

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

Verslag van het "Symposium on research and development aspects
of long-range forecasting", Boulder, Col., 29 juni-4 juli 1964

door

drs. C.J.E. Schuurmans

(tevens verslag van een intern colloquium,
gehouden op 13 oktober 1964)

De Bilt, januari 1965

Verslag van het "Symposium on research and development aspects
of long-range forecasting", Boulder, Col., 29 juni-4 juli 1964

door drs. C.J.E. Schuurmans.

(tevens verslag van een intern colloquium,
gehouden op 13 oktober 1964)

Genoemd symposium, georganiseerd onder auspiciën van WMO en IUGG, werd gehouden in Boulder, Col. in de gebouwen van de University of Colorado en het National Center for Atmospheric Research, van 29 juni t/m 4 juli 1964.

Verslaggever woonde dit symposium bij en bracht tevens een 5-daags bezoek aan de Extended Forecasting Branch van het United States Weather Bureau te Washington D.C.

Aan het Boulder-Symposium werd door een 50-tal mensen deelgenomen; er werden 26 voordrachten (met discussie) gehouden, terwijl in een slotbijeenkomst een overzicht werd gegeven van de huidige stand inzake verwachtingen op lange termijn en tevens werd getracht tot richtlijnen te komen voor verder onderzoek op dit terrein.

Een zinvolle indeling van het besprokene kan als volgt worden gegeven:

- I. Algemene voordrachten t.a.v. verwachtingen op lange termijn.
- II. Voordrachten handelend over de praktijk van het voorspellen op lange termijn.
- III. Theoretische en empirische bijdragen tot het oplossen van het voorspelprobleem.

I. Algemeen

R. White (chief USWB) bracht het belang van betere en uitgebreidere waarnemingen ter sprake. In vele opzichten was men het met hem eens, vooral waar het de waarnemingen in tropische gebieden betreft. Overigens bestreed men zijn stelling, dat voor het uitvoeren van numerieke modelexperimenten voor lange termijnverwachtingen de huidige waarnemingen onvoldoende zouden zijn. Mogelijk wel de oceanografische waarnemingen, echter niet de waarnemingen in de atmosfeer.

Op de principiële mogelijkheid of onmogelijkheid van voorspellingen op lange termijn, voornamelijk op grond van ideeën van Schmauss en Baur, werd kort ingegaan door H. Flohn (W. Dld). Dit probleem werd later nog naar

voren gebracht door E. Lorenz (USA) onder de formulering: "Bestaat de mogelijkheid dat de lang-periodische fluctuaties van de gemiddelde toestand van de algemene circulatie simpelweg de te verwachten variaties zijn van opeenvolgende "samples" van een systeem, dat aan kort-periodische fluctuaties onderhevig is?" Een antwoord hierop kwam van J. Sawyer (Eng.), die wees op het werk van zijn landgenoot Craddock, die zou hebben aangetoond dat de lang-periodische fluctuaties groter zijn (in tijd en ruimte) dan men op grond van toevalligheden in "samples" met kort-periodische fluctuaties zou mogen verwachten, mits deze kort-periodische fluctuaties "random" zijn.

M. Blanc (USA) deed in een uitvoerig gedocumenteerd verslag mededeling van de behoeften en vereisten van de landbouw aangaande verwachtingen op lange termijn. Gezien de huidige stand van de verwachtingstechniek maakte het geheel echter een inadequate en voorbarige indruk.

