

Verslag over het Internationale Symposium
over Fundamentele Problemen in de Turbulentie
en hun Relatie tot de Geofysica

gehouden van 4 t/m 9 september 1961 te Marseille

door Dr. F.H. Schmidt

1. Inleiding

Naar aanleiding van de inauguratie van het nieuwe "Institut de Méchanique Statistique de la Turbulence" (typerend voor de steeds verder voortschrijdende specialisatie in de wetenschap! Een instituut waar men uitsluitend de statistische eigenschappen van de turbulentie wil bestuderen; dus niet eens het gehele gebied der turbulentie!) werd van 4 t/m 9 september in Marseille een symposium gehouden over het in de titel genoemde onderwerp. Aan dit symposium was een ander voorafgegaan waarop de turbulentie als zodanig, dus afgezien van geofysische toepassingen, werd behandeld.

Het belang van beide symposia bleek uit de aanwezigheid van een groot aantal prominenten op het gebied van het onderzoek van de eigenschappen van turbulente vloeistof- en gasstromingen. Om enkele namen te noemen: von Kármán, Kolmogoroff, Taylor, Batchelor.

De geofysische toepassingen bleven, behoudens een enkele uiteenzetting over turbulente bewegingen in een magnetisch veld, beperkt tot de meteorologie en de oceanografie.

Meer dan een derde van de voordrachten werd verzorgd door afgevaardigden van de Verenigde Staten (13). Daarop volgden achtereenvolgens het Verenigd Koninkrijk (8), de USSR (4), Australië, Canada, Denemarken en Nederland ieder met 2 en ten slotte Duitsland, Frankrijk en Japan met 1 voordracht.

Het is mogelijk de gehouden voordrachten in een beperkt aantal categorieën te verdelen:

- a) Algemene beschouwingen.
- b) Nabootsing van atmosferische omstandigheden in het laboratorium.
- c) De invloed van de thermische gelaagdheid op de turbulentie in de dampkring.

d) Algemene atmosferische circulatie.

e) Turbulentie in de oceanen.

In de volgende paragrafen zal worden getracht een kort resumé te geven van de belangrijkste voordrachten. Er zal daarbij volgens bovengenoemde onderwerpen worden gerangschikt.

Het symposium werd 4 september 's morgens om 10 uur geopend door Frenkiel waarna nog het woord werd gevoerd door von Kármán, Kolmogoroff en Favre. Vervolgens werden de deelnemers in het nieuwe Instituut rondgeleid. 's Middags begon de eigenlijke symposium arbeid.

2. Algemene beschouwingen

Het symposium werd geopend met een inleidende voordracht (Some specific features of Atmospheric Turbulence) door A.M. Obukhov, die een overzicht gaf over een aantal problemen dat zich bij de recente ontwikkeling van de studie der atmosferische turbulentie voordoet. Spreker begon met er de nadruk op te leggen dat de atmosfeer zich op een zo eigene wijze gedraagt, dat het moeilijk is om de atmosferische turbulentie met behulp van laboratoriumproeven geheel te leren doorzien. Essentieel is daarbij o.a. het transport van energie bij turbulentie in een niet indifferent gelaagde dampkring. Voorts is het goed zich steeds de breedte van het atmosferische turbulentiespectrum voor ogen te houden: enerzijds een horizontale schaal van ca. 2500 km, anderzijds een schaal $l_1 = \sqrt[4]{\epsilon/\nu^3} \sim 1$ cm, een factor $2,5 \times 10^8$ derhalve! Waarschijnlijk ligt hier de oorzaak van het feit, dat meteorologen elkaar bij de bespreking van turbulentieproblemen soms zo slecht verstaan.

F. Pasquill gaf in "Recent broadband spectral measurements of turbulence in the lower atmosphere" een voortzetting van de voordracht die hij in 1958 in Oxford hield (Advances in Geophysics VI) en waarvan de tendens was dat door instrumentele onvolkomenheden veelal een verkeerde indruk wordt verkregen met betrekking tot de atmosferische turbulentie.

Zo kan men bijv. de standaarddeviatie van de verticale snelheid trachten voor te stellen als $\sigma_w = B u_x$ waarbij B een constante is en u_x de schuifsnelheid. Met de logaritmische wet $\frac{u}{u_x} = \frac{1}{k} \log \frac{z}{z_0}$ krijgt men dan

$$\frac{\sigma_w}{u_x} = \frac{kB}{\log z/z_0}$$

waarbij z_0 een bepaalde referentiehoogte is. Volgens deze betrekking is

σ_w dus onafhankelijk van de hoogte wat in de onderste laag van de dampkring waar men gewoonlijk $\tau = \text{const}$ stelt ook wel ongeveer juist zal zijn behoudens vlak bij de grond.

