Nadat Braak eind december 1947 — dus op bijna 68-jarige leeftijd — het KNMI had verlaten, bleef hij zijn fiets, die hem dagelijks van Bilthoven naar De Bilt had gebracht, en die ook bij het bezoeken van de waarnemers overal in het land vele diensten had bewezen, nog lange tijd trouw. Hij bleef in Bilthoven wonen maar bracht zijn laatste levensjaren in De Bilt door waar men hem dagelijks zijn steeds korter wordende wandelingen kon zien maken, zelfs nog in december van het vorige jaar.

Zijn verdiensten werden erkend door zijn benoeming tot erelid van het Koninklijk Aardrijkskundig Genootschap. Ook was hij lid van het Bataafsch Genootschap der Proefondervindelijke Wijsbegeerte te Rotterdam.

H. ten Kate

Een laboratoriummodel van de atmosfeer

C. Floor en W. van Dijk

De algemene circulatie

Het onderdeel van de meteorologie dat met de naam 'algemene circulatie' wordt betiteld omvat de beschrijving en de verklaring van de in de atmosfeer optredende bewegingen. Onderwerpen als de gemiddelde verdeling van de winden over het aardoppervlak, de optredende afwijkingen van deze gemiddelden en de transporten van warmte, waterdamp, impulsmoment e.d. van de evenaar naar de pool behoren tot het terrein van de algemene circulatie.

Bij de bestudering ervan wordt op verschillende manieren te werk gegaan. Allereerst wordt aan de hand van door de diverse meteorologische waarnemingsstations verrichte waarnemingen een zo goed mogelijk beeld geschetst van de circulatie. Daarnaast zoekt men naar (wiskundige) verbanden tussen factoren, die bij de circulatie een rol spelen. Tenslotte tracht men ook wel de algemene circulatie, of een aantal belangrijke aspecten daarvan, na te bootsen met behulp van computers of laboratoriummodellen om op deze manier experimenten te kunnen uitvoeren, waarbij de betrokken variabelen onder controle gehouden kunnen worden. In dit artikel wordt op het laboratoriummodel nader ingegaan.

Het laboratoriummodel

Fig. 1 geeft een doorsnede van het model, dat thans bij het circulatieonderzoek gangbaar is. Het bestaat uit 2 concentrische cilinders, waartussen zich de meetvloeistof, die de atmosfeer voorstelt, bevindt. Fig. 2 geeft aan hoe men zich het verband kan denken tussen het model en de atmosfeer. De binnenste cilinderwand komt overeen met een verticale wand langs een breedtecirkel in de buurt van de pool; de buitenste cilinderwand stelt een verticale wand voor langs een breedtecirkel nabij de evenaar. Men brengt de binnenwand op een lagere temperatuur dan de buitenwand, zodat het element 'temperatuurverschil tussen hoge en lage breedte' in het model is verwerkt. Bovendien wordt het model draaibaar opgesteld, waardoor ook de draaiing van de aarde in het model is ingebracht.

De fig. 3 en 4 geven een beeld van de opstelling, die aanwezig is in het instituut voor meteorologie en oceanografie van de rijksuniversiteit te Utrecht. Daar de temperaturen van de cilinderwanden ingesteld worden m.b.v. warm of koud water, is een derde cilinderwand toegevoegd, zoals op fig. 3 is te zien. Van buiten naar binnen treft men eerst het warme bad aan. Hierin bevindt zich o.a. de soldeerbout, die voor de verwarming zorgdraagt. Vervolgens is er de meetvloeistof, aan de bovenkant waarvan een stervormig patroon zichtbaar is, (over stromingspatronen wordt hieronder uitvoeriger gesproken). Geheel in het midden bevindt zich het koude bad. Hierin komen de buisjes

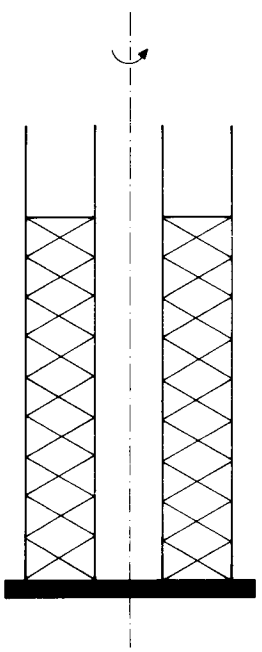


Fig. 1. Verticale doorsnede van het laboratoriummodel.