II. De praktijk

In de in 1962 verschenen WMO Technical Note No. 48 waarin "The present status of long-range forecasting in the world" wordt weergegeven, heeft men onderscheid gemaakt tussen de volgende verwachtingstechnieken:

1. Numerieke methoden
2. Extrapolatie-methoden
3. Analoge gevallen
4. Statistische methoden
5. Singulariteiten e.d.

Aan de hand van deze indeling zullen de in Boulder gedane mededelingen nu kort worden beschreven.

ad 1. De numeriek-fysische methoden zijn ook thans nog het experimentele stadium niet te boven gekomen. Sommige der uitgevoerde experimenten zijn overigens wel hoopgevend. Zij zullen later bij de theoretische bijdragen besproken worden.

ad 2. Extrapolatie-methoden vinden het zuiverst toepassing in de 30-daagse verwachtingen van het Unites States Weather Bureau. De basisgedachten en uitvoering van de methoden zijn vastgelegd in: J. Namias "Thirty-Day Forecasting, a review of a ten-year experiment", Met. Monogr., Vol. 2, no. 6, 1953.

J. Namias deelde in Boulder mee, dat aan de grondslagen van zijn verwachtingstechniek sinds 1953 eigenlijk niets is veranderd. Het streven is erop gericht een prognostische 700 mb hoogtekaart voor de voorspeltermijn te

vervaardigen. Uit dit hoogtestromingspatroon wordt dan het gemiddelde weer (gem. maandtemperatuur en totale hoeveelheid neerslag) afgeleid. Zoals door verslaggever tijdens zijn bezoek aan het USWB kon worden vastgesteld, neigt men bij het vervaardigen van de prognostische 700 mb-kaart alsook bij de bewerking en vertaling daarvan, naar grotere objectivering en automatisering. Het verkregen resultaat wordt echter achteraf subjectief gemodificeerd o.a. aan de hand van ervaring en ter beschikking staande klimatologische waarschijnlijkheden.

Een van de voordelen van Namias' voorspelmethode is dat iedere vooruitgang op het gebied van de numerieke voorspellingen op korte termijn onmiddellijk ook de 30-daagse verwachting ten goede komt. In de afgelopen jaren heeft dit inderdaad geleid tot een verbetering van het trefferpercentage, althans voor het gebied van de Verenigde Staten. Voor andere gebieden van het Noordelijk Halfrond (de USWB 30-daagse verwachtingen zijn hemisferisch), in zoverre geverifieerd, zijn de resultaten ook thans nog weinig beter dan die van zuiver persistentieverwachtingen.

W. Klein (een van Namias' medewerkers) heeft zich verscheidene jaren intensief beziggehouden met het afleiden van een objectief verband tussen de 700 mb hoogtestroming en de temperatuur, neerslag en druk aan de grond. De gebruikte procedure is zuiver statistisch en in de literatuur bekend onder de naam "screening method". De voorspelde 700 mb-hoogten in een groot aantal roosterpunten worden beschouwd als predictors van de temperatuur, neerslag of gronddruk op een bepaalde plaats (predictand). Aan de gevraagde lineaire regressievergelijking worden de volgende beperkingen opgelegd:

1. zij mag ten hoogste 6 termen bevatten.
2. de bijdrage van iedere term aan de meervoudige correlatie-coëfficiënt moet minstens 2,5% zijn.

Deze methode, zowel bij 5-daagse als 30-daagse verwachtingen toegepast, geeft gunstige resultaten.

Men verwacht echter een teruglopen van het trefferpercentage bij steeds verdere toepassing op onafhankelijke gegevens, De regressievergelijkingen, gebaseerd op materiaal van 15 jaar, wil men dan ook om de 5 jaar opnieuw berekenen in de hoop dat inachtneming van de jongste gegevens een zekere stabiliteit aan de resultaten zal verlenen.

Onnodig te vermelden, dat voor het uitvoeren van deze berekeningen het beschikken over een rekenmachine met grote capaciteit een eerste vereiste is.

Extrapolatiemethoden vinden ook toepassing in Japan (K. Takahashi) waar de gemiddelde 500 mb-stroming wordt voorspeld voor een gebied rond het Verre Oosten. Bij de seizoensvoorspellingen, welke ook op deze basis worden uitgevoerd, maakt men tevens nog gebruik van singulariteiten en persistenties. Zowel maand- als seizoenverwachtingen schijnen op routinebasis te worden uitgegeven. Over verificatie werd echter met een enkel woord gerept.

ad 3. Verwachtingen opgesteld met behulp van analoge gevallen worden o.a. in Engeland uitgegeven. In Boulder werd hierover niet gesproken.

