

faraday cahier 4

Redactie: Drs. J. J. F. Steenman, De Wilgepol 13, Drachten (05120-13606)
Drs. C. A. S. Groen, Weidelaan 29, Leersum (03434-2047) voor natuurkunde
Drs. H. A. M. Verkroost, Prof. Ritzema Boslaan 69, Utrecht (030-711367) voor scheikunde.

WIND

Een model voor luchtstromingen op aarde

DRS. C. FLOOR EN DRS. W. VAN DIJK

Inhoud

1. Wind	2
2. Het temperatuurverschil tussen de evenaar en de pool	3
3. De draaiing van de aarde	3
4. De waargenomen circulatie	4
5. Moeilijkheden bij de oplossing van het circulatieprobleem	7
6. Modellen van de atmosfeer	8
7 Resultaten van het vloeistofringmodel	9
8. Zelfbouw modellen van de atmosfeer	15
9. Recente vloeistofmodellen	17

Aanhangsels

1. Rossby golven	18
2. Dimensieloze parameters	20
3. Overeenkomsten en verschillen tussen model en atmosfeer	23
4. Experimentele gegevens bij de foto's	23
5. Literatuur	24

Bijlage Faraday, oktober 1973

1. Wind

Het weer, zoals dat zich aan ons voordoet, kan zich reeds lang verheugen in een grote belangstelling. Zijn vele facetten, regen, wind, hagel, temperatuur enz. dringen zich zo sterk op aan onze waarneming, dat het een van de meest besproken onderwerpen is geworden. Helaas mag hieruit niet geconcludeerd worden dat het hier ook een van de meest begrepen verschijnselen betreft. De vragen waarom een bepaalde weersituatie zich voordoet of waarom de verdeling van de weertypen over de gehele aarde zodanig is, als door de diverse meteorologische instituten wordt waargenomen, laten zich vaak moeilijk of slechts gedeeltelijk verklaren. In dit artikel wordt nader ingegaan op een facet van het weer, nl. de wind. Aan de hand van de geregistreeerde windrichtingen en windsnelheden wordt getracht de windverdeling op aarde te verklaren. Daarbij zal blijken dat andere factoren, nl. de temperatuurverdeling op en de draaiing van de aarde, de belangrijkste rol spelen. Ter illustratie van de aangevoerde argumenteringen of om van een

dood spoor verder te komen, zal soms naar een aantal gemakkelijk uitvoerbare experimenten worden verwezen. De belangrijkste hiervan zijn de proeven met een vloeistofmodel van de atmosfeer, die met eenvoudige middelen zelf uitgevoerd kunnen worden.

Hoewel de wind in onze streken erg wisselvallig is en een groot aantal windsnelheden en alle windrichtingen in ons land gemeten kunnen worden, blijken westenwinden het veelvuldigst voor te komen. Ons land, zegt men wel, ligt in de gordel van de westelijke winden, die zich op beide halfronden tussen 30 en 60° breedte bevindt. Op lage breedten – tussen de evenaar en de subtropen – is de gemiddelde wind juist oostelijk. Op het noordelijk halfrond treffen we daar de z.g. noordoostpassaat, op het zuidelijk halfrond de zuidoostpassaat aan. In de windverdeling van fig. 1 staan naast de reeds genoemde westelijke en oostelijke winden ook de (noord-)oostelijke winden in het gebied nabij de pool aangegeven. Het optreden van de passaten op lage breedten en het overheersen van de westenwinden op gematigde breedten is al geruime tijd bekend. In