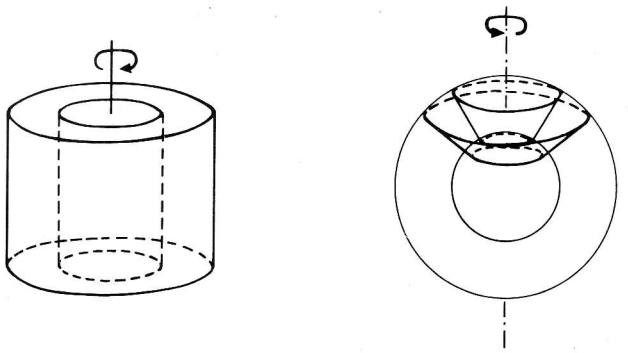


Fig. 2. Vergelijking tussen het vloeistofringmodel en de atmosfeer.

van het koelcircuit uit, dat er voor zorg draagt dat de temperatuur in het binnenbad niet te hoog oploopt. In de beide temperatuurbaden bevinden zich thermokoppels, waarmee het temperatuurverschil tussen de baden en de temperatuur van een van de baden gemeten wordt. Verder wordt steeds de omwentelingssnelheid gemeten om naast de invloed van het temperatuurverschil ook de afhankelijkheid van de draaisnelheid te kunnen bestuderen. Recht boven het model is het fototoestel zichtbaar, waarmee momentopnamen van het stromingspatroon gemaakt kunnen worden (fig. 5 en 6).

Het Hadley-gebied

De experimenten met het laboratoriummodel laten zien dat er afhankelijk van het aangelegde temperatuurverschil en de draaisnelheid, verschillende stromingspatronen aan de bovenkant van de vloeistof kunnen optreden. Bij kleine draaisnelheden, bij kleine temperatuurverschillen en bij betrekkelijk grote temperatuurverschillen ontstaat er een stromingspatroon dat symmetrisch is t.o.v. de draaiingsas, (fig. 5). Men spreekt hier van het Hadley-gebied, omdat de in het model waargenomen stromingen overeenkomsten vertonen met de stromingen op aarde, zoals deze volgens George Hadley zouden plaatsvinden. Hadley publiceerde zijn theorie reeds in 1735, toen er nog weinig exacte meetgegevens beschikbaar waren.

De passaatwinden, die optreden tussen de gematigde breedten en de evenaar, worden vergelijkbaar geacht met de Hadley-stroming in het laboratoriummodel.

Het Rossby-gebied

Wanneer niet voldaan is aan de voorwaarden, die bij het Hadley-gebied genoemd werden, geeft het vloeistofoppervlak in het model een geheel ander stromingspatroon te zien. Er treden verschillende golven op die meer (vooral fig. 6a, b) of minder (fig. 6d) regelmaat kunnen vertonen. Men spreekt hier van het Rossby-gebied, genoemd naar de bekende meteoroloog Carl Gustaf Rossby. Rossby kwam tot een eenvoudige verklaring voor het golfpatroon dat zich vaak voordoet in de zone van westelijke winden op grotere hoogten. Fig. 7 laat dergelijke golfpatronen zien, zoals die soms op 5-daagse gemiddelde kaarten van het 500mbar vlak duidelijk herkenbaar aanwezig zijn. Wanneer men deze kaarten vergelijkt met fig. 6 dan treden de overeenkomsten duidelijk naar voren.