Overigens wordt door de Engelsen (Craddock) ook om de 2 weken een discussie gepubliceerd omtrent de te verwachten ontwikkeling van de algemene circulatie, op grond van fysische beschouwingen. Deze interessante en o.i. belangrijke discussies vinden tot op heden echter nauwelijks enige weerspiegeling in de officieel uitgegeven verwachting.

ad 4. Te oordelen naar het aantal voordrachten dat over dit onderwerp werd gehouden, staan statistische voorspelmethoden nog steeds in het middelpunt der belangstelling.

Hofmann (W. Dld), Eriksson (Zweden), Lytinsky (Polen), Rao (India) en Gilman (USA) brachten allen verslag uit van een min of meer mislukte poging om de gemiddelde temperatuur en de totale hoeveelheid neerslag een maand of een seizoen vooruit te voorspellen. Regressiemethoden schijnen in het geheel niet te voldoen. Hofmann en ook Lytinsky schenen nog hoopvol gestemd t.a.v. het gebruik van contingentiemethoden (o.a. ook gebruikt bij Namias' experimentele seizoenverwachtingen), doch Eriksson verkreeg ook hiermee resultaten, die nauwelijks beter waren dan persistentieverwachtingen. Zelfs Gilman, gebruik makende van een moderne statistische methode bekend onder de naam "empirische orthogonale polynomen", zag zijn "skill score", bij toepassing op onafhankelijk materiaal, gestadig teruglopen naar nul.

ad 5. Singulariteiten e.d. (methode van Grappe) vinden in zuivere vorm nauwelijks toepassing. Iedere voorspeller op lange termijn houdt er echter wel min of meer rekening mee.

III. De theorie

Om een overzicht te geven van de in Boulder voorgedragen theoretische verhandelingen gebruiken we de volgende indeling:

1. studies m.b.t. klimaatschommelingen en lang-periodische fluctuaties van de algemene circulatie;
2. studies m.b.t. energie-omzettingen in de atmosfeer;
3. studies m.b.t. numerieke integratie van voorspelvergelijkingen.

ad 1. Belangrijke voordrachten waren die van Lorenz en Sawyer. Lorenz karakteriseerde eerst kort de algemene circulatie:

- de atmosfeer is te beschouwen als een systeem dat thermisch wordt gedreven, tegen de wrijving in;
- zij bezit een tijdsgemiddelde stromingstoestand, die zonaal kan worden genoemd;
- op de gemiddelde stroming zijn verstoringen gesuperponeerd, welke essentieel zijn in het handhaven van de gemiddelde toestand, omdat zij de voornaamste transporteurs zijn van warmte en impulsmoment;
- de beweging van de verstoringen is onregelmatig, terwijl zij kort-periodische fluctuaties ondergaan, welke eveneens onregelmatig zijn;
- zowel de verstoringen als hun fluctuaties vinden een oorsprong in instabiliteiten.

Beide genoemde voordrachten gaven vervolgens een opsomming van de mogelijke oorzaken van langperiodische fluctuaties van de gemiddelde stromingstoestand, t.w.:

- a. het zijn statistisch te verwachten schommelingen (dit punt werd reeds behandeld onder I);
- b. onregelmatige effecten waarvan de bron buiten de atmosfeer is gelegen (b.v. zonneactiviteit);
- c. interacties met het aardoppervlak, vooral met de oceanen;
- d. interne mechanismen.

We geven nu een kort overzicht van de ideeën en beweringen, welke door de respectievelijke sprekers ten aanzien van de oorzaken b t/m d worden uitgesproken.

