy)/Ivak | f _m vak(jx,jy)= 0 |
| | CSvak SNvak | ⇒ θ ₀ vak(jx,jy) zie III.3.5 VAKPAR |
| Start een nieuwe straal: | | |
| x= (jx- $\frac{1}{2}$)Δx | | |
| y= (jy- $\frac{1}{2}$)Δy | | |
| E= Evak(jx,jy) | | |
| θ ₀ = θ ₀ vak(jx,jy) | | |
| STRAAL= TRUE | | |

III.3.7 Subroutine AVVEC.

Zowel de windvector, \vec{u} , als de groepssnelheidsvector, \vec{c}_g , moeten vectoriëel gemiddeld worden, om tot gemiddelde snelheden te komen. Deze gemiddelde snelheden worden berekend door de subroutine AVVEC, daarbij wordt aan de snelheden aan begin en eind van de tijdstap hetzelfde gewicht toegekend. De gemiddelde richting, θ_{gem} , wordt bepaald met een bereik van $0 \leq \theta_{\text{gem}} < 2\pi$.

III.3.8 De funktie ATANH.

De inverse funktie $\text{arctanh}(x)$ is niet standaard beschikbaar. Deze funktie wordt gegeven door:

$$\text{arctanh}(x) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+x}{1-x}\right)$$

III.3.9 Subroutine ANG.

De voortplantingsrichting van het golfveld, θ_0 , wordt door deze subroutine berekend uit de waarden p , q en $\theta_{w \text{ gem}}$ die volgen uit de subroutine GROKO (par. III.3.2).

θ_0 wordt berekend met een bereik van $0 \leq \theta_0 < 2\pi$.

Bijlage IV

Windveld orkaan.

Het windveld van de orkaan is een analytisch windveld, gegeven door de volgende formules (Young e.a. 1981):

Windsnelheid:

- lijn met maximale windsnelheid:

$$u(r) = u_{\max} \left(\frac{r}{R} \right)^7 \exp\left(7\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right) \quad \text{als } r \leq R \quad (\text{IV.1})$$

hierin is:

$u(r)$ de windsnelheid

u_{\max} de maximale windsnelheid, deze treedt op op een afstand R van het oog van de orkaan

r radiale afstand tot het oog van de orkaan

R afstand van het oog tot het punt met de maximale windsnelheid, u_{\max}

$$u(r) = u_{\max} \exp\left(b\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right) \quad \text{als } r > R \quad (\text{IV.2})$$

hierin is:

$b = 0.0025 R + 0.05$ met R in km

- windsnelheid afhankelijk van de plaats in het windveld:

$$u(r, \theta_m) = u(r) - \gamma v_{FM} \quad (\text{IV.3})$$

met $\gamma = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta_m) \approx \left(\frac{Rr}{R^2 + r^2} \right)$

hierin is:

θ_m is de hoek tussen de lijn met de maximale windsnelheden en de radiale arm.

v_{FM} is de translatiesnelheid van de storm.

de factor $\frac{Rr}{R^2 + r^2}$ komt niet in de formules van Young voor. Deze factor is toegevoegd, omdat de invloed van de translatiesnelheid van de storm op de windsnelheid bij toenemende afstand van het oog afneemt. De gebruikte uitdrukking is afkomstig uit CERC (1973).

windrichting:

De windrichting maakt een hoek β met een normaal op de radiale arm (dit is de lijn door het oog en het beschouwde punt). De windrichting is naar het oog toe gedraaid. β is afhankelijk van r :

$$\beta = \begin{cases} \frac{r}{R} \approx 10^\circ & 0 \leq r \leq R \\ 10^\circ + 5 \left(\frac{r}{R} - 1 \right) \approx 15^\circ & R \leq r \leq 1.2R \\ 25^\circ & r \geq 1.2R \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

De gebruikte waarden voor de parameters van het windveld zijn:

$$R = 40 \text{ km}$$

$$u_{\max} = 41.5 \text{ m/s}$$

de richting met maximale windsnelheden maakt een hoek van 33.7° met de x-as in het model.

$v_{\text{FM}} = 15 \text{ m/s}$ (De storm is stationair; v_{FM} bepaald de asymmetrie in de windsnelheidsverdeling.)

Bijlage V

Programmalingsting.

```

LOGICAL STRAAL(2000) /2000*.FALSE./
DIMENSION X(2000),Y(2000),E(2000),FP(2000),TH0(2000),
+NSTP(20,20,10),EVAK(20,20),FVAK(20,20),THOVAK(20,20),
+XKUST(-1),YKUST(-1)