Behalve in de vorm geven de stromingspatronen aan het oppervlak van de meetvloeistof in het laboratoriummodel ook overeenkomsten te zien in de snelheidsverdeling. Er treedt een smal gebied op met relatief hoge snelheden: de zg. 'straalstroom'.

Met behulp van tijdopnamen (zie fig. 8) kan men de snelheidsverdeling aan het oppervlak zichtbaar maken. De opnamen zijn gemaakt door een met het model

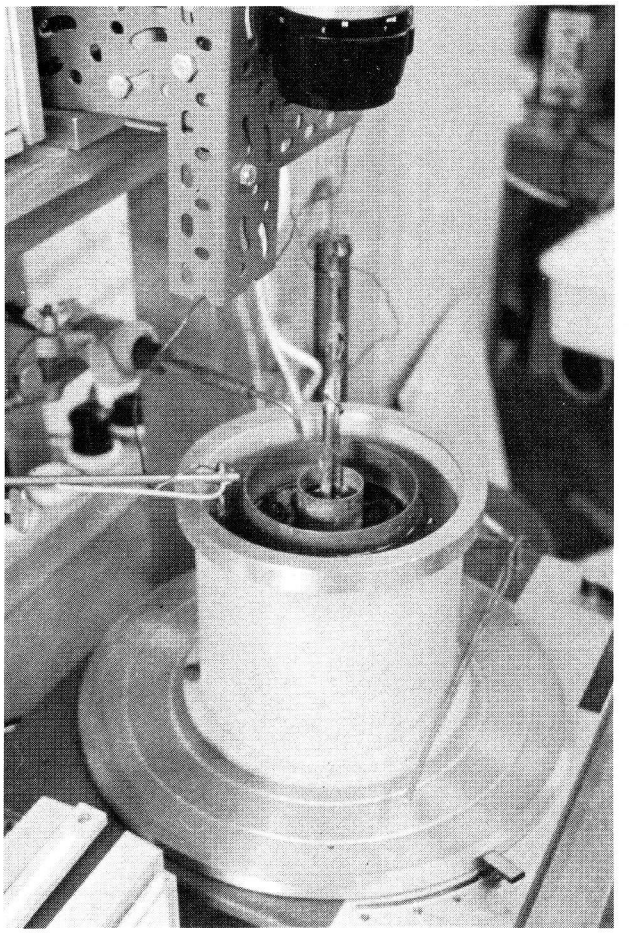


Fig. 3. De opstelling. Bij het buitenbad zijn de soldeerbout en de thermokoppelhouder zichtbaar. De buisjes van het koelcircuit monden uit in het binnenbad.

meedraaiende camera. In plaats van stipjes, zoals op de momentopnamen, ziet men de aluminiumdeeltjes, die gebruikt worden om de stroming zichtbaar te maken, als streepjes. De lengte van de streepjes geeft de weg aan, die een aluminiumdeeltje heeft afgelegd gedurende de tijd dat de film belicht werd. Lange streepjes komen dus overeen met hoge snelheden.

'Vacillations'

In sommige gevallen kan men bij stromingspatronen uit het Rossby-gebied regelmatige periodieke veranderingen van de golfvorm waarnemen. Figuur 8 geeft hiervan een voorbeeld. Men duidt dit verschijnsel aan met het Engelse woord 'vacillation'. De vacillations worden wel in verband gebracht met de variaties in de zg. zonale circulatie-index. Deze index is een maat voor de intensiteit van de algemene circulatie en de daaraan verwante natuurkundige processen (bv. warmtetransporten e.d.).