Zonneactiviteit: De belangrijkste woordvoerder op dit gebied was Willet (USA). Hij vertoonde een groot aantal plaatjes waaruit het verband tussen een tweetal zonnecycli en het klimaat van Noord-Amerika zou kunnen worden geconcludeerd. De 22-jarige periode zou vooral op hoge breedte en in het winterseizoen aanwijsbaar zijn, terwijl de 80-90 jarige periode meer uitgesproken zou zijn in de subtropen in zomer en najaar. Als verklaring voor de eerstgenoemde schommeling stelde Willett een verandering van de atmosferische doorlating voor, teweeggebracht door ozonvariaties. In de 80-90 jarige periode zou sprake zijn van een reële variatie van de zonneconstante. Ofschoon geen oordeel kon worden gevormd over de werkwijze zag het geheel er zeer betrouwbaar uit.

Niettemin werd een dergelijke zonne-invloed door sommige mensen, o.a. Sawyer, strikt van de hand gewezen. Bjerknes (USA) verwacht er hoogstens

een randeffect van, terwijl Namias en ook Lorenz een belangrijke invloed niet uitsluiten. Het ontbreekt echter nog aan waarnemingen om bepaalde voorgestelde mechanismen op hun betekenis te testen.

Interacties met aardoppervlak. Discussies over dit onderwerp beheersten nagenoeg het symposium.

Met name het belang van anomalieën in zeewatertemperaturen werd besproken, voor tijdschalen variërend van een maand tot een eeuw.

J. Bjerknes (USA) gaf een verklaring voor de klimaatschommeling, die bekend is onder de naam "Kleine IJstijd" (18e eeuw na Chr.). Uitgangspunt in zijn theorie vormde de anormale temperatuur van de Sargasso Zee (pos.) en het Amerikaanse kustwater (neg.). De redenering is verder ruwweg als volgt: de barokliene zone tussen de Sargasso Zee en Noord-Amerika gaf aanleiding tot krachtige cyclogenese met als gevolg een sterk ontwikkelde trog over Oost-Canada. Het effect hiervan stroomafwaarts zou zijn het opbouwen van een rug over de Noord-Atlantische Oceaan, en met name over IJsland. De daaropvolgende trog zou over Scandinavië komen te liggen.

Door het verdwijnen van de IJsland-depressie neemt de index over de Atlantische Oceaan af; dit vermindert de Ekman-drift waardoor de normale divergentie van water in de buurt van IJsland niet plaatsvindt. Dit leidt tot een verzwakking van de compenserende golfstroom (volgens het principe van Sverdrup) wat weer tot gevolg heeft, dat de oppervlakte-temperaturen van de Noordoost-Atlantische Oceaan afnemen, de ijsgrens zich verder naar het zuiden uitstrekt en het Westeuropese klimaat kouder wordt.

Over het algemeen werd Bjerknes' uiteenzetting zeer gewaardeerd; Willett meende echter, dat voor de verklaring van de Kleine IJstijd ook met de activiteit van de zon rekening moest worden gehouden.

Flohn meende een invloed van de oceaan op de atmosfeer te mogen concluderen uit de door hem gevonden niet-gelijktijdige correlatie met tijdsinterval van 4 maanden tussen de neerslag in Afrika en die in Zuid-Amerika. Of zeewater-temperatuur-anomalieën zich echter zo regelmatig met de zeestromingen verplaatsen over een zo grote afstand werd door sommigen betwijfeld.

Namias nam naast abnormale zeewatertemperaturen ook abnormale sneeuwbedekking e.d. over land, in zijn beschouwing op. Hij besprak enige voorbeelden van terugkoppeling tussen aardoppervlak en atmosfeer en verklaarde op grond hiervan de persistent-recurrente blokkeringen van de circulatie over Scandinavië in de jaren 1958-60. Dit werk is inmiddels gepubliceerd (Tellus, 16, no. 3, 294-408, 1964).