```

COMMON parameters

```

G      G = /s**2] zwaartekrachtsversnelling (=9.806)
STT    [seconden] tijdstap
EDLINE [dimensieloos] dimensieloze energie bij volgroeide zeevang
GRCF, GREX [dimensieloos] coefficient en exponent van de groei-
+         kroome:  $G = HINF * \tanh(GRCF * FDL * GREX)$ 
+         H      dimensieloze golfhoogte
+         HINF   dimensieloze golfhoogte bij volgroei-
+         de zeevang;  $HINF = 4 * \sqrt{EDLINE}$ 
+         FDL    de dimensieloze strijk lengte
CF0, EX0 [dimensieloos] coefficient en exponent van de relatie
+         tussen dimensieloze energie, EDL, en dimensieloze piek-
+         frequentie, FPDL:  $EDL = CF0 * FPDL * EX0$ 
EFINF [dimensieloos] dimensieloze energieflex bij volgroeide
+         zeevang
CF1, EX1 [dimensieloos] coefficient en exponent van de relatie
+         tussen dimensieloze energieflex, EF, en dimensieloze
+         energie, EDL:  $EDL = CF1 * EF * EX1$ 
CF2, EX2 [dimensieloos] idem inverse relatie;  $EDL = CF2 * EF * EX2$ 
CF3      [-**0.5/s] coefficient van de relatie tussen groeps-
+         snelheid, VGR, en energie, E, in geval van deining;
+          $VGR = CF3 * E * 0.25$ 
CF4      [s**2] coefficient van de relatie tussen groeps-
+         snelheid, VGR, en piekfrequentie, FP;  $VGR = CF4 / FP$ 
CF5, EX5 [dimensieloos] coefficient en exponent van de relatie
+         tussen dimensieloze strijk lengte, FDL, en dimensieloze
+         windduur, TDL;  $FDL = CF5 * TDL * EX5$ 
SWAD     [dimensieloos] constante in de formule voor de dimen-
+         sielozel relaxatieafstand voor de afname van deining;
+          $FDL_{relax} = SWAD * (VGR(FP) / U) * 3$ 
Q        [dimensieloos] verhouding tussen de groepssnelheid
+         berekende bij de piekfrequentie, zoals die volgt uit de
+         lineaire theorie, VGRlineair, en de gemiddelde groeps-
+         snelheid van het golfveld, VGP;  $VGR = Q * VGR_{lineair}$ 

```

```

COMMON G,STT,EDLINE,GRCF,GREX,CF0,EX0,EFINF,CF1,EX1,CF2,EX2,
+CF3,CF4,CF5,EX5,SWAD,Q

```

```

Invoer en berekening COMMON parameters

```

```

G=9.806
PI=3.1415927

```

```

STT=5400
CF0=6.345-6
EX0=-2

```

```

C CF5,EX5 [dimensieloze] coefficient en exponent van de relatie
C tussen dimensieloze piekfrequentie,FPDL,en dimensieloze
C stringlengte,FOL;FPDL=CF5*FOL**EX5

```

```

CF5=2.92
EX5=-1.73.
EDLINF=.0036
G1CF=.015
G2EX=.45
CF=.6
OMAR=7000
CF1=1/(4*PI/CF0**((1/EX0)))
EX1=1-1/EX0
CF2=1/CF1**((1/EX1))
EX2=1/EX1
CFINF=CF1*EDLINF**EX1
CF3=CFINF/EDLINF*(G2CF/EDLINF)**.25
CF4=(G1CF/(4*PI))
EX6=1/(1+EX5)
CF6=(1/(EX6*4*PI*CF5))**EX6

```

```

C Initialisatie van het model.

```

```

C NMAX maximum aantal stralen dat het model kan berekenen(in
C verband met de dimensies van de arrays)

```

```

C NY aantal vakken in Y-richting

```

```

C MY " " " Y-richting

```

```

C STX End-stapgrootte in X-richting

```

```

C STY End-stapgrootte in Y-richting

```

```

C TSTOP [seconden] einde van de berekening

```

```

NMAX=2000
MX=20
MY=20
STX=50000
STY=50000
TSTOP=33*STT
T=0

```

```

C Lees de startpunten aan de kust in:

```

```

C aantal: NKUST

```

```

C coördinaten: XKUST,YKUST

```

```

READ(5,*)NKUST,(XKUST(J),YKUST(J),J=1,NKUST)

```

```

C Druk de startpunten aan de kust af ter controle:

```

```

0
1 WRITE(6,2)
2 FORMAT('0  STARTPUNTEN AAN DE KUST'//
+ ' J  XKUST(J) EXMT  YKUST(J) [KWI']//
3 DO 4 J=1,NKUST
4   XKSTKM=XKUST(J)/1000
5   YKSTKM=YKUST(J)/1000
6   WRITE(6,3)J,XKSTKM,YKSTKM
7   FORMAT(I4,F10.0,F10.0)
8 CONTINUE

0
0
0   Let de parameters van alle vakken = 0

0
0   DO 15 JY=1,MY
0   DO 10 JX=1,MX
0   EVAK(JX,JY)=0
0   EVAK(JX,JY)=0
0   EVAK(JX,JY)=0
0   DO 5 J=1,10
0   NSTR(JX,JY,J)=0
6 CONTINUE
10 CONTINUE
15 CONTINUE

0
0   Start in elk vak een straal

0
0   DO 65 JX=1,MX
0   DO 60 JY=1,MY
0   I=JY+(JX-1)*MY
0   X1=(JX-.5)*STX
0   Y1=(JY-.5)*STY

0
0   Start straal nr.I in punt (X1,Y1)
0   Jitkonst: eindpunt (X(I),Y(I)) op tijdstip T+STT
0   golfparameters van straal nr.I op tijdstip T+STT
0   CALL START(X1,Y1,T,X(I),Y(I),E(I),FP(I),TH0(I))

0
0   Ga na of het eindpunt (X(I),Y(I)) binnen het model valt.
0   Zo ja, ga na in welk vak het punt valt en koppel het nummer van
0   de straal aan het nummer van het vak.
0   CALL VAK(X(I),Y(I),I,STX,STY,MX,MY,NSTR,STRAAL(I))
60 CONTINUE
65 CONTINUE

0
0   Het totaal aantal stralen in het model is:
0   N=MX*MY

0
0   70 Terugkeeradres na integratie van de stralen

```

70 IMAX=1

Start stralen in de startpunten aan de kust.

