Bij de dood van Lorenz – een Amerikaanse indruk

HUUG VAN DEN DOOL (CLIMATE PREDICTION CENTRE, NCEP)

De redaktie vroeg me wat te schrijven "vanuit Amerikaans perspectief" over E. N. Lorenz naar aanleiding van diens overlijden op 16 april 2008; hij was toen bijna 91 jaar oud. Ik doe dat met enige schroom, omdat Lorenz een geleerde van de buitencategorie was en al met emeritaat was voor ik naar de VS vertrok. Het lezerspubliek van Meteorologica is gelukkig al goed geïnformeerd over Lorenz vanwege alle geschriften (door Lablans en anderen) geproduceerd bij gelegenheid van de Buys Ballot medaille in 2004.

Figuur 1. Edward Lorenz.

Reacties bij het overlijden

De reakties in de VS op het overlijden van Ed Lorenz (figuur 1) op 16 april waren verbazend snel. Alle grote dagbladen (Washington Post, New York Times en Los Angeles Times) hadden binnen 24 uur een flink in memoriam geplaatst. Dat zal niet eerder gebeurd zijn voor een meteoroloog. Meestal zijn in memoriams weken oud. De dood van George P. Cressman (89), ook geen onbekende voor de Meteorologicalezers (figuur 2), op 21 april 2008 leidde tot een in memoriam in de Washington Post, maar pas op 9 mei. De snelheid geeft aan dat Lorenz in de VS bekendheid genoot onder het grote publiek, dat de redacties op de hoogte waren van zijn aanstaand overlijden en het stuk al hadden klaarliggen. In de wetenschap duren reputaties meestal niet veel langer dan het opdrogen van de inkt van het laatste artikel dat geschreven is, maar er is plaats voor een paar uitzonderingen. Lorenz is ruim 20 jaar geleden min of meer zalig verklaard. Ik denk dat dat gekomen is door a) de erkenning van z'n werk door buitenstaanders zoals wiskundigen enz, en b) het boek van James Gleick (figuur 3), waarin de vondsten van Lorenz (en een aantal anderen) romantisch worden beschreven. Dat wil zeggen een geleerde doet een geweldige ontdekking waar niemand zo gauw klaar voor is, en moet jaren op erkenning wachten, zelfs, nee met name, bij vakgenoten. Dit genre spreekt niet alleen het grote publiek aan, maar veel meteorologen hebben pas toen voor het eerst, van horen zeggen dus, uitgevonden hoe knap Lorenz wel niet was. We wisten natuurlijk al, binnen ons vak, dat hij heel knap was, maar om van onbevooroordeelde wiskundigen te horen wat een geweldenaar hij was droeg bij aan een zaligverklaring. Alle meteorologen warmden zich in de afgeleide hulde.

De in memoriams in de genoemde grote dagbladen zijn nogal voorspelbaar, ze citeren Gleick's boek ruimschoots en hebben het voornamelijk over Lorenz als vader van de chaos, de vlinder, zijn artikel uit 1963. Geen woord over *Available Potential Energy*, de atmosferische energiecyclus, de foutengroeistudies in de jaren zestig met (toen) grote GCMs, en empirische orthogonale functies (EOF), om maar eens vier onderwerpen te noemen waar wij normale stervelingen niet snel met die diepgang aan toekomen. De bladen lieten experts aan het woord met een enkele lovende zin: Kerry Emanuel (Massachusetts Institute of Technology MIT), J. Doyne Farmer (Santa Fe), Edward Ott (Maryland, medewerker van J. York), Gleick, en Isaac Held (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory GFDL). Ook werden oude citaten opgegraven vanwege de prijzen die hem in het verleden zijn toegekend. Onder meer de opmerking dat 'chaos' na Newton's mechanica, en relativiteitsleer en quantummechanica tot de grote wetenschappelijke ontdekkingen moet worden gerekend. Dit leidde tot ingezonden stukken in de Washington Post, waarin men schande sprak van het feit dat de dood van Lorenz geen voorpaginanieuws was, maar slechts een in memoriam op pagina zoveel - wat een onderschatting van het belang van de wetenschap.

Eerdere reacties in de VS op het werk van Lorenz

Na het uitkomen van Gleick's boek heb ik inderdaad van ex-MIT studenten gehoord: "Oh is dat wat hij in dat kamertje deed, ik heb er toen nooit iets van begrepen". Een ander vertelde me dat de vele lovende toespraken van volstrekte outsiders bij Lorenz' emeritaat in 1978 z'n eigen (ex)studenten verraste; ze hadden nooit geweten dat hij zó beroemd was. Hij was gewoon een klasse apart en z'n appeal liet zich niet stoppen bij de grenzen van het vakgebied zoals die vaak dwingend door collega's en geldschieters worden bepaald. Hij was allesbehalve een showman die er alles aan deed gehoord te worden – dat hij desondanks gehoord werd toont z'n ongewone talent aan. Hij was ook een allesbehalve regenteske bestuursman zoals bijvoorbeeld Cressman.

Op de Universiteit van Maryland heb ik eens een bijzonder seminar van Lorenz mogen bijwonen. Dat was in de jaren tachtig. Op Maryland hebben we een Institute for Physical Science and Technology (IPST), waarin ook het Department of Meteorology (DOM) eerst was ondergebracht, voor het zelfstandig werd. Het is door deze omstandigheid dat de grote IPST wiskundige Jim Yorke, de man die het woord chaos introduceerde, een overdrukje van het Lorenz' artikel van Alan Faller (IPST/DOM) mocht ontvangen. Alan Faller, de *dishpan* deskun-

Figuur 2. George P. Cressman (© NOAA).

dige (ex-MIT), vermoedde namelijk dat ze elkaar wel iets te vertellen hadden. Dit leidde tot de opgewonden stemming die zo goed beschreven is in Gleick's boek. Lorenz werd na enige tijd uitgenodigd. Mensen van allerlei afdelingen kwamen luisteren, biologie, scheikunde, wiskunde, noem maar op. Mensen van andere universiteiten kwamen een dagje over. Nadat men de grootste onder de grote zalen had afgehuurd bleek zelfs dat nog te klein. Wij als meteorologen probeerden de grote jongens uit te hangen omdat we Lorenz al kenden. Wij hadden altijd al geweten waar die wiskundigen nu 20 jaar later achterkwamen, maar niet heus. Het was in deze opgewonden sfeer dat Lorenz in grenzeloze bescheidenheid naar voren kwam. Pas als hij praat, merk je dat zijn zelfvertrouwen rust op grote kennis en inzicht. Ineens is de aarzelende onzekerheid weg. Natuurlijk werd hij continu onderbroken door kanebraaiers die hem op foutjes meenden te kunnen betrappen. Maar hij slaagde met vlag en wimpel voor het examen.

In alle jaren op NCEP (destijds NMC) heb ik Lorenz maar één keer een seminar horen geven. Onvoorstelbaar weinig. Dat zijn band met het ECMWF zoveel groter was dan met NCEP ligt vast niet alleen aan Lorenz maar aan structurele problemen bij NCEP en de Amerikaanse overheid. (Daar overtreed je de wet als je een bezoeker een kopje koffie geeft.) Maar die ene keer mocht er zijn, het ging over 'targeted observations', dat wil zeggen het sturen van onbemande waarnemingsvliegtuigen met dropsondes naar gebieden waar extra waarnemingen het meest aan de nauwkeurigheid van de verwachtingen bijdragen. Waar doen de vlinders er vandaag het meest toe?? Kerry Emanuel draaide de overheadsheets voor Lorenz om. (Kerry komt de eer toe Lorenz zeker 10 jaar 'uit de wind' te hebben gehouden, zodat hij kon blijven functioneren; hij was tot het laatst dagelijks op kantoor als hij niet reisde.) De zaal was afgeladen, door de open deuren staken nog 50 hoofden af en toe naar binnen om geen woord te missen. Het zuurstofniveau werd akelig laag. De persoon die Lorenz mocht inleiden liep naast zijn schoenen van z'n eigen belangrijkheid. De overgang van de pompeuze inleiding naar de bescheiden (van toon) presentatie mocht er wezen. Lorenz deed blijkbaar alles zelf, berekeningen, grafieken enz. (Zijn grafieken bestonden uit getallenbanden op papier met blanke intermezzo's zodat men zelf de isolijnen kan trekken – het herinnerde aan het BK3 tijdperk).

De presentatie van Lorenz op NCEP vroeg om een vergelijking met soortgelijke afgeladen zalen wanneer Norm Philips sprak. Op een geheel andere manier was ook Philips zeer bescheiden. Niet alleen was hij wars van alle opsmuk, maar hij was de enige van de beroemde MIT professoren (Charney, Lorenz, Philips, Sanders en Starr) die zich "verlaagde" om bij de Amerikaanse overheid (NMC) te gaan werken om te zien of je de academisch vergaarde kennis in de praktijk kan brengen. Vele stapjes terug in dollars en aanzien. Philips was ongekend populair op NMC door zijn grote offer, en geweldig geliefd bij hen die voor hem werkten. Daarentegen was Lorenz meer uit de krant bekend dan door zijn bezoeken aan het belangrijkste weerkundige instituut in eigen land. Bovendien waren er mensen die vonden dat het knap beredeneren van de onvoorspelbaarheid niet helpt bij onze missie: het beter maken van de verwachtingen. Zo dicht waren we niet bij de grens der mogelijkheden dat we ons NU al moesten laten ontmoedigen door het vooruitzicht nooit beter te kunnen.

Bij mijn eerste bezoek aan de VS (1978, GFDL) had ik ook al mogen proeven van een bepaald soort kritiek op Lorenz, nu wellicht onvoorstelbaar. Het gaat vaak om geld in de VS. Miyakoda was op dat moment de pionier in numerieke maandverwachtingen. Het was duur om al die computertijd te krijgen, en de concurrentie van Miyakoda wilde met zelfbelang graag opmerken dat Lorenz al had aangetoond dat een en ander niet mogelijk was, dus konden we dat geld beter aan iets anders besteden. Miyakoda werd dit zat en vond dat Lorenz' voorspelbaarheidswerk, aldus geïnterpreteerd, de vooruitgang tegenhield. Iedereen heeft een beetje gelijk gekregen. Met numerieke maandverwachtingen is het nog altijd hangen en wurgen. Maar de limiet der voorspelbaarheid zoals die door Lorenz in 1982 met het ECMWF model werd bepaald is nu ruim overtroffen door de actuele skill (zie figuur 4). Weinigen zullen dat toen hebben verwacht. Kwalitatief is het argument van Lorenz onverminderd van kracht, maar of de limiet kwantitatief 2, 3 of 6 weken (en bovendien variabel) is zullen we niet weten tot de modellen zijn geperfectioneerd en dat laatste bereik je niet door al in een vroeg stadium alle hoop op vooruitgang op te geven. Niet dat Lorenz zelf ooit heeft gezegd dat we de moed wel kunnen opgeven, maar zijn werk werd soms negatief geciteerd.

Lorenz is in het begin van zijn carrière sterk beïnvloed door twee grote activiteiten op MIT, namelijk het onderzoek naar de zogenaamde instandhouding van de algemene circulatie (geleid door V. Starr) en (pre-NWP) verwachtingsmethoden gebaseerd op (meestal) lineaire statistische methodes (ooit geleid door N.Wiener). Van de Nederlanders in Amerika hebben alleen Wim van Dijk en Bram Oort dit van nabij meegemaakt. