

Beknopt verslag van een bezoek aan  
een conferentie over spectra van zeegolven  
gehouden 1-4 mei 1961 te Easton, Md., U.S.A.

door R. Dorrestein

Deze conferentie werd gehouden op initiatief van het Hydrographic Office van de U.S. Navy, welke instantie, naar ik vernam, tot dit doel een bedrag van \$15000 beschikbaar had gesteld.

In de aankondiging (april 1960) werd het volgende gesteld:

"During the past few years increased attention has been given to statistical methods of describing wind generated gravity waves in the oceans. However, different methods, different data and different geographical environments lead to somewhat different conclusions concerning the characteristics of the spectrum."

"To resolve, or at least to understand, some of these differences is of great theoretical and practical importance. The U.S. Navy Hydrographic Office has proposed that the Nat. Academy of Sciences - Nat. Research Council organize a conference on ocean wave spectra. Agreeing that such a conference is needed so that leading scientists can exchange their views on this subject, the Division of Earth Sciences of the Academy Research Council will organize a conference on ocean wave spectra."

-----  
"Participation will be by invitation only and limited to scientists actively engaged in ocean-wave research."

De voorbereiding en organisatie van de conferentie waren in handen van de heer R.C. Vetter.

Ondanks het streven het aantal deelnemers beperkt te houden, bedroeg dit toch nog circa 60. Hiervan waren 12 buitenlanders: uit Gr. Brittannië 5, Canada 1, Nieuw-Zeeland 1, Duitsland 2, Frankrijk 1, Nederland 1, Japan 1. De betrekkelijk grote Britse delegatie was in overeenstemming met de vooraanstaande plaats die het Britse Nat.

Institute of Oceanography (N.I.O.) op dit gebied inneemt; de delegatie bestond uit de directeur van dit instituut, Dr. Deacon, en de 4 stafleden Longuet-Higgins, Cartwright, Darbyshire en Tucker.

De reis- en verblijfkosten der deelnemers werden geheel of grotendeels door de "sponsors" (Hydrogr. Office) betaald. De conferentie vond plaats in een hotel te Easton, Maryland, op ongeveer 100 km van Washington D.C. Dit is een rustige plaats met weinig toeristische of andere attracties, vermoedelijk daarom met opzet door de organisatoren uitgekozen. De organisatie was goed, maar de ontvangen aanwijzingen voor de vliegreis over de Atlantische Oceaen (met Military Air Transportation Service) bleken foutief te zijn, zodat op het laatste moment nog moest worden getelefoneerd door bemiddeling van de Amerikaanse Marine-attaché in Den Haag.

De conferentie was ingedeeld in 6 voor- en namiddagzittingen (3 dagen). 's Avonds werden meer informele bijeenkomsten gehouden waarop allerlei toepassingen en rand-onderwerpen ter sprake kwamen. Op de voormiddag van de vierde dag werd de conferentie besloten met een "panel"-discussie onder leiding van Prof. Munk. Het geheel was bijzonder vermoeiend.

De eerste zitting werd geopend met een woord van Admiraal Stephan, hoofd van het Hydrographic Office. Daarna gaf Dr. Deacon (N.I.O.) een uitstekend algemeen overzicht van de huidige stand van zaken. Zijn twee hoofd-aanmaningen voor toekomstig onderzoek waren: (1) nauwere samenwerking tussen theoretici en experimentatoren; (2) meer systematische benadering der problemen.

Verder was de conferentie ingedeeld in 4 hoofd-onderwerpen:

- A. Het een-dimensionale spectrum = verdeling van de golfenergie over de golffrequenties.
- B. Het twee-dimensionale spectrum = verdeling van de golfenergie over de golffrequenties en golfrichtingen.
- C. Niet-lineaire aspecten.
- D. Instrumentatie.

Aan A waren twee zittingen gewijd, de tweede waarvan ik als "chairman" moest leiden. Voor elk der 4 zittingen gewijd aan A, B en C waren 2 of 3 sprekers uitgenodigd een voordracht te houden.

De tekst van elk van deze voordrachten was reeds enkele maanden tevoren toegestuurd aan enkele mensen die werden verzocht hierop schriftelijk discussie te leveren. Deze schriftelijke discussies waren, ook nog vóór de conferentie, aan de auteurs gezonden die daarop weer konden antwoorden. Op de conferentie waren de tekst van de voordrachten en de schriftelijke discussies en eventuele antwoorden verveelvoudigd en ter beschikking der deelnemers. De stapel die elke deelnemer kon verzamelen had een totale dikte van 8 cm. Een mooi systeem, maar er was natuurlijk geen tijd om dit alles vóór de zittingen te bestuderen.

A. Het een-dimensionale spectrum (2e en 3e zitting)

Op de 2e zitting spraken Pierson (mede namens Neumann, New York University) en Darbyshire (N.I.O.). Pierson en Neumann gaven een overzicht van de literatuur der laatste jaren, welk overzicht uiteraard nog wel subjectief gekleurd was, en enkele suggesties voor verder onderzoek. Darbyshire beperkte zich tot een samenvatting van zijn eigen werk der laatste jaren.