DO 80 J=1,MKUST

zoek de eerste straal waarvan STRAAL(I)=.FALSE.

I=0

75 I=I+1

IF(I.GT.NMAX)GOTO 120

IF(STRAAL(I))GOTO 75

IF(I.GT.IMAX)IMAX=I

Start straal nr.I in kustpunt nr.J (procedure als bij starten in de vakken).

CALL START(XKUST(J),YKUST(J),T,X(I),Y(I),E(I),FP(I),THO(I))

CALL VAK(X(I),Y(I),I,STX,STY,MX,MY,NSTR,STRAAL(I))

80 CONTINUE

Bereken de golfparameters per vak uit de golfparameters van de stralen, die erin terecht zijn gekomen.

CALL VAKPAR(E,FP,THO,NSTR,EVAK,FPVAK,THOVAK,MX,MY)

zoek de vakken waarin geen stralen terecht zijn gekomen.

DO 95 JX=1,MX

DO 90 JY=1,MY

IF(NSTR(JX,JY,1).GT.0)GOTO 90

zoek de eerste straal waarvan STRAAL(I)=.FALSE.

I=0

85 I=I+1

IF(I.GT.NMAX)GOTO 120

IF(STRAAL(I))GOTO 85

IF(I.GT.IMAX)IMAX=I

Bereken de golfparameters van vak (JX,JY) door middelen van de golfparameters uit de aan grenzende vakken.

Start een nieuwe straal in vak (JX,JY) met als beginvoorwaarde de golfparameters van vak (JX,JY).

CALL VAKMID(JX,JY,STX,STY,MX,MY,NSTR,EVAK,FPVAK,THOVAK

+,X(I),Y(I),E(I),THO(I),STRAAL(I))

90 CONTINUE

95 CONTINUE

T=T+STT

Einde tijdstap; geef uitvoer.

```
CALL UIT(EVAK,FPVAK,THOVAK,T,TSTOP,MX,MY)
IF(T.GE.TSTOP)GOTO 150
```

```
Volgende tijdstap.
```

```
IF(IMAX.GT.N)N=IMAX
```

```
Iet de parameters van alle vakken = 0.
```

```
DO 110 JX=1,MX
DO 105 JY=1,MY
EVAK(JX,JY)=0
FPVAK(JX,JY)=0
THOVAK(JX,JY)=0
DO 100 J=1,10
NSTR(JX,JY,J)=0
```

```
100 CONTINUE
105 CONTINUE
110 CONTINUE
```

```
Loop alle stralen langs.
```

```
DO 115 I=1,N
IF(.NOT.STRAAL(I))GOTO 115
```

```
Bereken een nieuw punt van de straal.
```

```
CALL NEWPT(X(I),Y(I),E(I),THO(I),T,X(I),Y(I),E(I),FP(I),THO(I))
CALL VAK(X(I),Y(I),I,STX,STY,MX,MY,NSTR,STRAAL(I))
```

```
115 CONTINUE
```

```
Reken de vakken door
GOTO 70
```

```
120 WRITE(6,125)
```

```
Foutmelding: arrays met de parameters van de stralen zijn te
klein gedeclareerd.
```

```
125 FORMAT('O AANTAL STRALEN GROTER DAN VOORGESCHREVEN MAXIMUM'/
+' PROGRAMMA GESTOPT')
```

```
150 CONTINUE
END
```

SUBROUTINE NEWPT

berekening van een nieuw punt van een straal

Invoer: tijdstip T
 parameters van de straal op tijdstip T
 coördinaten X1, Y1
 energie van het golfveld E1
 gemiddelde golfrichting TH01

Uitvoer: parameters van de straal op tijdstip T+STT
 coördinaten X2, Y2
 energie van het golfveld E2
 gemiddelde golfrichting TH02

SUBROUTINE NEWPT(X1,Y1,E1,TH01,T,X2,Y2,E2,FP2,TH02)
 COMMON G,STT,EDLINF,GROF,GREX,CF0,EX0,EFINF,CF1,EX1,CF2,EX2,
 +CF3,CF4,CF5,EX6,SVAC,2
 ITER=0
 T1=T
 T2=T+STT

Windsnelheid,U1,en -richting,THW11,in punt (X1,Y1) op tijdstip T1
 U1 wordt naar beneden begrensd op 0.1 m/s
 CALL WIND(X1,Y1,T1,U1,THW11)
 IF(U1.LT..1)U1=.1
 EDL1=E1*G**2/U1**4
 TH04V=TH01