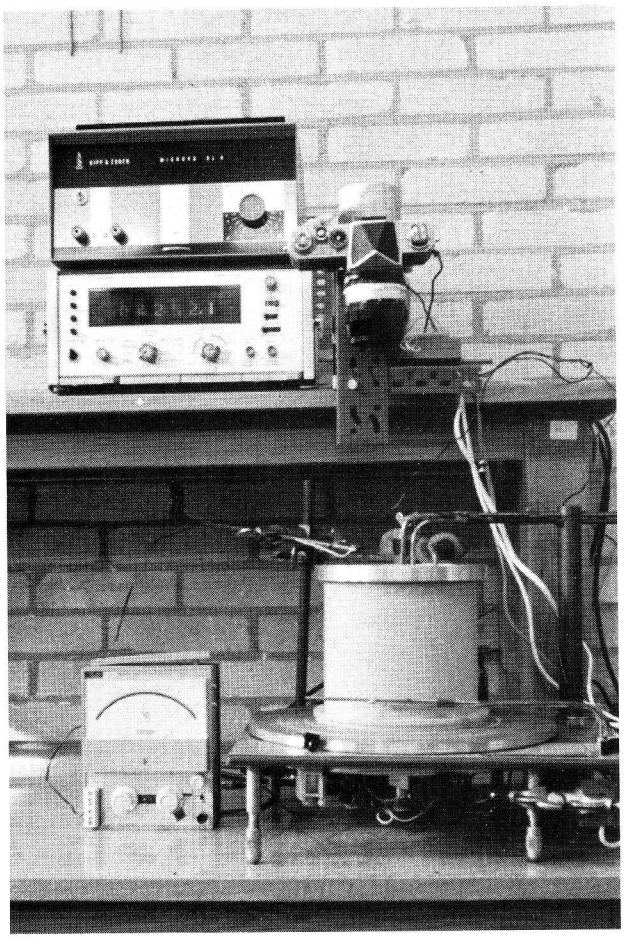


Fig. 4. De opstelling. Links van het fototoestel, waarmee momentopnamen gemaakt kunnen worden, bevinden zich de galvanometer voor het meten van het temperatuurverschil (boven) en het apparaat waarmee de omwentelingssnelheid wordt bepaald (onder). Het meetapparaat links van de pick-up geeft de temperatuur van het binnenbad.