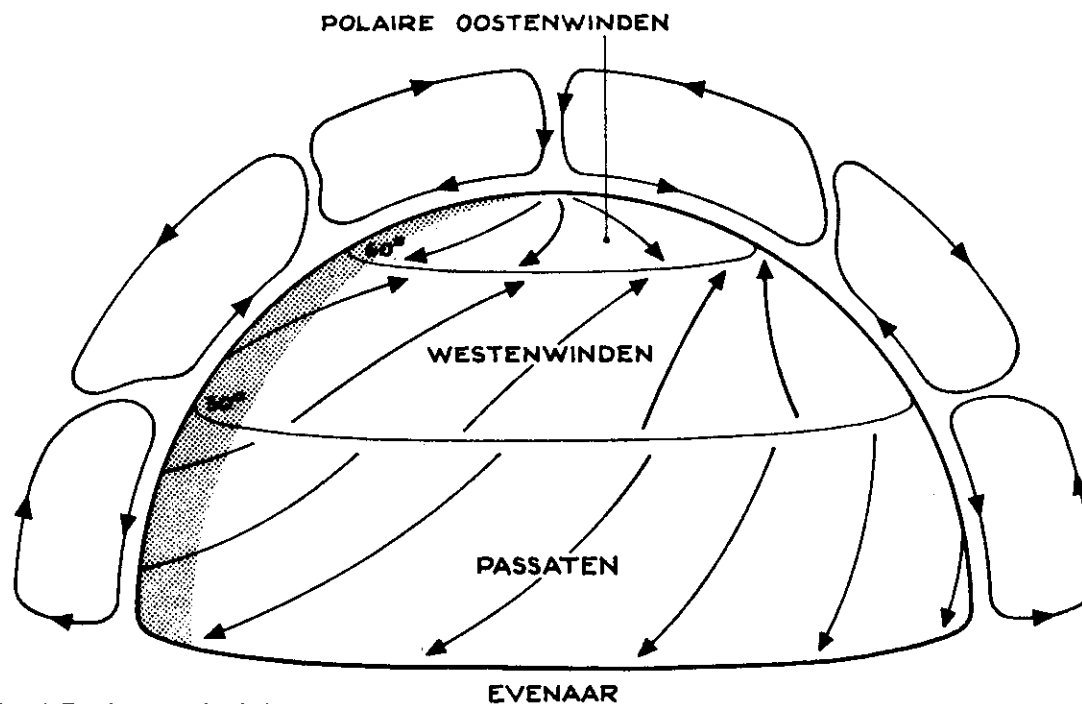


Fig. 1 De algemene circulatie.

de loop der tijden zijn dan ook al heel wat verklaringen voor het optreden van de winden opgedoken.

Meestal vervulde het temperatuurverschil tussen de evenaar en de pool en/of de draaiing van de aarde hierin een belangrijke rol. Daar de huidige verklaringen ook steeds van deze factoren uitgaan, zullen we ze eerst nader onder de loep nemen.

2. Het temperatuurverschil tussen de evenaar en de pool

Om na te gaan wat de gevolgen zouden zijn van het temperatuurverschil dat zich op de aarde heeft ingesteld, beschouwen we het experiment van fig. 2. De gasvlam verwarmt het rechtergedeelte van de bak met water, waardoor de temperatuur rechts onderin hoger is dan elders in de bak. Het warme water stijgt omhoog; kouder water, met een relatief grotere dichtheid schuift onder het warme water en er ontstaat een stroming.

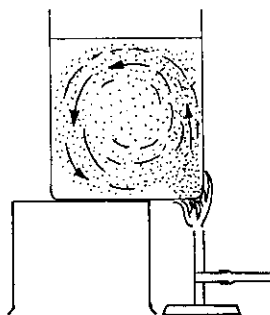


Fig. 2 Stroming in vloeistoffen door verwarming.

In de praktijk blijkt lucht eenzelfde gedrag te vertonen, omdat bij lucht de dichtheid op eenzelfde wijze van de temperatuur afhangt als bij water (warmer dan 4 °C). Denk hierbij b.v. aan de opstijgende warme lucht boven een kachel.

Wanneer we dit doortrekken naar de atmosfeer, dan zouden we de volgende situatie verwachten:

Aan de evenaar stijgende lucht; aan de pool dalende lucht (zie fig. 3). Aan de grond zou de

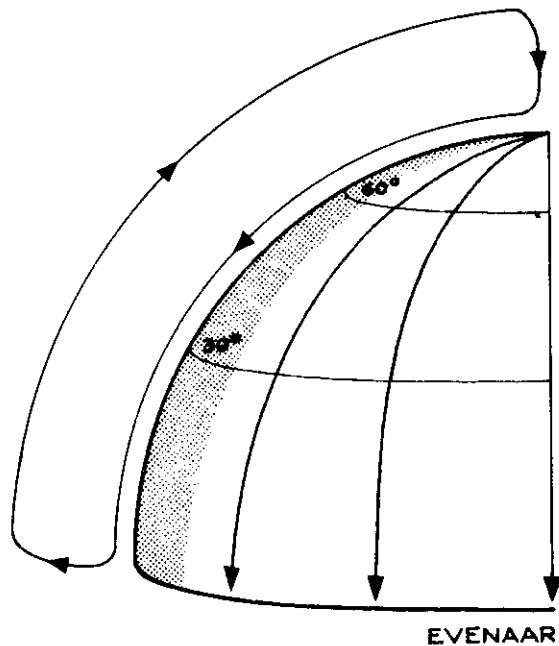


Fig. 3 De circulatie op een niet-draaiende aarde.

lucht rechtstreeks van de pool naar de evenaar moeten waaien; in de hogere luchtlagen zou de beweging juist andersom zijn. In dat geval zouden op het N.H. aan de grond alleen noordenwinden gemeten mogen worden. Uit onze dagelijkse ervaring weten we dat dit niet het geval is. We zullen daarom eens nagaan wat er verandert, indien we in onze beschouwingen de draaiing van de aarde gaan betrekken.