Groepsnelheid,VGR,berekend met de dimensieloze relaties
 IF(EDL1.LE.EDLINF)VGR1=U1*CF1*EDL1**(-1/EX0)

Groepsnelheid,VGR,bij volgroeid spectrum
 IF(EDL1.GT.EDLINF)VGR1=CF3*E1**-.25
 DTF=STT*VGR1

Bereken beginschatting (X2,Y2)
 X2=X1+DTF*CCS(TH04V)
 Y2=Y1+DTF*SIN(TH04V)

150 Terugkeeradres voor iteratie
 160 IF(ITER.GT.1)GOTO 170
 CALL WIND(X2,Y2,T2,U2,THW2)
 IF(U2.LT..1)U2=.1

RELEASE 1.0

NEWPT

DATE = 93083

11/16/45

0 bereken de gemiddelde windsnelheid en richtingsvectorieel
 0 gemiddeld over de tijdstap, STT, en de afgelegde afstand, OTF,
 0 gedurende de tijdstap.

CALL AVVECC(U1,U2,THW11,THW12,UAV,THW1AV)

OTFOL=OTF*G/UAV**2

EDL1=E1*G**2/UAV**4

IF(EDL1.LE.5)LINE=VGR1=UAV*CF1*EDL1**(-1/EX0)

IF(EDL1.GT.5)LINE=VGR1=CF3*E1**0.25

E1=EDL1*VGR1/UAV

0 bereken de ontwikkeling van het golfveld.

CALL GRCKO(CF1,TH01,UAV,THW1AV,OTF,OTFOL,EF2,TH02)

IF(CF2.GT.EF1)EF1=CF2

0 Dimensieelore relaties

EDL2=CF1*EF2**EX1

VGR2=UAV*EF2/EDL2

E2=EDL2*UAV**4/G**2

GO TO 167

0 Volgroeid spectrum

165 EENDL2=EF2*UAV**5/G**2

E2=(EENDL2/CF2)**0

VGR2=EF2*EDL2/E2

0 bereken de gemiddelde groepsnelheid, vectorieel gemiddeld over
 0 STT en OTF.

167 CALL AVVECC(VGR1,VGR2,TH01,TH02,VGRAV,TH0AV)

OTF=STT*VGRAV

0 bereken een verbeterde schatting (X2,Y2).

X2=X1+OTF*COS(TH0AV)

Y2=Y1+OTF*SIN(TH0AV)

ITER=ITER+1

GO TO 160

170 EF2=CF4/VGR2

RETURN

END


```
*****
SUBROUTINE AVVEC
  Vectorieel middelen, bereik gemiddelde hoek: 0 <= THAV < 2*PI

  Invoer: vector 1: lengte    X1
           richting    TH1
           vector 2: lengte    X2
           richting    TH2

  Uitvoer: gemiddelde vector:
           lengte    XAV
           richting    THAV

SUBROUTINE AVVEC(X1,X2,TH1,TH2,XAV,THAV)
  PI=3.1415927
  P=(X1*COS(TH1)+X2*COS(TH2))/2
  Q=(X1*SIN(TH1)+X2*SIN(TH2))/2
  IF(ABS(P).GT.1E-20)GOTO 200
  IF(1.GE.0)THAV=PI/2
  IF(1.LT.0)THAV=1.5*PI
  GOTO 310
200 IF(P.GT.0)THAV=ATAN(Q/P)
   IF(P.LT.0)THAV=ATAN(Q/P)+PI
   IF(THAV.LT.0)THAV=THAV+2*PI
310 XAV=SQRT(P*P+Q*Q)
  RETURN
END
```

SUBROUTINE GPCKO

Bereken de ontwikkeling van het golfveld.

invoer: golfparameters op tijdstip T
 dimensieloze energiestrux EF1
 gemiddelde golfrichting TH01
 gemiddelde windsnelheid UAV
 gemiddelde windrichting THWIAV
 afgeleide afstand DTF
 dimensieloze afgeleide afstand DTFOL

uitvoer: golfparameters op tijdstip T+STT
 dimensieloze energiestrux EF2
 gemiddelde golfrichting TH02

SUBROUTINE GPCKO(EF1,TH01,UAV,THWIAV,DTF,DTFOL,EF2,TH02)
 COMMON /3,STT,FOLIVE,GRCE,GRGX,CF0,EX0,EFINF,CF1,EX1,CF2,EX2,
 +CF3,CF4,CF5,EX6,SWAD,Q
 ALPHA=TH01-THWIAV
 EFCEFI=CF1.EFINF*CCS(ALPHA))GOTO 310

Legenda: bereken de komponent van EF evenwijdig aan THWIAV: P
 en loodrecht op THWIAV: Q

P1=EF1*CCS(ALPHA)
 Q1=EF1*SIN(ALPHA)
 FOL1=(ATANH((P1/EFINF)**(.5/EX1))/GRCE)***(1/GRGX)
 FOL2=FOL1+DTFOL
 P2=EFINF*(TANH(GRCE*FOL2**GRGX))**((2*EX1)
 Q2=Q1-(P2-P1)*Q1/(EFINF-P1)
 GOTO 330