Op de 3e zitting spraken Bretschneider (Beach Erosion Board) en Walden (Seewetteramt, Hamburg). Bretschneider rapporteerde over zijn statistische analyses van een groot aantal golfregistraties (meest drukregistraties van de bodem) en over zijn hierop gebaseerde theoretische uitdrukkingen voor de gecombineerde verdelingsfuncties van individuele golfhogten  $H$  (dal tot top) en van tijdsintervallen  $T$  tussen opeenvolgende golven. Deze verdelingsfuncties zijn echter geen spectra in de gebruikelijke mathematische zin en hebben wel betekenis voor de civiel-ingenieur maar hebben veel minder betekenis in verband met het fysisch gedrag van golven. Bovendien waren de door hem toegepaste schematisaties (zoals de onderstelling van een lineaire regressie tussen  $H$  en  $T^2$ ) hoogst aanvechtbaar, zoals Br. zelf toegaf. Derhalve was zijn voordracht van minder fundamenteel belang. Er kwam echter wel heel wat discussie, waaraan Cartwright, Longuet-Higgins, Darbyshire, Pierson, Neumann, Putz en anderen deelnamen, over de vraag naar het verband dat bestaat tussen het "echte" frequentiespectrum en de verdelingsfuncties die Bretschneider (en

anderen voor hem) gebruikte(n). Er zijn wel relaties die bij benadering geldig zijn; geen exacte relaties.

Walden besprak in zijn voordracht de resultaten van een gering aantal golfmetingen verricht in de Duitse Bocht (Mellum Plate) en hij vergeleek de (op betrekkelijk moeizame wijze verkregen) spectra met de door verschillende auteurs voorgestelde spectrumformules. Maar deze vergelijking had, zoals hij zelf vaststelde, slechts een beperkte zin omdat in het betrokken waddegebied veelal een combinatie van "deining" uit de Noordzee en lokaal opgewekte golven optreedt, omdat de fetches veelal klein en niet goed gedefinieerd zijn en omdat het water plaatselijk erg ondiep is. Zijn voordracht leverde dan ook geen conclusies van kwantitatief karakter op.

Het bleek dus dat eigenlijk alleen de eerste voordracht, van Pierson en Neumann, op zichzelf reeds een discussie zijnde, een goede basis voor discussie vormde. Enkele conclusies betreffende het een-dimensionale spectrum zijn de volgende.

1. Een punt waarover alle auteurs het eens zijn, is dat, uitgaande van een golfloze toestand en onder invloed van een wind van constante snelheid en richting, de golfhoogte en de gemiddelde golfperiode toenemen met de duur (resp. de fetch = afstand vanaf de lijzijde van het windveld), totdat gaandeweg een toestand wordt bereikt waarbij de golfeigenschappen (statistisch gezien) niet meer veranderen en alleen nog afhangen van de windsnelheid: vol-ontwikkelde zeegang. Verder nemen alle auteurs een spectrum van vol-ontwikkelde zeegang aan dat één maximum heeft, dat bij de hoge frequenties zich gedraagt als (frequentie)<sup>-n</sup>, met n tussen 4 en 8, terwijl bij de lage frequenties de helling veel groter is en het spectrum beneden een zekere frequentie vrijwel nul is. Overigens heeft elke auteur die zichzelf respecteert echter eigen opvattingen over de kwantitatieve vorm van de relaties en van de spectra.

2. Terwijl Neumann en Pierson in 1953 hun formules presenteerden op een apodictische wijze alsof het hier de definitieve waarheid gold, hoewel het voor elke kritische lezer duidelijk moest zijn dat de (visuele) waarnemingen waarop hun theorie berustte zeer gebrekkig waren

en de wijze van afleiding van deze theorie sterk aanvechtbaar was, waren Neumann en Pierson thans zeer liberaal van opvatting. Ze toonden zich nu erg tevreden dat de verschillende recente waarnemingsresultaten, althans globaalweg, hun theorie bevestigden - maar dat beweren andere auteurs ook van hun eigen theorieën en dat is in vele gevallen nog waar ook.

3. De duidelijkste tegenstelling bestaat tussen de opvattingen van Darbyshire enerzijds en die van de meeste andere onderzoekers anderzijds. Darbyshire bezit echter een zeer belangrijke troefkaart: hij beschikte over verweg de meeste golfregistraties die in de volle oceaan opgenomen zijn, nl. met de N.I.O. ship borne wave recorder. De waarde hiervan wordt echter weer iets verminderd omdat zeer recentelijk is gebleken dat dit instrument een grotere correctie behoeft in de hogere frequenties dan steeds was aangenomen.

De formules van Darbyshire zijn zuiver empirisch, zonder dat hieraan enige fysische overweging te pas komt; alle spreidingen worden op elegante wijze weg-gemiddeld. Het vermoeden bestaat algemeen dat zijn wijze van deductie verbeterd zou kunnen worden. D. geldt evenwel in Engeland als de autoriteit (behalve misschien onder zijn directe collega's).

4. De mogelijkheid, dat de eigenschappen van golven in een gelijkvormig windveld aan de westzijde en aan de oostzijde van de Atlantische Oceaan zouden verschillen (door de permanente overmaat aan westelijke winden) werd niet door iedereen verworpen.

5. Een duidelijk verschilpunt tussen Darbyshire en de anderen betreft de invloed van de fetch (en windduur). Volgens D. is de zee-gang vrijwel vol ontwikkeld, ook bij harde wind, over een fetch van ca 100 mijl (en na een corresponderende korte duur), terwijl volgens de anderen hiertoe een veel grotere fetch en duur nodig zijn.

In de U.S.A. is het plan opgevat dit punt rechtstreeks te toetsen. In samenwerking van het Hydrogr. Office en andere instanties zal men, tijdens een periode van min of meer constante landwind (NW wind), met verschillende schepen golven gaan meten op verschillende

afstanden, tot enkele honderden mijlen, buiten de oostkust van de U.S.A.

6. Een ander discussiepunt is in welk stadium van golfgroei de langere perioden opkomen. Volgens Neumann en Pierson komt een bepaalde periode pas dan op, nadat het spectrum voor alle kortere perioden al vrijwel vol-ontwikkeld is. Volgens anderen, met name de Fransen (deining-onderzoek Marokko), treden de lange perioden al in een veel eerder stadium op.

#### B. Het twee-dimensionale spectrum

De beperkte kamlengte in zeegang (loodrecht op de wind gerekend) en het uitwaaiëren van deining uit stormvelden bewijzen dat de golfenergie in zeegang verdeeld moet zijn over een tamelijk brede sector van richtingen aan weerszijden van de windrichting. De golfenergie kan dus worden beschouwd als te zijn verdeeld over twee coördinaten; hiervoor kan men nemen frequentie en richting, of ook de beide componenten van het golfgetal  $\vec{k}$  (dat feitelijk geen getal is maar een vector).

Het Amerikaanse "Stereo Wave Observation Project" (SWOP), waarvan de resultaten in 1957 werden gepubliceerd, was de eerste groot-scheepse poging een twee-dimensionaal spectrum rechtstreeks uit een waarneming te bepalen. Het betrof evenwel slechts één geval en het was niet geheel zeker of er niet nog een oude deining onder de zeegang verborgen zat.

Op de 4e zitting spraken Longuet-Higgins (mede namens Cartwright en Smith, N.I.O.) en Barber (Nieuw-Zeeland). De laatste gaf geen nieuwe waarnemingsresultaten, maar een aanschouwelijk résumé van wat men bereiken kan, of niet bereiken kan, door de gegevens van een stel in een rechte lijn geplaatste golfschrijvers (array of detectors) op verstandige wijze te combineren. Dit beginsel is, zover bekend, in volle zee nog nooit toegepast. Onze drijvende K.N.M.I. golfhoogtemeter zou zich hiertoe goed lenen. Men behoeft slechts een vier of vijf vlotjes met versnellingsmeters op verschillende afstanden aan één lijn van een lichtschip te vieren op de stroom (of van een ander schip), de signalen op magneet- of ponsband op te nemen en te bewer-

ken met een rekenmachine. Op deze wijze zou ook Nederland een klein steentje kunnen bijdragen op het gebied van speurwerk aan zeegolven.

Longuet-Higgins besprak enkele resultaten verkregen met de speciale N.I.O. meetboei. Dit is een ronde, vrij platte boei, diam. 2 meter, die vrij op het zeeoppervlak kon drijven en daarbij op de wind werd georiënteerd met behulp van een drijfanker. Inwendig werden geregistreerd: de 2 maal geïntegreerde output van een versnellingsmeter in cardanische ophanging, de hellingshoeken in twee richtingen (met gyroscopen) en de atmosferische drukvariaties (met een microbarograaf bovenop de boei). Voor perioden boven 1,5 sec wordt aangenomen dat de hellingshoeken overeenkomen met die van het door de boei ongestoorde wateroppervlak. Uit de spectra en kruisspectra van de eerste 3 signalen kan men dan vinden, voor elke frequentie, de eerste 5 coëfficiënten van de Fourierontwikkeling van het richtingspectrum der golven; niet meer, en niet minder. Dus de eerste 5 termen van de reeks

$$F(w, \phi) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos \phi + b_1 \sin \phi + a_2 \cos 2\phi + b_2 \sin 2\phi + \dots$$

waarin  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  nog functies van de frequentie  $w$  zijn. Dit betekent dat men van het richtingspectrum "uitgesmeerde" vormen kan vinden, waarbij men nog verschillende "uitsmeerfuncties" kan kiezen, die echter noodzakelijk vrij breed zijn (half-waardebreedte tenminste ca  $2 \times 60^\circ$ , als men ook de zijlobben wil onderdrukken). De resultaten van 5 proeven, met significante golfhoogten van 1,6 tot 3 meter, één geval met typische windgolven van 3 meter bij 23 knopen wind, werden besproken en getoetst aan de resultaten van SWOP en aan de theorieën over golvenopwekking van Phillips en van Miles. Door de essentiële grote "onscherpte" waarmee het richtingspectrum bepaald kon worden bleven de conclusies nog enigszins vaag.

Deze methode om twee-dimensionale spectra te bepalen is dus belangrijk minder machtig dan de stereofotografische methode, maar is heel wat minder ingewikkeld en heeft ook nog het (overigens vrij geringe) voordeel dat ze onderscheid maakt tussen de energieën die lopen in precies tegengestelde richtingen.