Om B te kunnen berekenen moet men het gehele w' -spectrum meenemen hetgeen door instrumentele onvolkomenheden meestal niet gelukt. Dit blijkt o.a. uit het feit, dat de waarden van B die in de loop van de tijd werden gevonden groter werden naarmate met een beter instrumentarium werd gemeten. Zo vond men achtereenvolgens 0,86, 0,70, 1,25. Door rekening te houden met de onvermijdbare tekortkomingen van de apparatuur vond spreker ten slotte $B = 1,33$.

A.M. Kolgomoroff (Heat transfer in the sublayer) gaf een overzicht over de nieuwe Russische onderzoeken met betrekking tot het warmte-transport in de laag vlak bij de grond. Het resultaat kwam op het volgende neer. In de laag vlak bij de grond waar de stroming laminair is, neemt de temperatuur lineair met de hoogte toe of af. Op grotere hoogte waar de stroming turbulent is, is het temperatuurprofiel logaritmisch terwijl zich tussen deze beide gebieden een overgangslaag bevindt waarin de temperatuur verandert volgens $\frac{1}{y^2}$ waar $y_{\infty} = y/\delta$, de hoogte gedeeld door $\delta = \nu/v_{\infty}$ met ν de snelheid en v_{∞} de schuifsnelheid. Evenals bij de overige door de Russen gehouden voordrachten viel op hoezeer zij de deductieve methode rigoureus trachten toe te passen bij hun beschouwingen. Voordrachten, die beperkt bleven tot een beschrijving van waarnemingsresultaten, zoals de Engelsen en Amerikanen veelal hielden, werden door de Russen niet gegeven. Ook bij andere gelegenheden is dit opgevallen.

De invloed van een temperatuurgradiënt op het turbulentiespectrum werd behalve experimenteel ook theoretisch onderzocht. R.G. Deissler (Turbulence in presence of a vertical temperature gradient and a body force) ging daartoe uit van vergelijkingen waarin ook de opwaartse kracht was opgenomen en waarin dan op de bekende wijze u werd gesplitst in \bar{u} en u' . Daardoor werden correlatie-vergelijkingen verkregen waarop de Fourier transformatie werd toegepast om een indruk van de spectrale verdeling te krijgen. Als randvoorwaarde werd daarbij genomen dat de turbulentie op het tijdstip $t = 0$ isotroop was. Er bleek een anisotropie te voorschijn te komen die het grootst was voor kleine k (grote wervels). Het verticale warmtetransport nam af met toenemende stabiliteit. Het geheel is slechts een theorie en een van de geopperde bezwaren was o.a. dat drievoudige correlaties in deze theorie niet voorkomen, terwijl hun invloed zich in het experiment niet laat onderdrukken.

Min of meer in aansluiting op het voorgaande toonde K.A. Spiegel (Thermal turbulence at low Péclet number [$\sqrt{\frac{ud}{x}}$ waarbij u snelheid, d dimensie en x temperatuurvereveningscoëfficiënt, overeenkomend met de kinematische viscositeit]) aan, dat er een grootste golfgetal is dat bij turbulente warmteoverdracht een rol speelt. Bij grote waarde van k kan dus isotropie worden verwacht, gelijk ook door Deissler werd gesuggereerd.

A.K. Blackadar gaf een modificatie van de theorie van de Ekman-spiraal (Vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere). In de vergelijkingen voor stationaire stroming waaruit de Ekman-spiraal wordt afgeleid:

$$f(v - v_g) + \frac{d}{dz} \left[K_M \frac{d}{dz} (u - u_g) \right] = 0$$

en de overeenkomstige voor de y-richting, waarin de symbolen de gebruikelijke betekenis hebben, zette hij $K_M \approx \xi^{1/3} l^{4/3} = l^2 s$. ξ is hierin de gedissipeerde turbulente energie, l de mengingslengte en $s^2 = \left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2$. De invoering van $l^2 s$ voor K_M geeft een mogelijkheid om de Ekman-spiraal (zij het ook gemodificeerd) te bepalen. De gebruikelijke uitdrukkingen voor l ($l = kz$ of $l = -ks/\frac{ds}{dz}$) geven oplossingen, die niet bevredigend met de experimentele resultaten kloppen. De vorm $l = \frac{kz}{1 + \frac{kz}{\lambda}}$ met $\lambda = c \frac{G}{f}$ en $c = 27 \cdot 10^{-5}$, waarmee λ dus ongeveer $3 \times G = 3(u_g^2 + v_g^2)^{1/2}$ wordt, geeft resultaten, die bijvoorbeeld de klassieke Leipziger windprofielen uitstekend beschrijven. De oplossing impliceert, dat voor zeer kleine waarde van z, $l \sim z$ is, terwijl voor grote waarden van z $l \approx \lambda$ wordt. De grenslaag waarin geldt $\tau = \text{const}$ en de eigenlijke Ekmanlaag zijn in de oplossing van Blackadar dus gecombineerd.

De constante c hangt mede van de ruwheidsparameter z_0 van de grond af. De hoogte waarop de geostrofische wind wordt bereikt wordt door variaties in de waarde van c slechts weinig beïnvloed.

"Empirical data on turbulence in the surface layer of the atmosphere" was de titel van de bijdrage van A.S. Monin, die door Obukhov aan de aanwezigen werd voorgelegd. Ook in deze voordracht van Russische oorsprong was weer sterk het streven merkbaar om het gehele turbulente gebeuren in de onderste lagen van de atmosfeer zoveel als mogelijk in niet-dimensionale, universele betrekkingen weer te geven. Uitgaande van de bekende stabiliteitsparameter

$$L = \frac{v_x}{x \frac{g}{T} \frac{q}{c_p \rho}}$$

werd o.a. nagegaan het gedrag van $\frac{\sigma_u}{v_x}$ en $\frac{\sigma_w}{v_x}$ als functie van $\frac{z}{L}$.

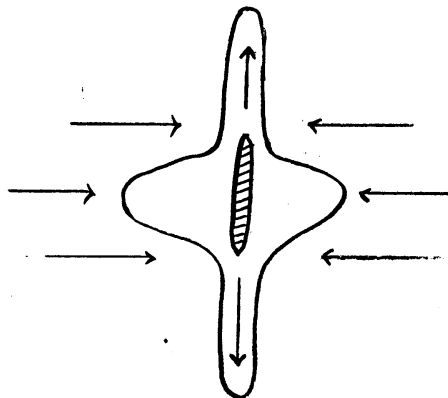
Het voor toetsing van de theorie gebruikte waarnemingsmateriaal werd verkregen met behulp van accoustische metingen waarbij een zender in het centrum stond van een vierkant dat werd gevormd door vier ontvangers. De meting van de turbulente snelheid van de lucht was daarbij gebaseerd op het bepalen van de voortplantingssnelheid van de opgewekte geluidsgolven ($u + c$) in de x-richting, bijv. De gehele apparatuur had afmetingen van ongeveer 5 cm. De meetseries duurden nooit langer dan 10 tot 20 minuten in verband met de veranderlijkheid van de atmosferische omstandigheden.

Zowel het spectrum van de turbulente snelheden als dat van de temperatuurfluctuaties bleek sterk op het theoretisch te verwachten spectrum van Kolmogoroff te gelijken.

Bij de discussie werd opgemerkt, dat de Monin-Obukhov-relatie $\frac{\sigma_w}{u_x} = f\left(\frac{z}{L}\right)$ het redelijk goed doet maar dat dit niet het geval is met $\frac{\sigma_u}{u_x} = f'\left(\frac{z}{L}\right)$ en $\frac{\sigma_v}{u_x} = f''\left(\frac{z}{L}\right)$. Volgens spreker zou dit moeten worden toegeschreven aan het feit, dat w een beperkt spectrum vertoont, beperkt door de begrenzing (aardoppervlak). Bij de waarnemingen van u en v zou men vrijwel steeds meten in een gebied liggende tussen turbulentie en "weer", zonder dat het mogelijk zou zijn de een scherp van de andere te scheiden.

R. Betchov hield een pleidooi voor het intensiveren van het turbulentieonderzoek in de atmosfeer (Suggestions for experimental studies of atmospheric turbulence). Een dergelijk onderzoek zou bij voorkeur moeten worden uitgevoerd met behulp van een drietal hittedraad-anemometers.

De achtergrond van het betoog school in de opvatting van spreker met betrekking tot het mechanisme van de turbulentie. Stromingen van verschillende snelheid zouden met elkaar in botsing komen waarbij vloeistofhoeveelheden zouden worden gedeformeerd op een wijze als in de figuur is aangegeven.



Vloeistof zou zijdelings wegstromen. De viscoze dissipatie zou vooral plaatsvinden in dunne lagen, zoals die welke gearceerd is aangegeven en waarvan de dikte δ_1 van de orde $\sqrt{\frac{\nu}{u}}$ zou zijn (zulks vanwege $u \frac{\partial u}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$).

De totale per volume-eenheid gemiddelde dissipatie in de in de figuur weergegeven vervormde vloeistofklomp zou dan bedragen

$$\epsilon \approx \nu \left(\frac{u}{\delta_1}\right)^2 \frac{\delta_1 L^2}{L^3} \approx u \delta_1 \left(\frac{u}{\delta_1}\right)^2 \frac{\delta_1 L^2}{L^3} \approx u^3 / L_1$$

Een soortgelijk betoog kan worden gehouden met betrekking tot de dissipatie ten gevolge van langs elkaar schuivende vloeistofklompen.

Het is duidelijk, dat de experimentele bevestiging van deze opvatting - zo mogelijk - beter in de atmosfeer zal kunnen geschieden dan in de wind-tunnel waar het Reynoldse getal van de turbulentie in het algemeen kleiner is dan in de atmosfeer.

C. de Jager (Upper atmospheric turbulence derived from rocket measurements) gaf een overzicht van het inmiddels gepubliceerde werk van hem en Blamont met betrekking tot "turbulentie" metingen aan natrium- en lithiumporen in de lagen tussen ca. 80 en ca. 120 km hoogte. Er blijkt een vrij scherpe overgang te bestaan van "laminaire" naar "turbulente" stroming op ca. 100 km hoogte waarbij de laminaire laag boven de turbulente ligt.

Het merkwaardige is, dat deze overgang niet kan worden begrepen op grond van een verschil in Richardson-getal. Wel is er een verschil in Reynoldsgetal maar het is moeilijk te begrijpen hoe dit kengetal, dat is geïntroduceerd in verband met stromingen in buizen (traagheidskrachten versus wrijvingskrachten waarbij in de laatste $\frac{\delta u}{\delta z}$ een rol speelt!) de stromingstoestand op 100 km hoogte in de atmosfeer zou bepalen.

J.C. Schönfeld gaf in "Improvement of the integral diffusion concept" bepaalde ideeën, die tot een verbetering van de wiskundige beschrijving van het diffusieverschijnsel zouden moeten leiden. Het onderwerp was te ingewikkeld dan dat reeds thans een oordeel over de merites van Schönfeld's betoog kan worden gegeven. De essentie van een en ander lag in de opvatting, dat K (de diffusiecoëfficiënt) moet worden opgevat als een functie van het golfgetal. Ook hier dus een variant op de Fickse diffusie, afwijkend echter van die welke door Richardson werd gegeven, die immers K niet liet variëren met het golfgetal maar met een karakteristieke lengte.

3. Nabootsing van atmosferische omstandigheden in het laboratorium

T.H. Ellison (Laboratory measurements of turbulent mixing in stratified fluids) gaf een overzicht over twee series metingen van de turbulente diffusie in gelaagde vloeistoffen.

In de eerste groep experimenten werd het impuls- en het massatransport gemeten in een vloeistof, die in de onderste lagen een groter zoutgehalte had en dus dichter was dan bovenin. Bij het bepalen van de verhouding tussen eddy diffusivity K_s en eddy viscosity K_m bleek, dat de verhouding tussen beide een functie van Ri was en wel zodanig, dat bij toenemende stabiliteit de zoutdiffusie naar verhouding kleiner werd dan

de impulsoverdracht. Dit zou overgebracht zijnde op warmtetransport (i.p.v. zouttransport) kunnen betekenen, dat eventuele stabiliteit van een vloeistof niet erg belangrijk zou zijn als turbulentiebeperkende omstandigheid.

Ten einde dit nader te controleren werd een tweede serie proeven gedaan waarbij in een windtunnel zowel een temperatuurgradiënt als een snelheidsgradiënt (rooster met naar onder afnemende roosterbreedte) werd aangebracht.

Het bleek, dat het variëren van het temperatuurveld vrijwel geen effect had op het turbulentiespectrum. Het is de vraag of de metingen niet te dicht achter het rooster plaatsvonden, zodat wellicht daardoor de resultaten niet zonder meer op de atmosfeer kunnen worden overgedragen.

H.K. Wiskind (Measurements in a grid-generated Turbulent Flow with Uniform Temperature gradiënt) rapporteerde over een soortgelijk onderzoek. Ook hij vond dat het aanleggen van een temperatuurveld het turbulentieveld nauwelijks beïnvloedde. Dezelfde restricties met betrekking tot de overdraagbaarheid van windtunnelmetingen op de atmosfeer gelden uiteraard ook hier.

De temperatuurfluctuaties werden eveneens gemeten en bleken het grootst in het midden van de tunnel te zijn. Bij het bepalen van $\overline{w'T'}$ en $\overline{u'T'}$ bleek voorts, dat de turbulentie duidelijk anisotroop was. Enige invloed van de stabiliteit is er dus toch zichtbaar wel.

Voorts bestond er een vrijwel constante verhouding tussen de grootte van de temperatuurfluctuaties in het midden van de tunnel en de temperatuurgradiënt en wel $\left[\overline{(T')^2} \right]^{1/2} / \left| dT/dy \right| = 0,56$.

Een belangwekkend overzicht werd door J.R. Weske gegeven over het verdwijnen van wervels ten gevolge van de wrijving (On the process of cascading of energy from a primary vortex to motions of higher wave numbers). Aan de hand van bijzonder knap opgenomen films werd gedemonstreerd hoe aan de rand van een grote in een tank met vloeistof opgewekte wervel na korte tijd kleine wervels ontstaan, in aantal afnemend, in grootte toenemend met de tijd. Via deze wervels dissipeert dan de oorspronkelijke wervel en wel in een tijd van ca. 3 seconden. De kleine wervels ontstaan aan de rand van de grote, zichtbaar door de daar heersende shear. Het onderzoek was opgezet naar aanleiding van waarnemingen aan tornado's.

In Marcoule in Frankrijk bevindt zich een belangrijk reactorcentrum waar o.a. plutonium wordt geproduceerd en gecontamineerde lucht in de atmosfeer wordt gebracht. Met behulp van modelproeven in de windtunnel is nagegaan in hoeverre hier bij verschillende windrichtingen met min of meer ernstige besmetting rekening moet worden gehouden. Een en ander werd uiteengezet, o.a. aan de hand van films door J. Chassany (Preliminary wind-tunnel study of the Marcoule Site).

4. De invloed van de thermische gelaagdheid van de dampkring op de turbulentie

R. Bolgiano (Structure of Turbulence in Stratified Media) is met de atmosferische turbulentie in contact gekomen via de radiovoortplanting waarbij immers de turbulentie een belangrijke rol speelt. Zijn probleem betrof met name de invloed van de gelaagdheid van de dampkring op het turbulente spectrum en de wijze waarop energie wordt gedissipeerd bij stabiele toestanden. Bolgiano onderscheidde in dit verband drie frekwentiegebieden in de atmosferische turbulentie, nl. een gebied met lage frekwentie waarin op de een of andere wijze energie zou worden gedissipeerd ten gevolge van de stabiliteit, een tussengebied (Kolmogoroff) waar evenwicht heerst (inertial subrange) en het gebied van de grote frekwenties waar dissipatie van energie plaatsvindt ten gevolge van de viscositeit. De waarde van deze beschouwingen, die in principe wel juist lijken, wordt geheel bepaald door de frekwentie waarbij de overgang van het eerste naar het tweede gebied ligt. Volgens spreker zou bij zeer grote stabiliteit deze overgang zodanig verschuiven in de richting van de grote frekwenties, dat de inertial subrange geheel zou kunnen verdwijnen.

De meetresultaten van het Project Prairie Grass werden op een bepaalde wijze geïnterpreteerd door F.A. Gifford (Diffusion in the diabatic surface layer). Onder een diabatische laag wordt verstaan een niet-indifferente (adiabatische) laag. De uitbreiding van het bij de experimenten van het Project Prairie Grass uit een continue puntbron in de atmosfeer gebrachte SO_2 werd beschreven met behulp van de Monin-Obukhovse parameter L . Voor de axiale concentratie in de as van de pluim geldt:

$$\frac{\pi_{as}}{Q} b v_x \propto \frac{k}{z^2 v_x [f(\zeta) - f(\zeta_0)]}$$

ζ is daarbij = \bar{z}/L . De gemiddelde streep boven de z geeft aan dat het

om een in de tijd gemiddelde verdeling gaat. $f(\zeta) = \ln \zeta + \alpha \zeta$, een combinatie van een logaritmische en een lineaire term dus. b is een bepaalde functie van ζ .

Theoretisch werd zo ten slotte een waarde van χ_{as} gevonden als functie van \bar{x} , die redelijk klopte met de uitkomsten van de Prairie Grass experimenten.

H.A. Panofsky gaf enige beschouwingen over het gedrag van turbulentie in de benedenste 100 m van de atmosfeer aan de hand van het te Brookhaven verzamelde waarnemingsmateriaal (Budget of kinetic energy in the surface layer).

Hij ging daarbij uit van de vergelijkingen:

$$\frac{d\bar{E}}{dt} = - \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (1-Rf) - \frac{\partial \bar{E} u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p} u_j}{\partial x_j} - \xi$$

waarbij de termen resp. voorstellen:

- a) $\frac{d\bar{E}}{dt}$ de totale energieverandering. $\bar{E} = \frac{u_i^2}{2}$
- b) $-\overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (1-Rf)$ aandeel van de shear waarbij door Rf , het "flux Richardson number" = $\frac{K_H}{K_M} Ri$, rekening is gehouden met de stabiliteit.
- c) $-\frac{\partial \bar{E} u_j}{\partial x_j}$ aandeel van advection
- d) $-\frac{\partial \bar{p} u_j}{\partial x_j}$ aandeel van de turbulente drukkrachten
- e) $-\xi$ moleculaire dissipatie.

Er is nu ondersteld, dat de stroming in het gebied van Brookhaven horizontaal homogeen was. Daarmee gaat $\frac{d\bar{E}}{dt}$ bij goede benadering (gemiddeld geen verticale beweging) over in $\frac{\partial \bar{E}}{\partial t}$ die klein was maar in principe werd gemeten. Voorts werden d) en e) verwaarloosd omdat ze niet bekend waren. Voor Rf werd Ri genomen, d.w.z. K_H werd = K_M gesteld.

Dit alles is dus nogal ruw - hetgeen spreker trouwens zelf het eerst naar voren bracht - maar er kwamen toch wel resultaten uit het onderzoek, die de moeite waard waren. De belangrijkste waren:

- 1) Bij stabiele toestanden vond de gehele dissipatie plaats in de beschouwde laag.
- 2) Bij onstabiliteit was er een sterk transport van turbulente energie naar de hogere lagen (term c). Dit transport was vooral gekoppeld aan lage frekwenties en kan dus als vrijwel geheel thermisch worden beschouwd.

0. Kofoed Hanssen bracht hetzelfde verslag over het gedrag van een rookpluim onder zeer stabiele atmosferische omstandigheden uit als in oktober 1960 op het congres in Risø (On the interpretation of smoke diffusion and wind analysis data at Risø). Uiteraard golden nog dezelfde bezwaren als toen: conclusies uit meteorologisch weinig betrouwbaar lijkend waarnemingsmateriaal. Geen zekerheid dat micrometeorologische omstandigheden aan weerszijden van de vrij brede fjord dezelfde zijn (de meteorologische mast staat aan de ene zijde van de fjord, de schoorsteen waar de pluim uit ontsnapte aan de andere).

5. Algemene atmosferische circulatie

"Problem of formulating a realistic model of the general atmospheric circulation", aldus de titel van een door D.R. Davies gehouden voordracht. Een misplaatste titel overigens want het model bleek bij nadere beschouwing niet zo heel erg realistisch te zijn. Dat begon al met het voorschrijven van de temperatuurverdeling over de aarde terwijl men toch juist zou wensen, dat die temperatuurverdeling als een van de producten van de straling en de gezochte algemene circulatie te voorschijn zou komen.

Maar het minst realistisch was vermoedelijk wel, dat de Reynoldse spanning $\overline{u'v'}$ die in de gebruikelijke meteorologische bewegingsvergelijkingen te voorschijn komt door u en v respectievelijk gelijk te stellen aan $\bar{u} + u'$ en $\bar{v} + v'$, gelijk werd gesteld aan $-k \Omega \frac{\partial T}{r \partial \theta}$ waarbij Ω de Coriolisparameter voorstelt, r de afstand tot het middelpunt van de aarde (\approx aardstraal) en θ de breedte. In deze betrekking zou k een constante zijn! Dit nu is zeker niet juist, hetgeen door spreker ook werd toegegeven. Maar daarmee verviel eigenlijk het gehele betoog.

Tot dusverre werd bij beschouwingen met betrekking tot de algemene circulatie (Priestley, Star and White) uitsluitend aandacht geschonken aan de balans van bepaalde eigenschappen en daarmee aan de flux van die eigenschappen (S) door bijvoorbeeld de breedtecirkels.

Men gaat daarbij uit van de uitdrukking:

$$\overline{VS} = \bar{V} \bar{S} + \overline{V'S'}$$

waarbij links de totale flux staat en rechts achtereenvolgens het aandeel van de advectie en dat van de turbulentie tot deze totale flux.

G.B. Tucker (Convergence of horizontal flux of water vapour in the general circulation of the atmosphere) meende een stap verder te komen door de vergentie van de flux in beschouwing te nemen. Aangenomen mag

inderdaad worden, dat de kennis van de divergentie en de convergentie van waterdamp in bepaalde gebieden van belang zou kunnen zijn voor het opstellen van verwachtingen op lange termijn. Dit zou met name gelden wanneer de divergenties of convergenties van waterdamp zich regelmatig over de aarde zouden verplaatsen. Een onderzoek naar het gedrag van deze vergenties moet dus zeker nuttig worden geacht.

Helaas is het moeilijk de vergentie juist van water te bepalen. De vergentie van het linker lid van de boven gegeven vergelijking moet worden bepaald uit de neerslag (bij oceanen eventueel nog uit de toevloed van rivieren, hetgeen door spreker niet werd genoemd) en de verdamping. Men kan dit slechts met succes trachten te doen voor lange perioden. Zowel aan het bepalen van de neerslag R als van de verdamping E - het laatste uit $E = a U (e - e_d)$ waarbij a een niet precies bekende constante voorstelt! - kleven fouten, die met name boven de oceaan zowel in R als in E 10% of meer kunnen bedragen. De fout in $R-E$ is dan natuurlijk relatief groot.

De vergentie van $\bar{V} \bar{S}$ laat zich in principe bepalen, zodat dan ook die van de laatste term bekend is. Een en ander werd door Tucker nader gedemonstreerd aan de hand van kaarten met isolijnen van de drie vergenties (div. $\bar{V}'S'$ werd daarbij dus verkregen uit div. $\bar{V}\bar{S}$ en div. $\bar{V} \bar{S}$ en kon slechts kwalitatief worden beoordeeld). Aan de betrouwbaarheid van de resultaten moet om boven uiteengezette redenen worden getwijfeld.

6. Turbulentie in de oceanen

E.L. Deacon behandelde de "aerodynamic roughness of the sea". Een en ander als vervolg op een artikel dat in 1956 verscheen in het Australian Journal of Physics (Bd 9, pag. 511).

De wind werd gemeten op drie hoogten met anemometers, die aan de boegspriet een eind voor de boeg van een schoener waren bevestigd. Er waren ook nog twee anemometers in de mast geplaatst.

$\frac{\Delta U}{U_{10}}$ waarbij $\Delta U = U_{13} - U_4$ werd nu bepaald als functie van ΔT , het temperatuurverschil tussen lucht en zee. Het bleek dat $\frac{\Delta U}{U_{10}}$ toeneemt met toenemende ΔT waarbij de mate van toename afhangt van U_{10} . Hoe stabielere de onderste lagen zijn hoe groter dus de windsnelheidsgradient.

A.R. Robinson besprak de "fijnstructuur" van bepaalde zeestromingen in een voordracht getiteld: "Transport of vorticity by turbulent meanders of mid-oceanic jets". Nauwkeurige waarnemingen hebben aangetoond, dat

sommige zeestromen, met name die langs Japan, sterke meander-bewegingen vertonen. Spreker trachtte dit min of meer theoretisch af te leiden door op een rechthoekige oceaan een bepaald windveld te laten werken. Het geheel maakte een enigszins geforceerde indruk.

J. Crease (Velocity measurements in the deep water of the North Atlantic) bracht verslag uit over stroommetingen met behulp van zwevende sondes op diepten van 2000 en 4000 m uitgevoerd. Het bleek, dat binnen enkele dagen richtingsveranderingen optraden tot 180° toe en op een zodanige onregelmatige wijze, dat van turbulentie kan worden gesproken.

R.W. Stewart gaf een overzicht over twee onderzoeken die in Canada werden uitgevoerd. Het eerste (Hot film measurements of Turbulence in the Ocean) was in hoofdzaak van instrumentele aard. Voor het meten van snelheden in zee werd een "hot film" in plaats van een "hot wire" gebruikt, omdat de laatste onmiddellijk geheel door organismen werd bedekt. Bij plaatjes met afmetingen van een paar cm tegen een dikte van een paar μ was dit in veel mindere mate het geval. Het plaatje mocht niet een te hoge temperatuur hebben (20°C), omdat anders zuurstof uit het zeewater werd verdreven waarbij belletjes op het filmpje komen te zitten hetgeen de metingen onbetrouwbaar maakt.

In het tweede verslag (Spectra of the horizontal cross-stream component of turbulence in a tidal stream) werden mededelingen gedaan over de resultaten van metingen met de hot film. De metingen vonden plaats in een fjord-achtige zeearm waarin een getijverschil van ca. 4 m optrad. De getijstromen zijn overeenkomstig sterk, tot 8 m sec^{-1} toe! De metingen gaven geen uitsluitsel over het lage frekwentiegedeelte van het spectrum aangezien dit niet van de scheepsbewegingen viel te scheiden. Het hoge frekwentiegedeelte van het spectrum voldeed over een belangrijke breedte aan de $-5/3$ -wet van Kolmogoroff. Voor de hogere frekwenties werd een $-4,5$ à $-5,0$ verloop gevonden. De turbulente energie-dissipatie bleek sterk met toenemende diepte af te nemen.

Ook K.F. Bowden gaf een overzicht over turbulentie-metingen in een getijstroom (Measurements of turbulence near the sea bed in a tidal current). De metingen van u en w vonden plaats op 50 tot 175 cm boven de zeebodem.

Bepaald werden o.a. $\frac{[u^2]^{1/2}}{U}$, $\frac{[w^2]^{1/2}}{U}$ en $\frac{[u w]}{U^2}$ waarvoor respectievelijk gevonden werden 0,131, 0,066 en 0,00323.

Voor de macroschaal werden twee waarden gevonden: $L_u = 3,57\text{ m}$ en $L_w = 1,25\text{ m}$. De turbulentie was dus niet isotroop wat zo vlak boven de

bodem ook niet behoeft te verbazen.

De plaats van het maximum in het spectrum is duidelijk een functie van de hoogte boven de bodem. Met toenemende hoogte komt dit maximum bij lager golfgetal te liggen.

J. Joseph toonde aan de hand van een paar voorbeelden aan, dat de turbulente diffusie in zee niet kan worden beschreven met behulp van de klassieke Fickse opvatting (Remarks on the spectrum of Turbulent Diffusion Velocities in the Ocean).

De voordracht bracht weinig nieuws en de inhoud was vrijwel gelijk aan die van twee reeds verschenen artikelen:

J. Joseph en H. Sendner: Über die horizontale Diffusion im Meere, Deutsche Hydrografische Zeitschrift, Band 11, pag. 49, 1958;

J. Joseph: On mixing processes in the sea, in Disposal of radioactive Wastes, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1960.

7. Resumé

Samenvattend kan worden gesteld, dat het symposium op een hoog niveau stond en bepaald aanleiding heeft gegeven tot een nieuwe bezinning op de problemen van de turbulentie in atmosfeer en oceaan.

Bij de slotbeschouwingen, die werden gegeven door Kolmogoroff, Bogliano, Stewart en Frenkiel, kwamen o.a. de volgende punten naar voren:

- a) Het steeds groter wordende belang van similariteitsbeschouwingen, ook voor de geofysische turbulentie.
- b) Het beschikbaar komen van steeds meer waarnemingsresultaten.
- c) Het toenemende belang van turbulentiebeschouwingen voor de theorie van de algemene circulatie.
- d) Het minder belangrijk worden van het Richardson-getal, omdat uit bepaalde waarnemingen blijkt, dat het warmtetransport bij stabiliteit sneller naar nul nadert dan het impulstransport.
- e) De noodzaak voortdurend te beseffen dat instrumentele tekortkomingen kunnen leiden tot een verkeerde interpretatie van bepaalde waarnemingen.

De op het symposium gehouden voordrachten zullen gebundeld worden uitgegeven. Er is alle reden om deze publicatie met belangstelling tegemoet te zien.