Dealing: bereken de afname van EF: DTEF

310 VGRFP=DTF/(STT*Q)
 SWDT=DTFOL/(SWAD*(VGRFP/UAV)**3)
 IF(SWDT.GT.40)SWDT=40.
 IF(CCS(ALPHA).GE.0)DTEF=(EF1-EFINF*CCS(ALPHA))*(EXP(-SWDT))-1)
 IF(CCS(ALPHA).LT.0)DTEF=EF1*(EXP(-SWDT))-1)
 IF(EFINF*CCS(ALPHA).LT.EFINF)GOTO 320

Alleen afname definies

EF2=EF1+DTEF
 TH02=TH01
 GOTO 340

0 Afname daling en tevens ontwikkeling van zeevang

320 P1=(EF1+.5*DT*EF)*COS(ALPHA)

Q1=(EF1+.5*DT*EF)*SIN(ALPHA)

IF(P1.GT.0)GOTO 322

DTP=EFINF*(TANH(GRCF*DT*DL**GREX))**(2*EX1)

GOTO 324

322 DDL1=(ATANH((P1/EFINF)**(.5/EX1))/GRCF)**(1/GREX)

DDL2=DDL1+DT*DL

P1=EFINF*(TANH(GRCF*DDL2**GREX))**(2*EX1)

DTP=P2-P1

324 DT1=-DTP*Q1/(EFINF-P1)

P2=(EF1+DT*EF)*COS(ALPHA)+DT*P

Q2=(EF1+DT*EF)*SIN(ALPHA)+DT*Q

330 EF2=SQRT(P2*P2+Q2*Q2)

0 Bereken de hoek TH02 uit de componenten van EF2,P en Q,en de wind-
0 richting,THWIAV.

CALL ANG(P2,Q2,THWIAV,TH02)

0 EF2 wordt naar beneden begrensd op 1E-20,in verband met uit te
0 voeren delingen door EF2.

340 IF(EF2.LT.1E-20)EF2=1E-20

RETURN

END

FUNCTION ATANK

Inverse funktie van $\tanh(x)$: $\operatorname{arctanh}(x)$

FUNCTION ATANH(X)

```
IF (ABS(1-X).LT.1E-7) X=.9999999
```

$$ATAB = .5 * ALOG((1+X)/(1-X))$$

327024

444

```

C *****
C
C SUBROUTINE ANG
C
C Bereken de richting TH0 uit de componenten P en Q en de richting
C THWI; bereik TH0:  $0 \leq TH0 < 2\pi$ 
C
C Invoer: richting THWI
C          component evenwijdig aan THWI P
C          component loodrecht op THWI Q
C
C Uitvoer: richting TH0
C
C SUBROUTINE ANG(P,Q,THWI,TH0)
C PI=3.1415927
C IF(ABS(P).GT.1E-20)GOTO 400
C IF(Q.GE.0)TH0=THWI+PI/2
C IF(Q.LT.0)TH0=THWI-PI/2
C GOTO 410
400 IF(P.GT.0)TH0=THWI+ATAN(Q/P)
C IF(P.LT.0.AND.Q.GE.0)TH0=THWI-ATAN(ABS(Q/P))+PI
C IF(P.LT.0.AND.Q.LT.0)TH0=THWI+ATAN(ABS(Q/P))-PI
410 IF(TH0.LT.0)TH0=TH0+2*PI
C IF(TH0.GE.2*PI)TH0=TH0-2*PI
C RETURN
C END

```

SUBROUTINE START

Start een straal met energie = 0

Invoer: coördinaten startpunt X1,Y1
 tijdstip van starten T1

Uitvoerparameters van de straal op tijdstip T1+STT
 coördinaten X2,Y2
 energie van het golfveld E2
 piekfrequentie FP2
 gemiddelde golfrichting TH02

```

SUBROUTINE START(X1,Y1,T1,X2,Y2,E2,FP2,TH02)
COMMON G,STT,EDLINF,GRCF,GREX,CF0,FX0,EFINF,CF1,EX1,CF2,EX2,
+CF3,CF4,CF5,EX3,SWAG,1
T2=T1+STT
CALL WIND(X1,Y1,T1,U1,THW11)
IF(U1.LT..1)U1=.1
UAV=U1
THWIAV=THW11
ITER=0
600 STTOL=STT*G/UAV
DTFOL=CF5*STTOL**EX3
TH02=THWIAV
DTF=DTFOL*UAV**2/G
X2=X1+DTF*COS(TH02)
Y2=Y1+DTF*SIN(TH02)
IF(ITER.GE.1)GOTO 610
CALL WIND(X2,Y2,T2,U2,THW12)
IF(U2.LT..1)U2=.1
CALL AVVECC(U1,U2,THW11,THW12,UAV,THWIAV)
ITER=ITER+1
GOTO 600
610 EDL2=EDLINF*(TANH(GRCF*DTFOL**GREX))**2
E2=EDL2*UAV**4/G**2
FP2=(EDL2/CF0)**(1/EX0)*G/UAV
RETURN
END