3. De draaiing van de aarde

Zoals bekend draait de aarde in 24 uur eenmaal om zijn eigen as. Men kan dit laten zien met de slingerproef van Foucault. Hierbij hangt men een groot gewicht aan een lang touw. Het gewicht laat men vrij slingeren in een vlak door de normaal op het aardoppervlak. Het vlak waarin de slingeren uitgevoerd worden draait aan de pool in 24 uur (of op een willekeurige breedte \varnothing in $24/\sin \varnothing$ uur) rond. De draaiing van de aarde oefent als het ware een extra kracht uit op de bewegende slinger. Deze schijnkracht staat loodrecht op de bewegingsrichting van de slinger en bewerkstelligt zo een langzame draaiing

van het vlak, waarin de slingering plaatsvindt. Men noemt deze afwijkende kracht ten gevolge van de aardrotatie gewoonlijk de corioliskracht naar de 19e eeuwse franse wiskundige G. G. de Coriolis, die hem voor het eerst beschreef.

Deze kracht beïnvloedt de baan van luchthoeveelheden, die zich verplaatsen t.g.v. het temperatuurverschil tussen pool en evenaar. De optredende afwijking kan men zich als volgt voorstellen. De luchtmassa's voeren een rechtlijnige beweging uit, terwijl de aarde, met daaraan vast het coördinatensysteem waarin we de bewegingen bekijken, er onderdoor draait. Met behulp van de hierna beschreven opstelling kan het effect van de corioliskracht zichtbaar gemaakt worden. Boven de draaitafel van een pick-up stellen we vast een lineaal op, zodanig dat er langs die lineaal lijnen door het middelpunt getrokken kunnen worden.

Bewegen we de draaitafel langzaam tegen de wijzers van de klok in terwijl we een lijn trekken van de pool (het middelpunt) naar de evenaar (de rand) dan krijgen we een patroon als aangegeven in fig. 4 (blz. 13). Omdat we nu de draai-

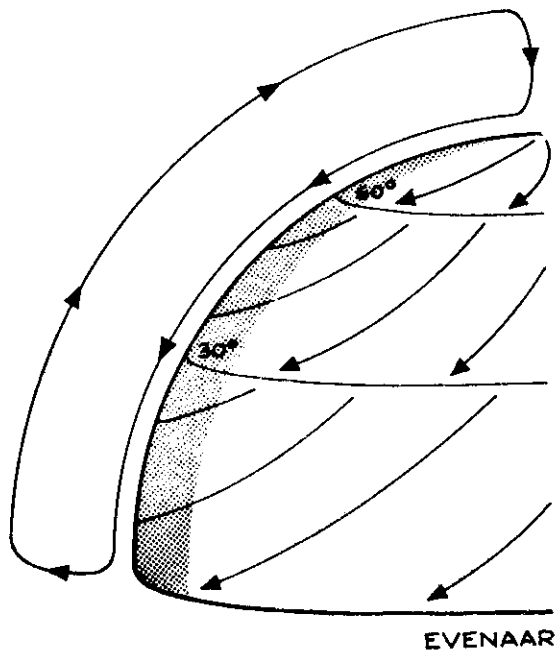


Fig. 6 Deze eencellige circulatie wordt op aarde niet waargenomen.

tafel tegen de wijzers van de klok in hebben laten draaien, zou de situatie overeen moeten komen met die op het noordelijk halfrond (N.H.), d.w.z. op het N.H. treedt een afwijking naar rechts op. We zouden dus i.p.v. noordenwinden, noordoostenwinden moeten krijgen (fig. 6). Het is duidelijk dat dit beeld voor het N.H. als geheel niet opgaat. We herinneren ons immers de gordel met westenwinden (fig. 1), die op deze manier onverklaarbaar is. Wanneer we het in fig. 4 gevonden patroon op gematigde breedten onderbreken (fig. 5, blz. 13), dan vertoont het overblijvende patroon wel overeenkomst met de werkelijke situatie op aarde. Met name voor de passaatwinden zou men kunnen zeggen dat het model toegepast mag worden (zie fig. 1). We hebben dan een temperatuurverschil tussen de subtropen en de tropen, dat onder invloed van de corioliskracht aanleiding geeft tot een – op het N.H. – noordoostelijke luchtbeweging: De noordoostpassaat.

Ook in de buurt van de pool gaat het model op, zodat er a.h.w. 2 cellen zijn, die vanuit de voorgaande theorie begrepen kunnen worden (zie fig. 1). De tussenliggende derde cel gedraagt zich anders dan we tot nu toe zouden verwachten.