De atmosferische drukvariaties bleken een factor 100 geringer te zijn dan de door Phillips aanvankelijk onderstelde turbulente

drukvariaties, en bleken grotendeels in fase te zijn met de golven. Het was dus praktisch onmogelijk de door de drukkrachten op het water geleverde arbeid te bepalen.

Op dezelfde zitting gaf Munk (Scripps Inst. of Oceanography) een kort, interessant verslag van de analyse van de bodemdrukregistraties op de 3 hoekpunten van een driehoek (met zijden van 300 m) buiten de kust van Californië. Hier ging het dus alleen om de lange perioden, van 10 tot 30 sec en hoger. Deiningen uit het zuidwesten afkomstig van stormvelden die bijna een halve aardomtrek verwijderd waren, konden worden gedetecteerd.

Conclusies betr. het twee-dimensionale spectrum:

1. Kennis van de eigenschappen van het twee-dimensionale spectrum van zeeegang is noodzakelijk voor het maken van goede deiningverwachtingen.
2. Gegevens over een twee-dimensionaal spectrum van zeegolven zijn nog slechts in enkele gevallen verkregen. De eigenschappen van dit spectrum zijn alleen maar in heel grove trekken bekend.
3. De stereofotografische methode kan de meeste informatie geven, maar is tevens in alle opzichten het bewerkelijkst.
4. Met betrekkelijk eenvoudige hulpmiddelen, b.v. een beperkt aantal in een rechte lijn geplaatste golfschrijvers, met opneem- en rekenapparatuur, zouden in de naaste toekomst belangrijke voorde- ringen op dit gebied kunnen worden gemaakt.

### C. Niet lineaire aspecten

Op de 5e zitting, die hieraan gewijd was, waren (uiteraard) vrijwel uitsluitend de theoretici aan het woord. Er waren 3 inleiders: Tick (New York Univ.), Phillips (Johns Hopkins Univ.) en Has- selmann (Institut für Schiffbau, Hamburg). Tot de discussies werd verder hoofdzakelijk bijgedragen door Pierson, Longuet-Higging en Eckart.

Niet-lineaire verschijnselen zijn die welke niet beschreven kunnen worden met de gelineariseerde bewegingsvergelijkingen; ze worden relatief verwaarloosbaar als de steilheid der golven gering is.

De drie inleiders behandelden in hoofdzaak toepassingen van de "storingstheorie" in een stochastisch golvenmodel. Hierbij wordt een



bepaalde, in de differentiaalvergelijkingen optredende grootheid, b.v. de snelheidspotentiaal aan het oppervlak, of de amplitude van een component in het golfgetal-spectrum, ontwikkeld in een reeks van opklimmende machten van een parameter die evenredig is met de golfsteilheid. Breekt men deze reeks af na de  $n^{\text{de}}$  macht, dan krijgt men de differentiaalvergelijkingen van de  $n^{\text{de}}$  orde. Wanneer hierin "kleine" termen worden vervangen door de bekend geachte uitdrukkingen van  $(n - 1)^{\text{de}}$  orde, kunnen deze differentiaalvergelijkingen successievelijk worden opgelost voor  $n = 2, 3, \text{ enz.}$  Voor  $n = 1$  heeft men de gelineariseerde vergelijkingen. Alle sprekers gingen uit van een Gaussisch stochastisch proces in de lineaire benadering en onderstelden diep water, "ideale" vloeistofeigenschappen (onsamendruikbaar, wrijvingsloos en geen oppervlaktetension) en constante druk aan het oppervlak.

Tick beperkte zich tot een onderzoek van termen van de 2e orde in het model met één horizontale dimensie (langkammige golven). Het lineaire spectrum wordt dan gecorrigeerd met een kleine bijdrage, die gevonden wordt uit een convolutie-integraal over het lineaire spectrum. Een (statistisch-) stationaire toestand blijft mogelijk, zonder energie-overdracht tussen componenten onderling.

Phillips ging tot de 3e orde bij twee horizontale dimensies en liet zien dat er dan instabiele (met de tijd toenemende) termen kunnen optreden, nl. voor die combinaties van golfgetallen die voldoen aan een zekere resonantievoorwaarde. Hij werd sterk bekritiseerd door Tick, die op slordigheden wees en door Pierson. De laatste vond dat men ook "storingstheorie" moest toepassen op de golffrequenties (bij gegeven golfgetal). Inderdaad is dit nodig wanneer men bij voorbaat wil vastleggen dat de toestand stationair moet zijn. Phillips maakte deze beperking niet, maar dan moet men zich bij het optreden van instabiele termen bewust zijn dat de verkregen uitdrukkingen slechts voor een kort tijdsinterval zinvol kunnen zijn.

Hasselmann is een jonge, tot dusver (in dit gezelschap) nog vrijwel onbekende, blijkbaar heel knappe Duitse theoreticus. Hij was nog op 't laatst voor deze conferentie uitgenodigd en verscheen gelijk een onverwachte stralende komeet, die op alle deelnemers grote indruk maakt. Zijn bijdrage was, naar mijn indruk, het meest

vergaande en ook het duidelijkst gestelde verhaal van deze zitting.