```

```

C
C*****
C
C      WINDVELD; DIAGONAAL FRONT
C
C      Invoer: coördinaten  X,Y
C              tijd        T
C
C      Uitvoer: windsnelheid U
C              windrichting THWI
C
C**      SUBROUTINE WIND(X,Y,T,U,THWI)
C      DEG=57.29577951
C      U=20
C      IF(X.GT.Y)THWI=90/DEG
C      IF(X.LT.Y)THWI=180/DEG
C      RETURN
C**      END
C
C*****
C
C      WINDVELD;STANDAARD 45 GRADEN
C
C**      SUBROUTINE WIND(X,Y,T,U,THWI)
C      DEG=57.29577951
C      U=20
C      THWI=45/DEG
C      RETURN
C**      END
C
C*****
C
C      WINDVELD;ORKAAN
C
C      SUBROUTINE WIND(X,Y,T,U,THWI)
C      PI=3.1415927
C      DEG=180/PI
C      UR=41.5
C      RS=40000
C      VUH=15
C      THUR=33.7/DEG
C      ZETA=0
C      CS=X-600000
C      SN=Y-700000
C      R=SQRT(CS**2+SN**2)
C      IF(ABS(CS).GT.1E-20)GOTO 710
C      IF(SN.GE.0)THRD=PI/2
C      IF(SN.LT.0)THRD=1.5*PI

```

```
      GOTO 730
710  IF(CS.GT.0)THRD=ATAN(SN/CS)
      IF(CS.LT.0)THRD=ATAN(SN/CS)+PI
720  GAMMA=.5*(1-COS(THRD-THUR))*VUM*(RS*R/(RS**2+R**2))
      RP=R/PS
      IF(RR.LE.1)U=UR*RR**7*EXP(7*(1-RR))-GAMMA
      IF(RR.GT.1)U=UR*EXP(.156*(1-RR))-GAMMA
      IF(U.GE.0)GOTO 730
      U=-U
      BETA=-PI
730  IF(RR.LE.1)BETA=BETA+RP*10/DEG
      IF(RR.GT.1.AND.RR.LE.1.2)BETA=BETA+(10+75*(RR-1))/DEG
      IF(RR.GT.1.2)BETA=BETA+25/DEG
      THWI=THRD+PI/2+BETA
      IF(THWI.LT.0)THWI=THWI+2*PI
      IF(THWI.GT.2*PI)THWI=THWI-2*PI
      RETURN
      END
```

SUBROUTINE VAK

Ja ne of de straal binnen het model valt. Zo ja in welk vak.

Invoer: coördinaten van de straal X,Y
 straalnummer I
 stapgrootte in X-richting STX
 " " Y-richting STY
 aantal vakken in X-richting MX
 " " Y-richting MY

Uitvoer: array die straalnummers koppelt aan vaknummers NSTR
 Logische parameter STRAAL

SUBROUTINE VAK(X,Y,I,STX,STY,MX,MY,NSTR,STRAAL)

LOGICAL STRAAL

DIMENSION NSTR(20,20,10)

STRAAL=.FALSE.

XMIN=0

XMAX=MX*STX

YMIN=0

YMAX=MY*STY

Als het punt (X,Y) van de straal binnen het model valt STRAAL=TRUE
 IF(X.GT.XMIN.AND.X.LT.XMAX.AND.Y.GE.YMIN.AND.Y.LT.YMAX)

STRAAL=.TRUE.

IF(.NOT.STRAAL)GOTO 910

Ga na in welk vak (X,Y) valt. Koppel vaknr.(JX,JY) aan straalnr.I

JX=I/IX(X/STX)+1

JY=I/IX(Y/STY)+1

J=0

900 J=J+1

IF(NSTR(JX,JY,J).NE.0.AND.J.LT.10)GOTO 900

IF(NSTR(JX,JY,J).EQ.0)NSTR(JX,JY,J)=I

910 RETURN

END

SUBROUTINE VAKPAR

Bereken de golfparameters van de vakken iut de golfparameters van de stralen.

Invoer: golfparameters van de stralen (arrays)

energie van het golfveld E
 piekfrequentie FP
 gemiddelde golfrichting TH0
 array die straalnrs. koppelt aan vaknrs.NSTR
 aantal vakken in X-richting MX
 " " " Y-richting MY

Uitvoer: golfparameters van de vakken (arrays)

energie van het golfveld EVAK
 piekfrequentie FPVAK
 gemiddelde golfrichting TH0VAK

SUBROUTINE VAKPAR(E,FP,TH0,NSTR,EVAK,FPVAK,TH0VAK,MX,MY)
 DIMENSION E(2000),FP(2000),TH0(2000),NSTR(20,20,10),
 +EVAK(20,20),FPVAK(20,20),TH0VAK(20,20)

PI=3.1415927

DO 1040 JX=1,MX

DO 1030 JY=1,MY

ISTR=0

CSVAK=0

SNVAK=0

Bereken de golfparameters van de stralen in het vak

DO 1000 J=1,10

IF(NSTR(JX,JY,J).EQ.0)GOTO 1000

ISTR=ISTR+1

EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)+E(NSTR(JX,JY,J))

FPVAK(JX,JY)=FPVAK(JX,JY)+FP(NSTR(JX,JY,J))

CSVAK=CSVAK+E(NSTR(JX,JY,J))*COS(TH0(NSTR(JX,JY,J)))

SNVAK=SNVAK+E(NSTR(JX,JY,J))*SIN(TH0(NSTR(JX,JY,J)))

De waarde TH0RES wordt gebruikt als er 1 straal in het vak terecht is gekomen.