Een uitgebreidere en meer kwantitatieve aanpak bleek Sawyer te hebben ondernomen.

Als uitgangspunt stelde hij een drietal eisen op waaraan enige oppervlakte-abnormaliteit zou moeten voldoen, wilde deze voor beïnvloeding van de algemene circulatie in aanmerking komen. Deze eisen waren de volgende:

1. groot gebied, minstens 1000 km^2 ;
2. lange duur, in de orde van een maand;
3. voldoende intens, groter dan $1/10$ van de normale uitgaande IR-straling, welke 450 cal/cm^2 dag bedraagt.

Op grond van deze eisen werden onderzocht anomalieën in zeewatertemperaturen, ijsgrens, sneeuwgrens, grondvochtigheid en vegetatie. Alleen de eerstgenoemde anomalieën zouden aan alle drie eisen voldoen.

Sawyer had verder nog een modelberekening opgezet om de verandering van de algemene circulatie te bepalen voor een gebied met een temperatuurafwijking van het zeewater van $+ 1^\circ \text{C}$. De energieoverdracht aan de atmosfeer zou in dit geval 80 cal/cm^2 dag bedragen. Als uiteindelijke invloed hiervan vond Sawyer dat de Rossby-golven op middelbare breedte hun amplitude met 4° (breedtegraden) vergrootten. Hij vertoonde tenslotte nog enkele plaatjes waarop het verband tussen de gemiddelde afwijking van de zeewatertemperatuur in het gebied $20-30 \text{ N}$, $50-60 \text{ W}$ en het voorkomen per jaar van een bepaald circulatietype in Engeland stond aangegeven.

Met name deze plaatjes ontlokten de nodige discussie en twijfel, vooral toen Willett liet zien dat de frekwenties van de genoemde circulatietypen evengoed gecorreleerd zijn met het jaarlijkse zonnevlekkengetal als met de door Sawyer gebruikte temperatuurafwijkingen.

Lorenz ging in zijn beweringen zover, zelfs elke verandering van de circulatie door interacties met het aardoppervlak uit te sluiten. Bepaalde anomalieën zouden overigens wel in staat zijn persistentie van de circulatie te veroorzaken.

Deze beweringen berustten op uitkomsten van numerieke experimenten, waarop verder niet werd ingegaan. In statistisch-mechanische termen drukte Lorenz zich als volgt uit: de toestand van de atmosfeer op een bepaald moment kan worden weergegeven door een punt in de $2N$ -dimensionale faseruimte. Wanneer we nu een ensemble van begintoestanden beschouwen, dan zal door evolutie hiervan na een tijd Δt een volume V in de faseruimte worden gevuld. Houden we bij de evolutie in de tijd al of niet rekening met afwijkingen in de temperatuur van zeeoppervlak (het model bevatte ook iets van de diepere lagen van de oceaan) dan zal het volume V in beide gevallen praktisch hetzelfde ensemble-gemiddelde opleveren.

Deze uiteenzetting werd verder gesteund door Charney (USA).

Conclusie: de discussie over interacties tussen aardoppervlak en atmosfeer is nog bij lange na niet gesloten. Misschien zou het raadzaam zijn dat gedane uitspraken door onafhankelijke werkgroepen werden geverifieerd.

Interne mechanismen. Dat deze als oorzaak van lang-periodische schommelingen van de circulatie zouden dienen, werd door Sawyer verworpen op grond van het feit, dat de totale kinetische energie van de atmosfeer in 28 uur door wrijving met het aardoppervlak verloren kan gaan. Zelfs al zou deze door Brunt bepaalde snelheid van energiedissipatie enkele malen kleiner zijn, dan nog zouden zijn argumenten gelden.