Hij bleek de storingstheorie belangrijk verder te hebben uitgewerkt. De verticale verplaatsingen van het zeeoppervlak werden steeds geschreven als meervoudige Fouriersommen over het twee-dimensionale golfgetal  $\vec{k}$  en op de bij een gegeven golfgetal behorende frequenties  $w = \sqrt{g|\vec{k}|}$  werd geen storingstheorie toegepast. Volgens H. leidde de berekening tot de 3e orde nog niet tot een continue energieoverdracht tussen componenten onderling, maar was het nodig tot de 5e orde te gaan om de eerste benadering voor deze energieoverdracht te vinden. Toch kon deze nog geheel worden uitgedrukt in de eigenschappen van het lineaire spectrum, en wel door een buitengewoon gecompliceerde uitdrukking. Zijn conclusie was, dat steeds dan, en alleen dan, uitwisseling van energie plaatsvindt tussen 4 golfcomponenten  $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$  en  $\vec{k}_4$  wanneer voldaan is aan de "resonantie-voorwaarden":

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \quad (\text{voor de golfgetal-vectoren})$$

$$\text{en} \quad w_1 + w_2 = w_3 + w_4 \quad (\text{voor de bijbehorende golfre-$$

quenties  $w_i = \sqrt{g|\vec{k}|_i}$ ;  $g =$  zwaartekrachtsversnelling). Op vier wijzen zou dan energieoverdracht optreden, steeds van drie componenten naar de vierde, en wel steeds zodanig dat de verschillen tussen het spectrum in deze 4 punten kleiner worden. De karakteristieke tijd van dit afvlakkingsverschijnsel, uitgedrukt in golfperioden, zou zijn van de orde golfhelling tot de macht minus 4; d.i. enkele uren, een tijd waarin een golfspectrum in feite belangrijk kan veranderen, zodat het beschreven proces vermoedelijk in feite een merkbare rol zou spelen. In een reeds aanwezige zeegang komt de energiewinst uit de door de wind geleverde arbeid in hoofdzaak ten goede aan vrij kleine golfgetallen corresponderend met fasesnelheden niet veel lager dan de windsnelheid, terwijl de energiedissipatie door brekende golven en turbulentie in hoofdzaak plaatsvindt voor de hoge golfgetallen. Door het beschreven proces zou dan een energieoverdracht van kleine naar grote golfgetallen optreden, evenals dit het geval is in een turbulentiespectrum.

Phillips roerde in zijn bijdrage nog een aantal andere typisch niet-lineaire verschijnselen aan. De asymmetrische vervorming van het golfprofiel (spitse kammen, lange dalen) wordt reeds in de storingsberekening van de 2e orde gevonden. Een toename van de fasesnelheid (en de frequentie) bij gegeven golfgetal komt in de 3e orde te voorschijn. Voor een beschrijving van het breken der kammen door instabiliteit schiet de storingstheorie ten enenmale tekort. Dit verschijnsel veroorzaakt een maximaal bereikbare spectrale dichtheid, die reeds bij matige wind voor hogere  $k$  snel bereikt kan worden en dan evenredig is met  $k^{-4}$  zoals uit een eenvoudige dimensiebeschouwing volgt. Pierson kwam op de conferentie met een artikel waarin de theorie van een stochastisch golvenmodel in Lagrange-coördinaten werd ontwikkeld, met de gedachte dat langsdeze weg het brekingsverschijnsel wellicht beter theoretisch zou kunnen worden benaderd. In eerste orde krijgt men dan een superpositie van Gerstner-golven.

Phillips vermeldde ook nog de moeilijke kwesties betreffende het verticale transport van wervelintensiteit (vorticity) en het daarmee samenhangende horizontale netto watertransport. Hierbij speelt de moleculaire viscositeit, ook al is deze klein, een wezenlijke rol.

In de discussie berichtte Longuet-Higgins over zijn nog niet geslaagde pogingen om in een golfgoet de niet-lineaire energieoverdracht experimenteel aan te tonen. Hij wekte golven op met golfgetallen  $k$  en  $\frac{9}{4}k$ , in dezelfde richting lopende en probeerde na enige tijd golven in tegengestelde richting met golfgetal  $-\frac{1}{4}k$  aan te tonen. De combinatie  $k_1 = k$ ,  $k_2 = k$ ,  $k_3 = \frac{9}{4}k$ ,  $k_4 = -\frac{1}{4}k$  voldoet nl. aan de resonantievoorwaarden. Ook dergelijke proeven met beperkte bodemdpte gaven nog geen positief resultaat.

Als extra punt op het programma gaf Tukey (Princeton Univ. en Bell Tel. Lab.) nog een causerie à l'improviste over enkele moderne statistische zaken. Tukey wordt in de U.S.A. beschouwd als de onbetwiste autoriteit op het gebied van de theorie van stochastische processen. Hij vermeldde o.a. de begrippen bispectrum en kruis-bispectrum, die men onlangs heeft ingevoerd als middel tot beschrijving van niet-lineaire verschijnselen. De gewone spectra en kruis-

spectra zijn Fouriergetransformeerden van kwadratische correlatiefuncties met één tijdverschil. Analoog wordt het bispectrum, complexe functie van twee frequenties (of van drie met som nul), gedefinieerd als Fouriergetransformeerde van de kubische autocorrelatiefunctie met twee tijdverschillen.