TH0RES=TH0(NSTR(JX,JY,J))

1000 CONTINUE

IF(ISTR.EQ.0)GOTO 1030

IF(ISTR.GT.1)GOTO 1010

```
C      1 straal in vak (JX,JY)
      THOVAK(JX,JY)=THORES
1006 GOTO 1020
C
C      Meer dan 1 straal in vak (JX,JY)
1010 EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)/ISTR
      FPVAK(JX,JY)=FPVAK(JX,JY)/ISTR
C
C      Bereken THOVAK uit CSVAK en SNVAK
C
      IF(ABS(CSVAK).GT.1E-20)GOTO 1020
      IF(SNVAK.GE.0)THOVAK(JX,JY)=PI/2
      IF(SNVAK.LT.0)THOVAK(JX,JY)=1.5*PI
      GOTO 1030
1020 IF(CSVAK.GT.0)THOVAK(JX,JY)=ATAN(SNVAK/CSVAK)
      IF(CSVAK.LT.0)THOVAK(JX,JY)=ATAN(SNVAK/CSVAK)+PI
      IF(THOVAK(JX,JY).LT.0)THOVAK(JX,JY)=THOVAK(JX,JY)+2*PI
1030 CONTINUE
1040 CONTINUE
      RETURN
      END
```

SUBROUTINE VAKMID

Middeel de golfparameters uit aangrenzende vakken.
Start een nieuwe straal.

Invoceren: vaknummer JX,JY
 stapgrootte in X-richting STX
 " " Y-richting STY
 aantal vakken in X-richting MX
 " " Y-richting MY
 array met straal- en vaknrs. NSTR
 golfparameters van de vakken (arrays)
 energie van het golfveld EVAK
 piekfrequentie FPVAK
 gemiddelde golfrichting THOVAK

Uitvoeren: golfparameters van vak (JX,JY)
 opgeslagen in de arrays
 parameters van de gestarte straal
 coördinaten X,Y
 energie van het golfveld E
 gemiddelde golfrichting THO
 logische parameter STRAAL

SUBROUTINE VAKMID(JX,JY,STX,STY,MX,MY,NSTR,EVAK,FPVAK,THOVAK,
 +X,Y,E,THO,STRAAL)
 LOGICAL STRAAL
 DIMENSION NSTR(20,20,10),EVAK(20,20),FPVAK(20,20),THOVAK(20,20)
 PI=3.1415927
 IVAK=0
 CSVAK=0
 SNVAK=0
 IF(JX-1.LT.1)GOTO 1100
 IF(NSTR(JX-1,JY,1).EQ.0)GOTO 1100

 Gebruik de golfparameters uit vak (JX-1,JY)

 IVAK=IVAK+1
 EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)+EVAK(JX-1,JY)
 FPVAK(JX,JY)=FPVAK(JX,JY)+FPVAK(JX-1,JY)
 CSVAK=CSVAK+EVAK(JX-1,JY)*COS(THOVAK(JX-1,JY))
 SNVAK=SNVAK+EVAK(JX-1,JY)*SIN(THOVAK(JX-1,JY))
 1100 IF(JX+1.GT.MX)GOTO 1110
 IF(NSTR(JX+1,JY,1).EQ.0)GOTO 1110

```

C      Gebruik de golfparameters uit vak (JY+1,JY)
C
      EVAK=EVAK+1
      EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)+EVAK(JX+1,JY)
      FPVAK(JY,JY)=FPVAK(JX,JY)+FPVAK(JX+1,JY)
      CSVAK=CSVAK+EVAK(JX+1,JY)*COS(THOVAK(JX+1,JY))
      SNVAK=SNVAK+EVAK(JX+1,JY)*SIN(THOVAK(JX+1,JY))
1110  IF(JY-1.LT.1)GOTO 1120
      IF(CASTR(JX,JY-1,1).EQ.0)GOTO 1120
C
C      Gebruik de golfparameters uit vak (JX,JY-1)
C
      EVAK=EVAK+1
      EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)+EVAK(JX,JY-1)
      FPVAK(JX,JY)=FPVAK(JX,JY)+FPVAK(JX,JY-1)
      CSVAK=CSVAK+EVAK(JX,JY-1)*COS(THOVAK(JX,JY-1))
      SNVAK=SNVAK+EVAK(JX,JY-1)*SIN(THOVAK(JX,JY-1))
1120  IF(JY+1.GT.NY)GOTO 1130
      IF(CASTR(JX,JY+1,1).EQ.0)GOTO 1130
C
C      Gebruik de golfparameters uit vak (JX,JY+1)
C
      EVAK=EVAK+1
      EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)+EVAK(JX,JY+1)
      FPVAK(JX,JY)=FPVAK(JX,JY)+FPVAK(JX,JY+1)
      CSVAK=CSVAK+EVAK(JX,JY+1)*COS(THOVAK(JX,JY+1))
      SNVAK=SNVAK+EVAK(JX,JY+1)*SIN(THOVAK(JX,JY+1))
C
      IVAK+0:geen stralen in aangrenzende vakken;
           golfparameters vak (JX,JY) = 0
      IVAK=1:stralen in 1 aangrenzend vak;
           EVAK(JX,JY)=aangrenzend vak/2
           FPVAK(JX,JY) is niet gedefinieerd(stel gelijk 0)
      IVAK>1:stralen in meer dan 1 aangrenzend vak;
           golfparameters vak (JX,JY)=som pars aangrenzende vakken/IVAK
C
1130  IF(IVAK.EQ.0)GOTO 1160
      IF(IVAK.GE.2)GOTO 1133
      EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)/2
      FPVAK(JX,JY)=0
      GOTO 1135
1133  EVAK(JX,JY)=EVAK(JX,JY)/IVAK
      FPVAK(JX,JY)=FPVAK(JX,JY)/IVAK
C
C      Bereken THOVAK uit CSVAK en SNVAK
C
1135  IF(ABS(CSVAK).GT.1E-20)GOTO 1140
      IF(SNVAK.GE.0)THOVAK(JX,JY)=PI/2

```

```
IF(CSNVAK.LT.0)THCVAK(JX,JY)=1.5*PI
```

```
GO TO 1150
```

```
1140 IF(CCSVAK.GT.0)THCVAK(JX,JY)=ATAN(CSNVAK/CSVAK)
```

```
IF(CCSVAK.LT.0)THCVAK(JX,JY)=ATAN(CSNVAK/CSVAK)+PI
```

```
IF(THCVAK(JX,JY).LT.0)THCVAK(JX,JY)=THCVAK(JX,JY)+2*PI
```

```
C
```

```
C Start een nieuwe straal in vak (JX,JY) als IVAK > 0
```

```
1150 X=(JX-.5)*STX
```

```
Y=(JY-.5)*STY
```

```
E=IVAK(JX,JY)
```

```
THD=THCVAK(JX,JY)
```

```
STRACL=.TRUE.
```

```
1160 RETURN
```

```
END
```

```

C
C*****
C
C      UITVOER
C
C      EVAK/EPV,FPVAK/PPP en THOVAK in blokken MX*MY
C
C      SUBROUTINE UIT(EVAK,FPVAK,THOVAK,T,TSTOP,MX,MY)
C      DIMENSION EVAK(20,20),FPVAK(20,20),THOVAK(20,20),HSIG(20),
C      +THODEG(20)
C      DEG=87.2957795
C      EPM=6.0552
C      FPPM=.06074
C      THR=T/3500
C      THRSTP=TSTOP/3500
C      IF(.NOT.(THR.GT.8.5.AND.THR.LT.9.5.OR.THR.GT.17.5.AND.THR.LT.
C      +19.5.OR.THR.GT.24.5.AND.THR.LT.27.5.OR.THR.GT.35.5.AND.THR
C      +.LT.36.5.OR.THR.GT.44.5.AND.THR.LT.45.5.OR.THR.GT.53.5.AND.
C      -THE.LT.54.5.OR.THR.GT.THRSTP-4))GOTO 1290
C      WRITE(6,1200)THR
C 1200  FORMAT(///"TIJD IN UREN:",F3.1)
C      WRITE(6,1210)
C 1210  FORMAT("HSIG EN SIGNIFICANTE GOLFHOOOGTE"///" JY"/)
C      DO 1220 J=1,MY
C      JY=MY+1-J
C      DO 1212 I=1,MX
C      HSIG(I)=4*SQRT(EVAK(I,JY))
C 1212  CONTINUE
C      WRITE(6,1215)JY,(HSIG(I),I=1,MX)
C 1215  FORMAT(I4,20F5.1)
C 1220  CONTINUE
C      WRITE(6,1270)(I,I=1,MX)
C      WRITE(6,1230)
C 1230  FORMAT("10*FP EN PIEKFREQUENTIE"///" JY"/)
C      DO 1240 J=1,MY
C      JY=MY+1-J
C      WRITE(6,1235)JY,(FPVAK(I,JY),I=1,MX)
C 1235  FORMAT(I4,10F20F5.2)
C 1240  CONTINUE
C      WRITE(6,1270)(I,I=1,MX)
C      WRITE(6,1250)
C 1250  FORMAT("THO COORDENI VOORTPLANTINGSRICHTING VAN HET GOLFEELD
C      +///" JY"/)
C      DO 1260 J=1,MY
C      JY=MY+1-J
C      DO 1262 I=1,MX
C      THODEG(I)=THOVAK(I,JY)*DEG
C 1262  CONTINUE

```

RELEASE 2.0

UIT

DATE = 83083

11/16/45

```
WRITE(6,1255)JY,(THODEG(I),I=1,NX)
1250 FORMAT(I4,20F5.0)
1260 CONTINUE
WRITE(6,1270)(I,I=1,NX)
1270 FORMAT(/I3,19F5,' JX')
1280 RETURN
END
```