Lorenz liet zich in positievere zin hierover uit. Zich baserend op resultaten van roterende-ring experimenten en numerieke modellen, kwam hij tot de conclusie dat een systeem als de aardatmosfeer (waarin niet-lineaire processen een grote rol spelen) zonder interacties met zijn omgeving, lang-periodische fluctuaties zou kunnen vertonen.

De genoemde experimenten met een roterende ring (proeven van Hide) gaven een verschijnsel van fluctuaties in de vorm van de lange golven te zien (vacillation).

In de numerieke experimenten van Lorenz was het model van zuiver wiskundige aard, nl. een niet-lineaire formule van de vorm:

$$X_{n+1} = a \left(3 X_n - 4 X_n^3 \right), \quad a \text{ is een constante.}$$

Voor $a = 0.875$ werd door Lorenz de iteratie uitgevoerd te beginnen met één bepaalde X_0 en met een ensemble van beginwaarden ongeveer gelijk aan X_0 . Na iedere stap werd X_n (verkregen uit X_0) en het ensemblegemiddelde van de X_n 's (verkregen uit het ensemble van beginwaarden) met elkaar vergeleken. Gedurende enige stappen in het begin bleken beide gelijk te lopen. Daarna liepen ze uit elkaar en wel zodanig dat de enkelvoudige X_n steeds verder wegliep van X_0 , terwijl het ensemblegemiddelde van de X_n 's lang-periodische fluctuaties onderging en zo nu en dan nog weer in de buurt van het ensemblegemiddelde van de beginwaarden kwam.

Hoe fraai ook deze resultaten zijn, de stap van de modellen naar de werkelijke atmosfeer lijkt niet eenvoudig te zetten.

Een verschijnsel, waarvoor de verklaring wellicht ook in de atmosfeer zelf gezocht moet worden, is het verband tussen de bewegingsrichting van de stratosferische verwarming in de nawinter op middelbare en hoge breedten en de richting van de stratosferische wind in de tropen. Stratosferische oostenwinden in de tropen zouden vergezeld gaan van een "voortplanting" van de

stratosferische verwarmingen van Europa naar Noord-Amerika (jaren 1958, 60, 62, 64) en andersom (jaren 1957, 59, 61 en 63).

De Duitse Karin Labitzke, die dit verband naar voren bracht, kon wat de boven Europa begonnen verwarmingen betreft nog de volgende troposferische reacties aantonen: een negatieve afwijking van de gronddruk (-10 mb) over Finland gedurende 3 dagen vóór de verwarming en een positieve drukafwijking over de Oostzee daarna. Deze positieve anomalie zou in ieder van de onderzochte gevallen (1958, 60, 62 en 64) cumulatief over 10 dagen 50-70 mb bedragen.

ad 2. Aan de hand van hoogte- en temperatuurwaarnemingen van een zo groot mogelijk aantal drukvlakken in de atmosfeer wordt een studie gemaakt van de energieverdeling over de verschillende schalen van beweging (golfgetallen). Soms wordt nog van de werkelijk gemeten wind gebruik gemaakt. Men onderscheidt in kinetische en (beschikbare) potentiële energie.

In eerste aanleg bepaalt men vaak de gemiddelde hoeveelheid van genoemde energieën in de zonale stroming en in de hierop gesuperponeerde storingen (eddies). Deze laatste kan men vervolgens onderverdelen naar golfgetal ($n = 1, 2, 3$ enz.) en iedere bewegingsschaal op zijn energie-inhoud onderzoeken.

De bepalingen hebben meestal betrekking op de circulatie in een gegeven maand en over een geheel halfroond.

Een volgende stap is dan het berekenen van energie-transporten tussen de verschillende bewegingscomponenten en van energie-omzettingen, potentiële naar kinetische of omgekeerd, voor iedere bewegingscomponent afzonderlijk.

Dergelijke analyses zijn inmiddels voor een aantal maanden uitgevoerd en de vraag is eigenlijk of de resultaten van toepassing zijn voor het opstellen van lange-termijnverwachtingen.

T. Murakami (Japan) was in dit opzicht hoopvol gestemd. Door toepassing van bovengeschetste analysemethode op dagelijkse kaarten vond hij een quasi-periodiciteit van ongeveer 12 dagen in vrijwel alle door hem beschouwde interactie-termen. Zijn onderzoek liep over een periode van één jaar en dat gaf hem het vertrouwen hier met een fundamentele eigenschap van de atmosfeer te maken te hebben.

In de discussie werd nog gewezen op het mogelijke verband tussen deze periodiciteit in de energietransporten en de al zeer lang bekende index-cyclus, waarvan de gemiddelde periode ook tussen 10 en 14 dagen ligt.

A. Wiin-Nielsen (USA) vergeleek de uitkomsten voor verschillende maanden met elkaar en met name voor dezelfde maanden in verschillende jaren.

Het belangrijkste punt hierbij geconstateerd was het afwijkende gedrag van de circulatie in de maand januari 1963. Waar "normaal" een energietransport van de eddies naar de gemiddelde stroming plaats vindt, gaf genoemde maand een omgekeerd transport te zien.

De belangrijkste gevolgtrekkingen, welke Wiin-Nielsen uit zijn resultaten maakte, betroffen de vervaltijd van b.v. de kinetische energie van de gemiddelde stroming wanneer alle toevoer zou worden stopgezet.

ad 3. Numerieke voorspelmethode en experimenten werden behandeld door: J. Smagorinsky, Y. Mintz, C. Leith en J. Charney (USA); G. Marchuk (USSR); F. Pellegrini (It.) en J. Adem (Mex.).

Met uitzondering van Adem, werd door genoemde personen gesproken over numerieke integratie over lange tijdsintervallen van voorspelvergelijkingen in een barotroop of baroklien model. De onderzoekers met vrij lange ervaring op dit gebied, voornamelijk de Amerikanen, waren het erover eens dat ten aanzien van lange-termijnverwachtingen de door hen gebruikte methoden beslist nog geen verbetering in het vooruitzicht stellen.

De toestand is momenteel zo, dat men met enige zekerheid in staat is de normale toestand van de atmosfeer, over een seizoen of over een jaar gemiddeld, te reconstrueren. Dit zou betekenen dat het model klaarblijkelijk voldoende realistisch is wat het gemiddelde verloop van de natuurkundige processen betreft. De variatie hiervan in de tijd is echter juist die enorme stap verder, die nodig is voor enigermate zinvolle lange-termijnberekeningen.

Als tijdvak waarover op dit moment en misschien wel principieel, betrouwbare stromingspatronen kunnen worden voorspeld, werd 5-7 dagen aangenomen.

Overigens maakt dit de uitvoering van numerieke experimenten niet minder belangrijk en hoopgevend. Zowel Smagorinsky alsook Mintz en Leith lieten de resultaten zien van enkele detailonderzoekingen, welke anderszins praktisch onuitvoerbaar zouden zijn geweest. Deze betroffen de navolgende problemen:

1. het verband tussen $U(z, \varphi)$, $T(z, \varphi)$ en de albedo in de poolgebieden;
2. reconstructie van de levensloop van een lagedrukgebied aan de oostzijde van de Rocky Mountains; deze depressies schijnen voor de synoptische meteoroloog vrijwel ongrijpbaar te zijn;
3. het verband tussen de voorspelde stromingspatronen van twee experimenten waarvan de begincondities slechts hierin verschillen, dat in het ene experiment de werkelijke wind wordt genomen en in het andere de geostrofische wind;

4. de invloed van veranderingen in de differentiële verwarming op de amplitude van de lange golven.
5. de algemene circulatie bij een ijsvrije Poolzee.

Charney en de beide Europeanen Marchuk en Pellegrini bespraken vooral de mathematische zijde van de numerieke modellen. Een belangrijk punt hierbij was de mogelijkheid gebruik te maken van een variabel net. Dit zou de behandeling van fronten in de numerieke modellen aanzienlijk verbeteren.

J. Adem (tijdelijk verbonden aan het U.S. Weather Bureau) besprak het door hem in verschillende publicaties alreeds geïntroduceerde thermodynamische model. Dit model, gedeeltelijk gebaseerd op ideeën en ervaring van Namias, maakt het mogelijk de gemiddelde temperatuur van de troposfeer en van het aardoppervlak voor een gegeven maand te berekenen uit waargenomen grootheden van de voorafgaande maand.

In het model wordt vrijwel volledig voorbijgegaan aan de hydrodynamica; er worden dan ook geen gemiddelde stromingspatronen berekend.

De enige vergelijkingen, die worden gebruikt, zijn die van het behoud van thermische energie. Warmte-advectie vindt uiteraard wel plaats, maar deze wordt volledig beschreven met behulp van een diffusie-term met vooraf empirisch bepaalde diffusieconstante.

Genoemde behoudswetten krijgen de volgende vorm:

$$\text{troposfeer : } \frac{T_m' - (T_m')_i}{\Delta t} - K \nabla^2 T_m' = E_A + E_C + G_2 + G_5$$

$$\text{aardopp. : } \frac{T_s' - (T_s')_i}{\Delta t} = E_s - G_3 - G_2$$

waarin: $T' = T - T_{\text{normaal}}$ en i slaat op de voorafgaande maand;

K = diffusieconstante;

E_A , E_C en E_s = stralingsbronnen van resp. atmosfeer, wolken en oppervlak;

G_2 , G_3 en G_5 = energiebronnen of -putten door resp. turbulent transport, verdamping en condensatie.

Ieder van de genoemde energiebronnen probeert men nu statistisch te beschrijven en vast te leggen als functie $f(T_m', T_s', \alpha, \xi)$ waarin α de albedo van het oppervlak en ξ de bewolgingsgraad voorstelt.

Naast een aantal aanlooppogingen heeft Adem met dit model de gemiddelde temperatuur voor de maand januari 1963 berekend, voor het gehele Noordelijk Halfrond. Hij maakte hierbij gebruik, allereerst natuurlijk van de waargenomen gemiddelde temperaturen van december 1962 maar ook van de waargenomen sneeuw- en ijsgrens op 31 december 1962, voor een zo nauwkeurig mogelijke bepaling van de albedo α .

De resultaten, o.a. ook gepubliceerd in *Monthly Weather Review*, 92 (1964), 91-103, zijn bemoedigend. Het blijkt zelfs dat de enorme kou in Europa en ook in de Verenigde Staten in die maand op vrijwel correcte schaal werden voorspeld.

Toch stonden vooral hydronamici bijzonder sceptisch ten opzichte van deze aanpak. Vooral de advectionsterm waarin de grootte van de diffusieconstante er niet zo erg veel toe scheen te doen, ontlokte veel kritiek.

De slotbijeenkomst maakte een enigszins onbevredigende indruk. Enerzijds was het moeilijk tot een goed resumé te komen, terwijl anderzijds de planning voor de toekomst niet tot eenstemmigheid leidde.

Naar verslaggever's opinie zou naast een aantal, voornamelijk numerieke, experimenten ter verkrijging van meer begrip omtrent de algemene circulatie, verdere ontwikkeling van het Adem-model wenselijk zijn. Dit model zou mogelijk toch op routinebasis gebruikt kunnen worden, al mag niet uit het oog worden verloren, dat het optimale resultaat slechts een maandgemiddelde van de temperatuur vertegenwoordigt en geen enkele informatie geeft omtrent het verloop gedurende de maand. In extreme gevallen echter is zo'n maandgemiddelde bijzonder waardevol.

De verzamelde bijdragen aan dit Symposium zullen verschijnen als een WMO Technical Note.