4. De waargenomen circulatie

Hoewel er bij de 3-cellen circulatie ook op dit moment door onderzoekers nog veel vraagtekens geplaatst worden (vooral de middelste cel levert veel problemen) kunnen we wel stellen dat de eencellige circulatie op aarde kennelijk onmogelijk, althans niet verwezenlijkt is. We zullen nu in dit verband een viertal punten noemen, waarmee men kan inzien dat de zaak ingewikkelder wordt dan boven beschreven.

- Allereerst zouden de oostenwinden, die bij een eencellige circulatie op elke breedte aan het aardoppervlak optreden, door wrijving bij het aardoppervlak de draaisnelheid van de aarde duurzaam moeten verminderen. In werkelijkheid is deze draaisnelheid nagenoeg constant, zodat de som van de krachtmomenten, die de winden op de aarde uitoefenen, nul moet zijn.
- Daarnaast is bij de voorgaande beschouwingen

de aarde voorgesteld als een gladde bol met symmetrie t.o.v. de as. In werkelijkheid is er een verdeling van oceanen en continenten, die storend kan werken op het patroon van één cel door verschillen langs één breedtecirkel in temperatuur of wrijving.

- Een derde punt heeft te maken met de warmteprocessen, die zich in de atmosfeer afspelen. Lucht, die opstijgt aan de evenaar, om vervolgens op grote hoogte in de richting van de pool te stromen, koelt daarbij door uitstraling naar de wereldruimte zo sterk af, dat bij een breedte van 30° al dalende luchtbewegingen zouden optreden.
- Tenslotte moeten we rekening houden met de wet van behoud van impulsmoment, die voor de luchtmassa's moet gelden. Deze wet stelt, dat als er geen krachtmomenten op een lichaam werken, het impulsmoment van dat lichaam constant moet blijven.

Met het experiment van fig. 7. kan men dit aantonen.

De wet van behoud van impulsmoment geldt ook voor luchthoeveelheden, die zich over het aardoppervlak in noordelijke of zuidelijke richting begeven. Beschouw hiervoor een hoeveelheid lucht rond de evenaar die zich ten opzichte van de aarde in rust bevindt. In werkelijkheid draait deze luchthoeveelheid evenals de aarde met een hoeksnelheid Ω rond de draaiingsas van de aarde, zodat de lucht een snelheid ΩR bezit ($R =$ straal van de aarde). Stel dat de hoeveelheid lucht zich verplaatst naar een breedte $\varphi = 60^\circ$. Met behulp van fig. 8 kan men dan laten zien dat de afstand tot de rotatieas dan verminderd is tot $\frac{1}{2}R$,

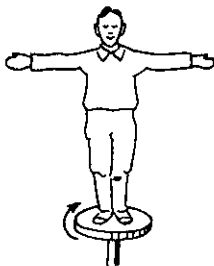


Fig. 7 Man op draaiende schijf.

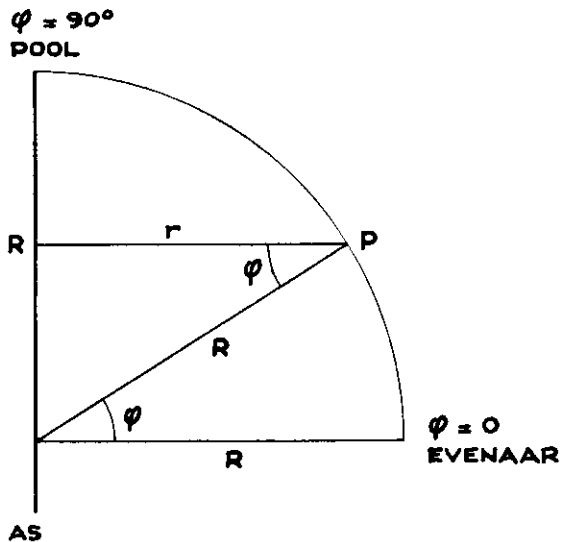


Fig. 8 De afstand r van een punt P op breedte φ op het aardoppervlak tot de draaiingsas van de aarde is $R\cos\varphi$.

zodat de snelheid zal verdubbelen tot $2\Omega R$ volgens de wet van behoud van impulsmoment. De snelheid van het aardoppervlak is op 60° breedte $\Omega r = \Omega (R\cos\varphi) = \frac{1}{2}\Omega R$ zodat de lucht een snelheid t.o.v. het aardoppervlak krijgt van $2\Omega R - \frac{1}{2}\Omega R = \frac{3}{2}\Omega R$ in oostelijke richting (vgl. fig. 9). Evenzo krijgen luchtdeeltjes, die zich van de noordpool naar het zuiden begeven een snelheid in westelijke richting. In dit laatste geval kunnen we echter verwachten dat het effect kleiner zal zijn, omdat deze luchtbeweging vlak langs het aardoppervlak plaats moet vinden, zodat wrijving een rol gaat spelen.

In werkelijkheid vinden we op gematigde breedten in de hogere luchtlagen wel westelijke winden, zij het niet zo sterk als bovenstaande berekening zou doen verwachten. De oostenwinden, die op de grond zouden moeten voorkomen worden in het geheel niet gevonden: Hier is immers de gordel van westelijke winden, waarvan het bestaan reeds geruime tijd bekend was. Kennelijk moeten in een dergelijke verklaring de hogere luchtlagen op gematigde breedten iets van hun snelheid overdragen aan de luchtlagen bij het aardoppervlak. We gaan daar nu niet verder op in, maar volstaan met te conclu-

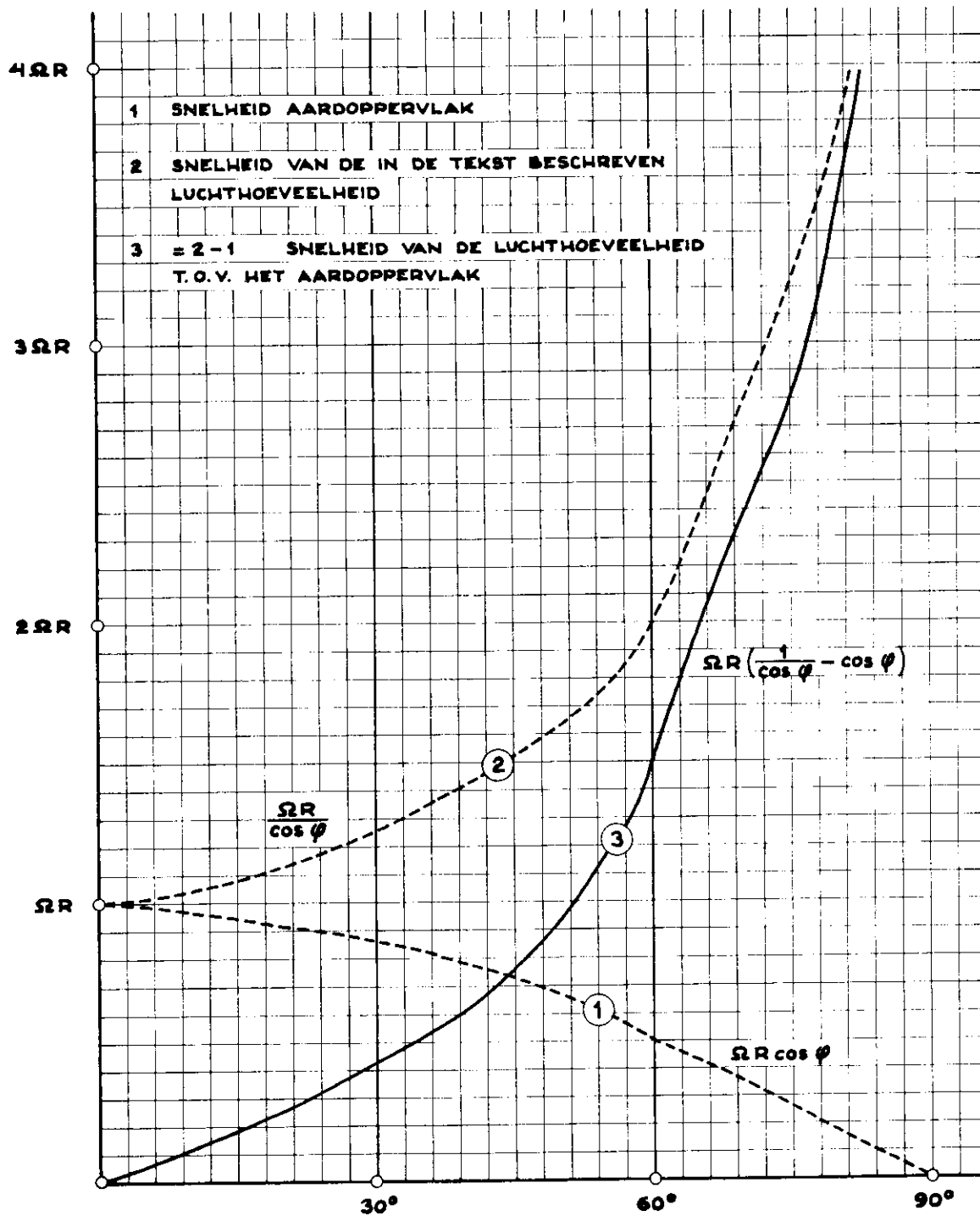


Fig. 9 De snelheid van de in de tekst beschreven luchthoeveelheid t.o.v. het aardoppervlak als functie van de breedte.

deren dat de circulatie, zoals die door ons geme- ten kan worden een driecellige circulatie is en dat een groot aantal factoren een rol blijkt te spelen.

5. Moeilijkheden bij de oplossing van het circula- tieprobleem

Het grote aantal variabelen is niet de enige factor die een verklaring van de algemene circula- tie in de weg staat. Een tweede probleem wordt gevormd door de geringe beschikbaarheid van meetgegevens. Over waarnemingen aan de grond beschikken we in bevolkte gebieden nog wel, maar elders en op zee is het aantal beschikbare waarnemingen vaak zeer gering. Een en ander geldt in nog sterkere mate voor de waarnemingen in de hogere luchtlagen. Fig. 10 en 11 laten zien dat de situatie op het zuidelijk halfrond verreweg het ongunstigst is. Het opnemen, inrichten en bemannen van waarnemingsstations is een kost- bare zaak, voor vele landen zelfs een niet te ver- oorloven luxe. De onderzoekers van de algemene circulatie zullen zich dus nog wel enige tijd met een bescheiden hoeveelheid gegevens moeten

behelpen bij hun speurtocht naar de verklaring van de gevonden luchtbewegingen, zij het dat een lichtpunt wordt gevormd door kortlopende wereldomvattende projecten, die zo nu en dan worden opgezet. Een voorbeeld hiervan is het GARP (Global Atmospheric Research Program) project, dat in 1977 zal worden gerealiseerd.

Een derde factor die een oplossing van het circulatieprobleem bemoeilijkt is de grote schaal waarop de processen zich afspelen. Hierdoor is het niet mogelijk in de atmosfeer een experiment op te zetten, waarbij dan slechts één veranderlijke tegelijk gevarieerd wordt en men zich kan werpen op de gevolgen die dat met zich meebrengt. In de meteorologie moet men zich tevreden stellen met de variaties die de natuur verschaft. Helaas zijn deze zelden zodanig, dat ze ons in staat stellen duidelijk verbanden aan te brengen tussen oor- zaken en gevolgen. Op verschillende manieren kan er getracht worden met deze handicaps te leren leven. Men kan zijn toevlucht nemen tot zuiver theoretische beschouwingen. Of men kan met behulp van computers allerlei situaties door- rekenen en dit 'numerieke model' van de atmos-

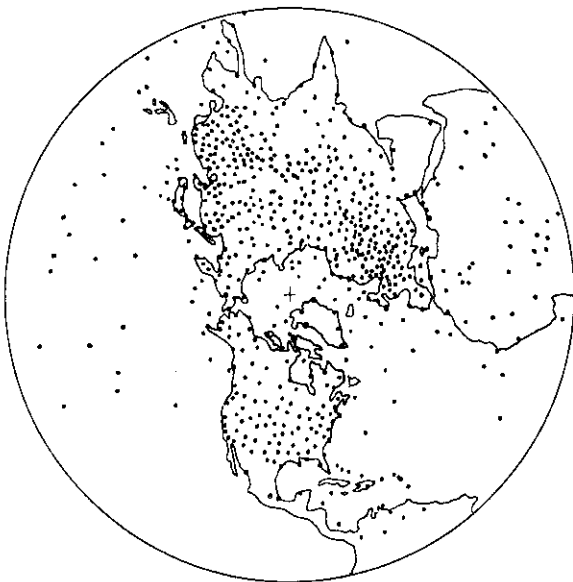


Fig. 10 De stations op het noordelijk halfrond van waar- uit op vaste, gelijke tijden ($2\times$ per dag) waarne- mingen van meteorologische grootheden wor- den verricht als functie van de hoogte.

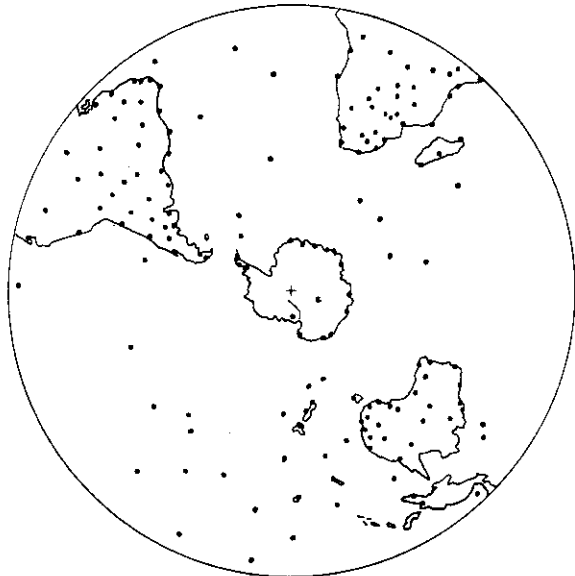


Fig. 11 De stations op het zuidelijk halfrond van waaruit op vaste, gelijke tijden ($2\times$ per dag) waarne- mingen van meteorologische grootheden worden verricht als functie van de hoogte.

feer vergelijken met op aarde waargenomen situaties. In dit artikel zal hiet niet verder op ingegaan worden. Wel komt een derde mogelijkheid aan de orde: Het te hulp roepen van een laboratoriummodel van de atmosfeer. Met dergelijke modellen tracht men de processen die zich op grote schaal afspelen in het klein na te bootsen, waarbij het dan wel mogelijk is sommige grootheden te variëren en andere constant te houden. Wij zullen in het nu volgende het model beschrijven dat thans het meest gebruikt wordt om de atmosfeer na te bootsen en enige aanwijzingen geven om een dergelijk model op een eenvoudige manier zelf te maken.

6. Modellen van de atmosfeer

In het voorgaande zagen wij, dat het temperatuurverschil op, en de draaiing van de aarde belangrijke factoren zijn bij de verklaring van de windverdeling, die op aarde wordt aangetroffen. Een model van de atmosfeer zal dus moeten kunnen draaien, terwijl het ook mogelijk moet zijn om in de imitatie atmosfeer een temperatuurverschil aan te leggen. Het oudste model dat aan deze eisen voldoet is dat van Vettin uit 1884 (fig. 12). Het bestond uit een draaiende, met lucht gevulde cilinder met een doorsnede van 30 cm en een diepte van 5 cm. In het midden bevond zich een hoeveelheid ijs, de pool. De rand van de bak was op kamertemperatuur en stelde de evenaar voor. De resulterende luchtbeweging toonde veel overeenkomst met de eencellige circulatie uit § 3.

De huidige belangstelling voor vloeistofmodellen van de atmosfeer dateert van kort na de 2e wereldoorlog. Bij deze modellen wordt niet

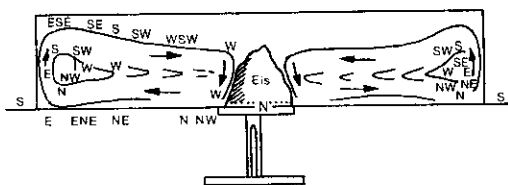


Fig. 12 Model van de atmosfeer van Vettin (1884) met eencellige circulatie.

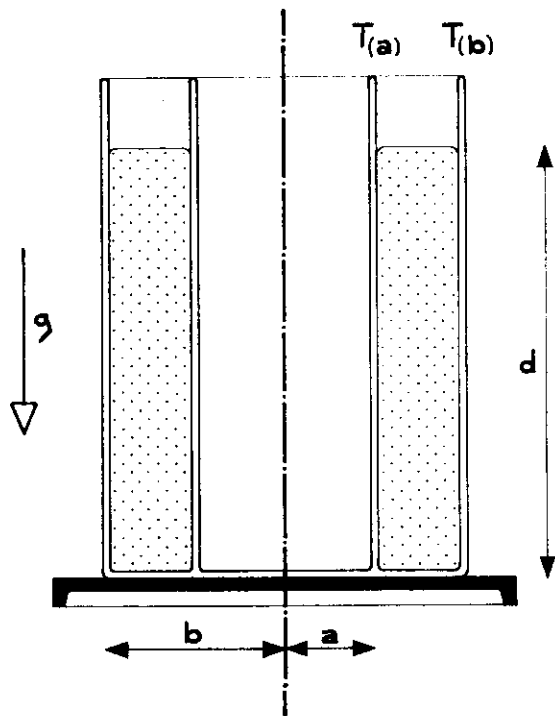


Fig. 13 Het vloeistofringmodel bestaat uit twee concentrische cilinders, waartussen zich de meetvloeistof bevindt (gestippeld). Het geheel is draaiend opgesteld. Voor symbolen zie aanhangsel 2.

meer met lucht gewerkt, maar wordt de atmosfeer voorgesteld door een vloeistof, meestal water (In § 2 hebben we reeds iets dergelijks gezien: de resultaten van de proef van fig. 2, waarin met water wordt gewerkt, werden daar ook gebruikt om meer inzicht te krijgen in het ontstaan van luchtbewegingen). Aanvankelijk werd veel gewerkt met cilindervormige modellen die leken op het apparaat van Vettin. Daarnaast werden ook wel eens bewegingen bestudeerd die optraden in een waterlaag tussen twee halve bollen.

Sinds 1953 wordt er voornamelijk gewerkt met het vloeistofringmodel van de engelsman Hide. Het was oorspronkelijk bedoeld voor onderzoek van de vloeistofstromingen in de vloeibare buitenkern van de aarde. De resultaten bleken al spoedig ook zinvol voor de meteorologie. Fig. 13 geeft een schets van het vloeistofringmodel. Het bestaat uit twee concentrische cilinders, waar-

tussen zich de meetvloeistof bevindt, die de atmosfeer moet voorstellen. De binnenste cilinderwand wordt op een lagere temperatuur gehouden dan de buitenste. De cilinderwanden kunnen beschouwd worden als breedtecirkels (fig. 14). De koude wand ligt dicht bij de pool, de warme dicht bij de evenaar. Door de wanden op een bepaalde temperatuur in te stellen, bepaalt men als het ware tevens de bij de cilinderwand behorende breedte. Stelt men nu het geheel draaiend op, dan is het vloeistofmodel gereed.

Een voordeel van het vloeistofringmodel is, dat men betrekkelijk gemakkelijk een eenvoudig meetbaar temperatuurverschil kan instellen. De invloed van de temperatuurgradient kan zo beter onderzocht worden dan bij andere modellen. Daarnaast blijken er soms golfpatronen te ontstaan (zie § 7), die meer regelmaat vertonen dan de patronen die bij de andere modellen zijn waar te nemen. Zij kunnen daardoor na onderzoek eerder als basis dienen voor een verklaring van de algemene circulatie dan de ongestructureerde chaotische beelden, die de waarnemingen bij andere typen opleverden. Bovendien zijn de resultaten bij het vloeistofringmodel min of meer reproduceerbaar (d.w.z. dat men, als men een experiment later nog eens herhaalt, meestal

hetzelfde waarneemt als de eerste keer). Door deze voordelen van het vloeistofringmodel boven andere modellen van de atmosfeer heeft het thans algemene ingang gevonden en is het het enige type dat op dit ogenblik voor modelproeven van de atmosfeer wordt gebruikt.

7. Resultaten van het vloeistofringmodel

De experimenten die met de vloeistofmodellen verricht zijn laten zien dat er verschillende stromingspatronen mogelijk zijn. De oplossing van het circulatieprobleem, waarbij één cel optreedt tussen pool en evenaar, of – in dit model – tussen de binnenste en de buitenste cilinderwand, is dus niet de enig mogelijke. Het eencellig stromingspatroon noemt men rotatie-symmetrisch, omdat de vorm van het patroon en daardoor de dichtheidsverdeling aan het bovenoppervlak van de vloeistof alleen maar van de afstand tot de draaias afhangt (fig. 15, zie blz. 13). Het symmetrische patroon treedt op bij kleine draaisnelheden. Daarnaast wordt het ook gevonden bij grotere draaisnelheden wanneer het temperatuurverschil zeer klein (het z.g. onderste symmetrische gebied) of zeer groot (bovenste symmetrische gebied) is.

Een ander stromingspatroon dat wordt gevonden is dat van de stationaire golven (fig. 16–19, zie blz. 13). Er is geen symmetrie t.o.v. de draaias, maar er is wel duidelijk een regelmaat te onderkennen.

We zien de sterkste stroming met de grootste (deeltjes-)dichtheid optreden in de vorm van een golf met twee of meer lobben. Dergelijke patronen tonen grote verwantschap met patronen op kaarten die voor een druk van 500 mb de gemiddelde hoogteverdeling over 5 dagen geven (zie fig. 20, 21, blz. 14). Dergelijke golven, zoals die op de weerkaarten voorkomen, noemt men in de meteorologie Rossby golven (zie aanhangsel 1) naar de bekende meteoroloog C. G. Rossby die als eerste de algemene circulatie beschreef met behulp van dergelijke golven. De Rossby golven hebben meestal een snelheid t.o.v. het aardoppervlak, die zowel westwaarts als oostwaarts gericht kan zijn. De vergelijkbare golven in de vloeistof-

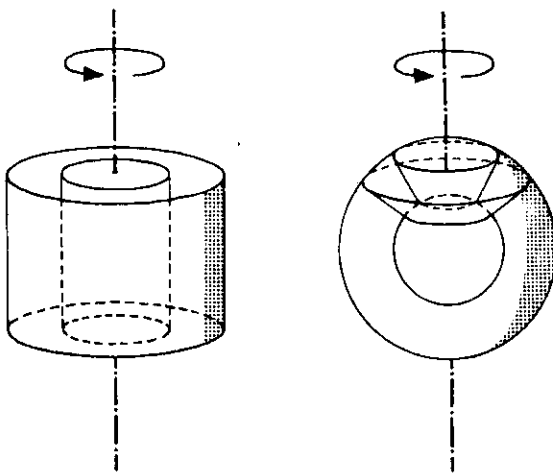


Fig. 14 Vergelijking tussen het vloeistofringmodel en de atmosfeer. De oppervlakken van de cilinders komen overeen met verticale vlakken langs een meridiaan.