Conclusies betr. de niet-lineaire aspecten:

1. De studie van niet-lineaire verschijnselen in stochastische golven is juist begonnen.
2. Wegens de grote moeilijkheden, zowel van de theorie als van de te verrichten metingen en experimenten, is de samenwerking van theoretici en experimentatoren op dit gebied wel in het bijzonder geboden.

#### D. Instrumentatie

Op de 6e zitting aan instrumentatie gewijd, kwamen vele sprekers aan het woord.

De bijdrage van Hicks (Univ. of Illinois) hoorde eigenlijk niet hier thuis. Hij behandelde de resultaten van spectrumbepalingen van kleine windgolven in een golfgoet en de digitaal-machinale aanpassing van de spectra aan een functie met 8 parameters.

Cartwright (N.I.O.) gaf de resultaten van zorgvuldig uitgevoerde proeven om aan boord de N.I.O. ship borne wave recorder voor de kortere golven te ijken met behulp van de gelijktijdig verkregen registraties van de reeds beschreven speciale N.I.O. meetboei. Het bleek dat de storing van het drukveld in de golven door het schip groter was dan men had vermoed: de drukvariatiëen aangegeven door het druk-element in de huid van het schip op een diepte van 7 voet kwamen ruwweg overeen met de drukvariatiëen die men in de ongestoorde golf zou vinden op een diepte van  $2\frac{1}{2}$  maal 7 voet. Dit betekent o.a. dat de tot dusver met dit instrument gevonden golven in het algemeen iets te laag en iets te lang waren.

Tucker (N.I.O.) beschreef enkele nieuwe ontwikkelingen op het N.I.O.: een FM drukschrijver (met kabel), een pneumatische golfschrijver en een digitale opnamer met ponsband (4 kanalen, 5 lezingen per sec).

Farmer (vroeger Woods Hole, thans Univ. of Washington) berichtte

over een op Woods Hole ontwikkeld flexibel systeem voor het verkrijgen, registreren en reduceren van meetgegevens (vele, b.v. 12, kanalen). De signalen worden FM gemoduleerd en op magneetband opgenomen (commercieel apparaat). De magneetband wordt later afgedraaid, de signalen worden geselecteerd, gedemoduleerd en gedigitaliseerd. Een digitale rekenmachine is aanwezig.

Marks (vroeger D. Taylor Model Basin, thans Davidson Lab., Hoboken) beschreef een op eerstgenoemd instituut ontwikkeld systeem voor de bepaling van spectra en kruisspectra van twee signalen. Dit is ook een FM systeem en werkt ook vanaf magneetband, maar alles gebeurt "analoog". De resultaten komen op "X-Y-schrijvers".

Caldwell en Williams (Beach Erosion Board) rapporteerden over een aldaar ontwikkelde spectrum-analysator, speciaal bedoeld om zeer grote aantallen golfregistraties te kunnen verwerken, waarbij het minder op precisie aankomt. De langzame golfsignalen worden rechtstreeks op magneetband opgenomen met zeer lage bandsnelheid:  $\frac{1}{2}$  inch per minuut. Men krijgt dus een golfregistratie van 20 minuten op een bandje van 25 cm lengte, dat om een trommel wordt gespannen, die met een omtreksnelheid van  $62\frac{1}{2}$  inch per seconde (zijnde 7500 maal de opneemsnelheid) wordt afgetast door twee stilstaande pick-ups. Het analyseersysteem werkt ook geheel "analoog", met FM (97 kHz) en met "scanning filters".

DeLeonibus (Hydrogr. Office) en Macovsky (Westinghouse) spraken beide over golfhoogtemetingen met echoloding naar boven vanaf een ondergedoken onderzeeboot. De eerste spreker gaf ook meetresultaten. Een onderzeeboot had op het dek 9 "Sonic Surface Scanners" op afstanden van 10 meter. In enkele gevallen was het spectrum bepaald van de output van één hiervan (magneetband, daarna digitaal). De diepte was 30 meter, de bundeldiameter  $3^{\circ}$ , de meetnauwkeurigheid 1 voet. Uiteraard kunnen golven korter dan een bepaalde waarde (1,5 m in dit geval) niet gemeten worden; maar dit is nauwelijks een bezwaar. Correcties zijn verder nodig wegens de bewegingen van de onderzeeboot. De methode lijkt erg aantrekkelijk voor metingen in volle zee ..... mits men over de uitrusting kan beschikken. Het rapport van de tweede spreker was slechts een plan, oorspronkelijk opgesteld door

Munk. De methode ter verkrijging van gegevens over het richtingspectrum werd aangegeven. Dit werk stond in verband met het Polaris Fleet Ballistic Missile System. Kennis van de golfstoestand boven de onderzeeboot is gewenst bij de lancering van zo'n raket.

Russell (Calif. Res. Corp.) beschreef een verbeterde registrerende golfmeter, werkende met een verticale reeks elektrische contacten (voor metingen aan de kust), waarbij elk contact een rechte lijn geeft zolang het onder water is.

Marks gaf nog een rapport over de op het David Taylor Model Basin ontwikkelde "splashnik" (lichte boei met versnellingsmeter, zender en antenne).