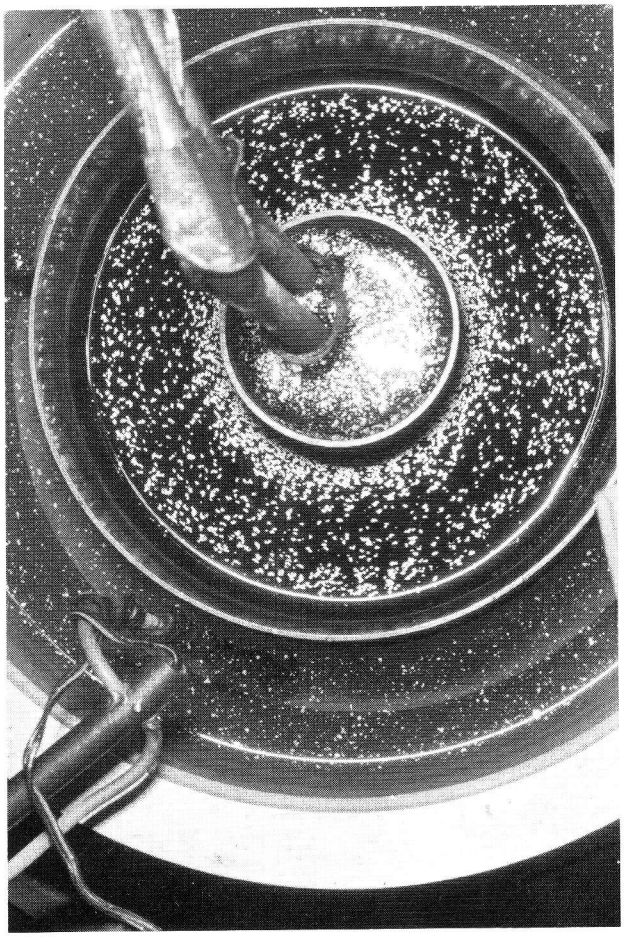


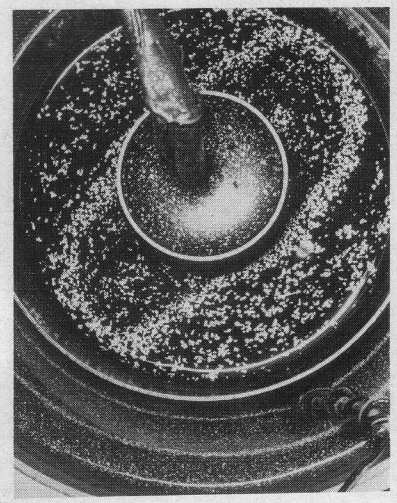
Fig. 5. Stromingspatroon Hadley-gebied.

Verschillen met de atmosfeer

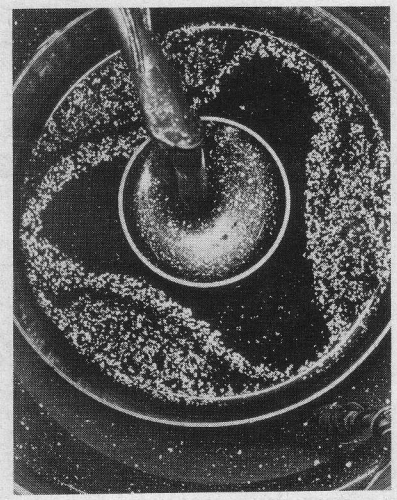
Uit het voorgaande kan men concluderen dat de processen, die in het laboratoriummodel en in de atmosfeer plaats vinden een aantal parallellen vertonen. Gewezen werd reeds op de passaatwinden en de Hadley-circulatie, de stromingspatronen van het Rossby-gebied en de in de hogere luchtlagen op gematigde breedten voorkomende golfpatronen, de straalstromen in het vloeistofmodel en in de atmosfeer en tenslotte de 'vacillations' en de variaties in de circulatieindex.

Het zou echter onjuist zijn voorbij te gaan aan de verschillen tussen model en werkelijkheid. Een aantal van deze verschillen zal nu worden genoemd.

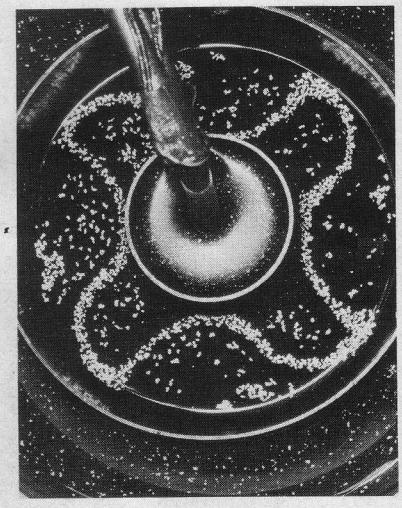
Fig. 6. Stromingspatronen Rossby-gebied



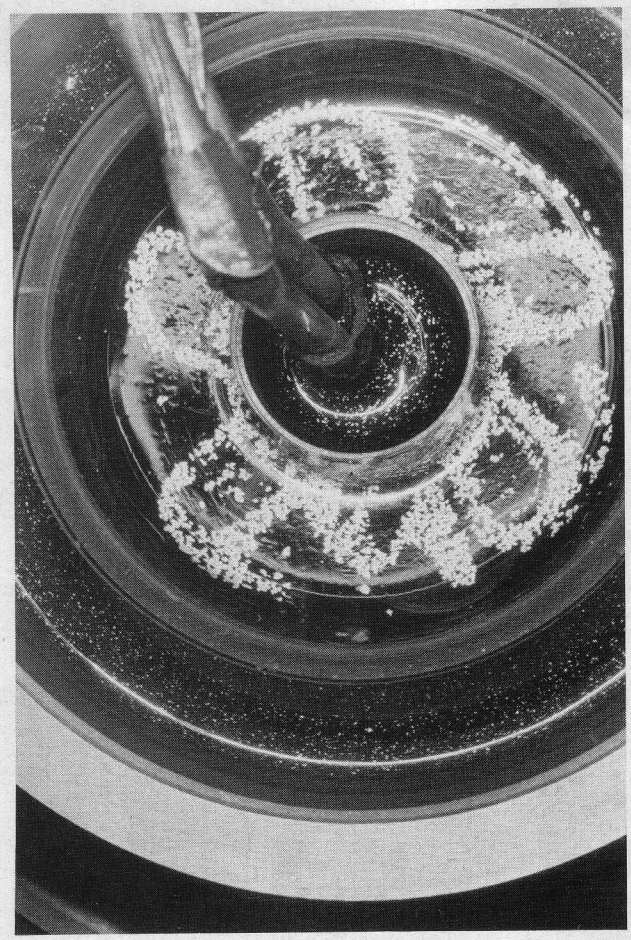
a) golfgetal 2



b) golfgetal 3



c) golfgetal 4



d) onregelmatig

Allereerst is de manier waarop de warmteafgifte en -ontvangst plaats vindt in het model anders dan in de atmosfeer. De meetvloeistof in het model wisselt warmte uit door de verticale cilinderwanden. In de atmosfeer valt de warmte juist door horizontale vlakken binnen.

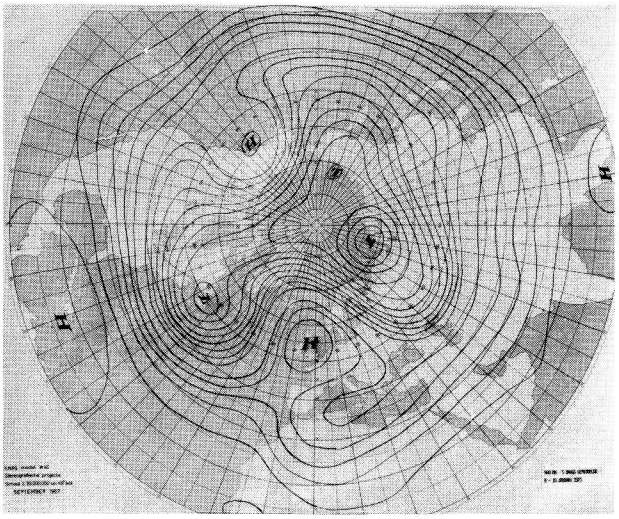
Bij de warmtehuishouding in de atmosfeer spelen ook de aanwezigheid van een ozonlaag en van waterdamp een rol. In het model ontbreken deze factoren.

Een ander verschilpunt ligt in de plaatsen waar de vloeistofstroom of de luchtstroom door wrijving wordt afgeremd. In de atmosfeer treedt wrijving op langs het aardoppervlak, in het model vooral langs de verticale wanden en in veel mindere mate langs de horizontale benedenwand.

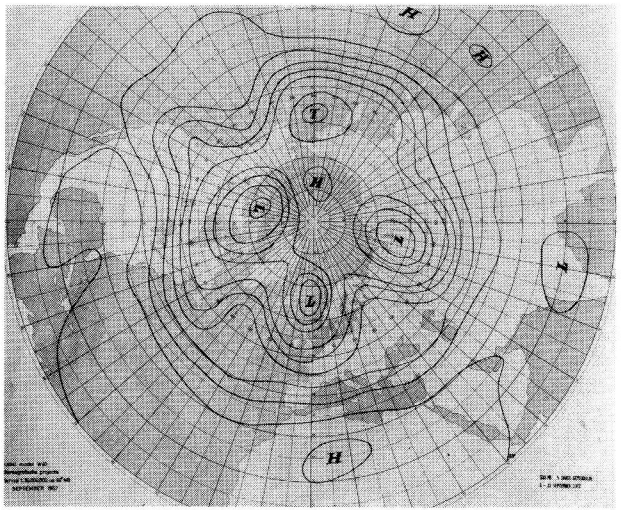
De invloed van de rotatie is in het model overal even groot; in de atmosfeer is deze maximaal aan de pool en neemt hij af met afnemende breedte.

Een laatste verschilpunt heeft betrekking op de geometrische verhoudingen in het model en die in de

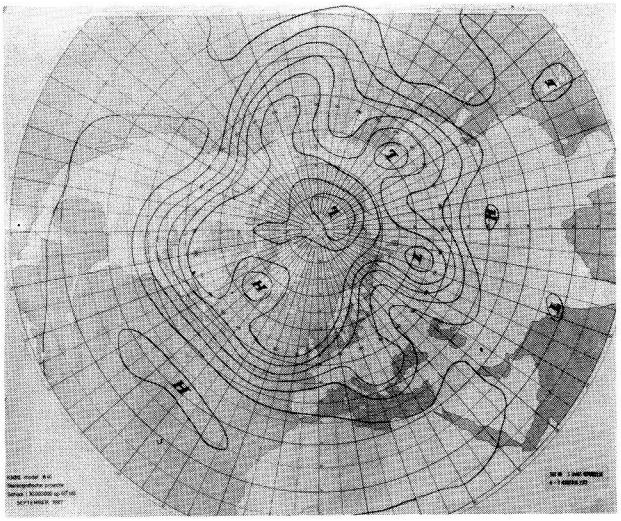
Fig. 7. Hoogtelijnen in het 500 mbar vlak, gemiddeld over 5 dagen. De luchtbewegingen vinden plaats evenwijdig aan de getrokken lijnen.



a) 6 t/m 10 januari 1973; golfgetal 3



b) 8 t/m 12 september 1972; golfgetal 4



c) 4 t/m 8 augustus 1972; golfgetal 5 à 6

atmosfeer. Bij het laboratoriummodel van fig. 3 en 4 bevindt de meetvloeistof zich tussen 2 cilinderwanden, die zich op ca. 3 cm afstand van elkaar bevinden; de diepte is ca. 10 cm. In de atmosfeer, waarbij wij dan vooral naar de troposfeer, de onderste 10 à 20 km, kijken, zijn de verticale afmetingen juist veel kleiner dan de horizontale.

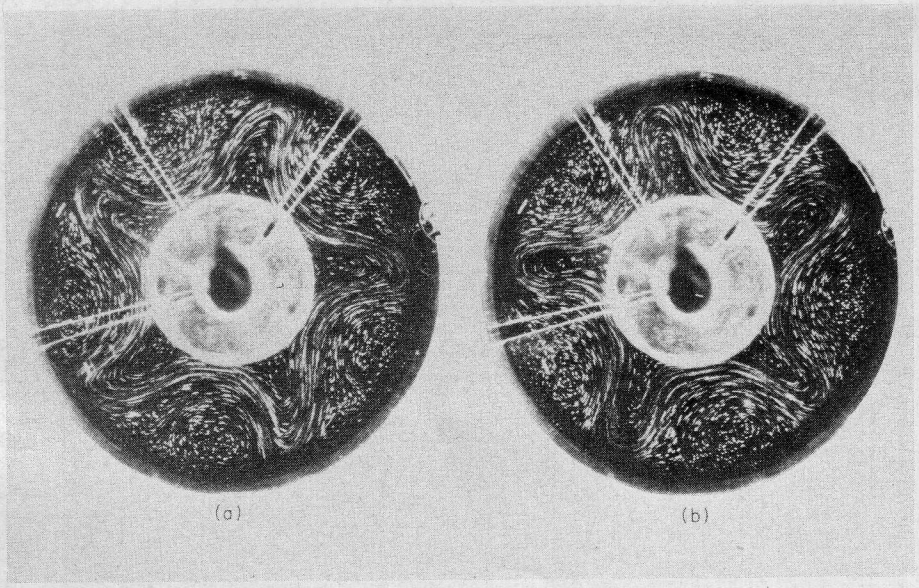
Het zou niet veel zin hebben om de verhouding tussen horizontale en verticale afmetingen in een model precies gelijk te kiezen aan die in de atmosfeer. Het vloeistoflaagje, dat in dat geval de atmosfeer voor zou stellen, zou zo dun zijn dat de oppervlaktespanning verreweg de belangrijkste rol zou spelen. In de atmosfeer zijn andere krachten veel belangrijker. De afmetingen van de laboratoriummodellen zijn zodanig, dat de verhoudingen tussen de voor de stromingsprocessen belangrijke krachten ongeveer gelijk zijn aan de verhoudingen van die krachten in de atmosfeer. Met de reeds eerder genoemde overeenkomsten maakt dit laatste punt een vergelijking tussen atmosfeer en laboratoriummodel enigszins aannnemelijk. Het blijft echter – gezien de vele verschillen – een vrij grove nabootsing, zodat men voorzichtig moet zijn met het toepassen van de resultaten van de experimenten met laboratoriummodellen op de atmosfeer.

Literatuur

Meer over dit onderwerp kan men lezen in:

D. Fultz et al.: 'Studies of thermal convection in a rotating cylinder with some implications for largescale atmospheric motions' Meteor. Monogr. Amer. Met. Soc. (1959)

R. Hide: 'Some laboratory experiments or free thermal convention in a rotating fluid subject to a horizontal temperature gradient and their relation to the theory of global atmosfpheric circulation' in: G. A. Corby 'The global circulation of the atmosphere'. Roy. Meteor. Soc. London (1969).



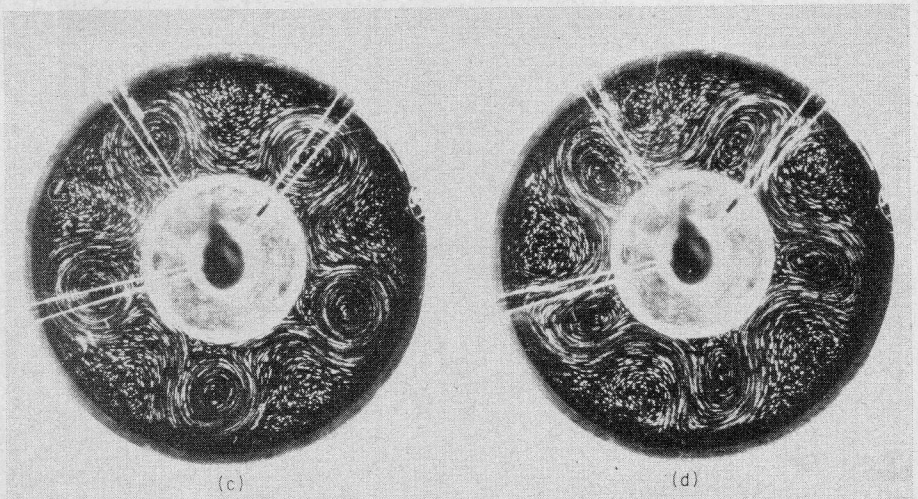


Fig. 11.8 Time exposures showing the motion of surface tracer particles in a rotating annulus. The four photographs illustrate various stages of a five-wave tilted trough vacillation cycle. The period of the vacillation cycle is 16¼ revolutions and the photographs are at intervals of four revolutions. (Photographs by Dave Fultz)

Fig. 8. Tijdopnamen van een 'Vacillation' in het Rossby-gebied bij golfgetal 5. De periode van de 'vacillation' bedraagt 16¼ omwenteling. De foto's zijn gemaakt met een tussentijd van 4 omwentelingen in de volgorde a, b, c, d.
(Foto's: D. Fultz, University of Chicago, U.S.A.)