Conclusies:

1. Er wordt steeds gewerkt aan de ontwikkeling van nieuwe methoden en de verbetering van bestaande methoden voor het meten van golven. Van enige normalisatie is nog geen sprake.
2. Hetzelfde geldt voor de bewerking der waarnemingen. Digitale en "analoge" methoden worden beide toegepast.

Toepassingen en rand-onderwerpen

Hieraan waren drie avondzittingen gewijd.

Marks gaf een algemeen overzicht van de verkregen kennis, de nog bestaande fundamentele problemen en de problemen die de ingenieurs dikwijls nog hebben voor zij de voorhanden kennis kunnen toepassen.

James (Hydrogr. Office) behandelde een aantal activiteiten van de oceanographic forecasting branch van deze dienst. Hierbij kwam natuurlijk ook de routing van schepen ter sprake, maar kort. Men heeft gegevens over het vaartverlies van (Victory-)schepen verzameld als functie niet alleen van de golfhoogte (voor een bepaalde golf-richting) maar ook van de golfperiode. De waarde hiervan voor de routing is evenwel twijfelachtig: de golfperioden worden onnauwkeurig waargenomen en eigenlijk moet men het spectrum beschouwen. In Norfolk heeft men een rekenmachineprogramma gemaakt voor het bepalen van de optimale route voor een schip. Ook voor de golfhoogteprognoses zijn er enkele rekenmachineprogramma's.

Darbyshire (N.I.O.) gaf een rekenmachineschema aan voor de numerieke golfhoogteverwachtingen in de oostelijke Atlantische Oceaan. Een rooster met eenheden van 200 mijl wordt gebruikt. De windsnelheden en richtingen (8 categorieën) in elk vak op de tijden 0, 12, 24, 36 en 48 uur eerder worden ingevoerd. Het gedrag van de golfperioden 6, 9, 12 en 15 sec wordt beschouwd. De voortplantingsrichtingen van windgolven zijn die van de wind en  $45^{\circ}$  aan weerszijden hiervan.

Gelci (Météorologie Nationale, Parijs) berichtte dat men ook in Parijs werkt aan numerieke golfhoogteverwachtingen. Zijn rekenschema zag er iets nauwkeuriger uit dan dat van de Engelsen. Zijn rooster-eenheid is 90 mijl; er zijn 1000 vakken. De wind- en golfrichtingen zijn in 16 categorieën en periodebanden van 7, 10, 14 en 20 sec worden beschouwd. De tijd-eenheid is 3 uur.

Bij elke numerieke methode moeten voor de groei of de verzwakking der golven bepaalde (eenvoudige) onderstellingen worden gemaakt.

St. Denis (vroeger D. Taylor Model Basin) hield een algemeen verhaal over golven, schepen en statistiek en vertoonde een film met schepen in ruwe zeeën, waaruit bleek dat de golven zich dikwijls verre van "lineair Gaussisch" gedragen.

Caldwell (Beach Erosion Board) vertoonde een serie dia-plaatjes, tonende de dikwijls opgetreden agressiviteit van de zee op de kust.

Wiegel (Univ. of Calif.) behandelde enkele "engineering aspects" van golfspectra. In verband met vervuilingsproblemen is de invloed van de golven op de verticale menging in gelaagd water van belang. Hij was somber over de tot nu toe bereikte betrouwbaarheid van golfverwachtingen in het algemeen.

Longuet-Higgins heeft het vraagstuk van de "surf-beats" weer aangevat.

Ik heb een kort verslag uitgebracht over de golf-opzet-waarnemingen verricht aan de Atlantische kust van Florida en de theorie hiervan.

#### Visuele golfwaarnemingen

In een speciaal hiertoe belegde kortdurende bijeenkomst van een beperkt aantal (ca 12) geïnteresseerden had ik gelegenheid het recente memorandum van Verploegh over dit onderwerp kort te bespreken.

Er was veel belangstelling, gezien het niet te ontkennen feit dat de grote massa van onze informatie over golven in de oceaan nog steeds berust, en voorlopig wel zal blijven berusten, op visuele waarnemingen.

### Slotzitting

De conferentie werd besloten met een "panel"-discussie onder leiding van Munk. Er was een opsomming van problemen en van suggesties, die reeds ten dele vermeld zijn.

Er werd gepleit voor het inschakelen der weerschepen voor het verkrijgen van betere informatie over golven. Munk en Cartwright suggereerden een meer algemeen gebruik van de N.I.O. meetboei. Pierson stelde dat men het weerschep zelf als boei zou kunnen gebruiken: als de spectrale responsiefuncties van het schip bekend zijn, moet men uit de spectra der scheepsbewegingen althans ten dele het golfspectrum kunnen afleiden (met een analoog-machine aan boord). Men was het er echter over eens dat zulke zaken beter niet op routinebasis kunnen worden gedaan; men kan ook zoveel informatie krijgen dat men de bewerking niet meer aan kan.

Wat de opwekking van golven door de wind betreft, vond men dat de "resonantie-theorie" van Phillips (geen correlatie tussen lucht-turbulentie en golven) het eerste stadium zou kunnen beschrijven en de "schuifstromingsinstabiliteits"theorie van Miles de verdere groei der golven zou kunnen beschrijven.

Over de verzwakking van deining en de invloed van mee-, tegen- of dwarswinden hierop is eigenlijk nog niets bekend. Op deze conferentie is hierover ook niet gesproken.

Ook de wisselwerking tussen golven, driftstroom en turbulentie is een nog grotendeels onbekend, groot gebied.

Niet-lineaire verschijnselen zullen in de toekomst steeds meer de aandacht opeisen. Een concrete vraag, waarop men nog geen algemeen antwoord kan geven, is die naar het verband tussen de eigenschappen van het spectrum en de mate van optreden van brekende golven.

Hoewel de moderne rekenmachines een snelle bewerking van grote hoeveelheden waarnemingsmateriaal en de numerieke uitwerking van



gecompliceerde wiskundige formules mogelijk hebben gemaakt, wees Munk op de onvermijdelijkheid van fouten hierbij en de noodzaak deze te elimineren.

De Bilt, 24 juli 1961.

#### APPENDIX

##### Enige opmerkingen naar aanleiding van enige na afloop van de conferentie afgelegde bezoeken

1. Beach Erosion Board, Washington.

Met een groot deel der conferentiedeelnemers maakte ik des namiddags van 4 mei een excursie mee naar deze dienst. Door busvertraging duurde deze excursie slechts één uur en was dus nogal gehaast. Bezichtigd werden verschillende golfgoten. Enkele onderhanden researchprojecten werden toegelicht door Caldwell (chef van de researchafdeling) en Saville Jr. Het meest spectaculair was de grote 200 m lange, 4,5 m brede en 6 m diepe golfgoot, waarin golven werden opgewekt van 1,8 m hoogte, door een motor van 510 HP<sup>\*)</sup>. Het werken met deze goot is erg duur; het veranderen van de instelling van de golfgenerator neemt een volle dag (in- en uitschroeven van zware bouten). Er worden daarom altijd voorstudies gemaakt in een der kleinere golfgoten.

De op pag. 13 genoemde spectrum-analysator kon van nabij bezichtigd worden. De prijs hiervan zou komen op \$20000, waarvan ca \$12000 aan onderdelen.

---

\*) Zie Annual Bull. Beach Erosion Board, 13, 1959, p. 25.

2. David Taylor Model Basin, Washington.

Dit enorme scheepsbouwkundige proefstation van de Navy werd bezocht tezamen met 5 andere conferentiedeelnemers. Het is een groot complex van laboratoria. Bezocht werd slechts de "seakeeping and fluid dynamics section", waar wij werden ontvangen door het hoofd van deze afdeling Dr. Cummins en zijn medewerker Paul Golovato. De op pag. 13 genoemde spectrum-analysator kon van nabij bezichtigd worden. Verder werden bezichtigd het pas gereedgekomen "maneuvering and seakeeping basin" en het eveneens nieuwe "rotating arm basin". Het eerste is een rechthoekige bak van 72 x 108 m, diep 6 m, met aan twee zijden 8 resp. 13 reusachtige pneumatische golfgeneratoren en een stalen brug met rails, die in een schuine stand kan worden geplaatst, waaronderlangs de sleepwagen voor het te onderzoeken scheepsmodel loopt. Het tweede is een ronde bak, diameter 78 m, diep 6 m met een roterende brug met rails en sleepwagen, tussen het midden en de omtrek, en is bedoeld voor het onderzoek van de richtingstabiliteit, manoeuvreerbaarheid en bestuurbaarheid van ultramoderne onder- en bovenwaterschepen en torpedos.

3. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mass.

Hier sprak ik met Mr. Ray Stevens, de opvolger van Farmer als golven-onderzoeker, en bezichtigde het op pag. 12-13 genoemde uitgebreide "data reduction" systeem. De prijs van het vaste deel hiervan was ongeveer \$50000, van het veldgedeelte (incl. magneetband-opnemer) ca \$6000.

Bill Richardson was bezig met de voorbereiding van een groot project waarbij stromen zouden worden geregistreerd over een gehele doorsnede tussen Woods Hole en Bermuda (ook in de diepte) met behulp van 50 zelfregistrerende, speciaal ontworpen, stroommeters die zouden worden bevestigd aan nylon kabels gespannen tussen een anker onder en een boei boven. Het idee was betrouwbaarder en vollediger gegevens over de stromingen in de diepte te krijgen dan mogelijk was met de z.g. Swallow-boeien.

4. Météorologie Nationale, Parijs.

Op suggestie van Gelci bracht ik op de terugweg nog een (bliksem-)bezoek aan de Franse meteorologische dienst. De trots was hier de nieuwe rekenmachine, fabrikant Société Nouvelle Electrique (S.N.E.), type KL 901, waarover de heer Pone het toezicht had. De machine kan werken met twee geheugens: een met magn. band (grote capaciteit, maar langzaam) en een met 25000 ferrietkernen (Philips) (kleine capaciteit, maar snel). Behalve met numerieke weersverwachtingen wordt op deze machine ook geëxperimenteerd met numerieke golfverwachtingen op de N. Atlantische Oceaan (vgl. pag. 15).

De Bilt, 16 aug. 1961.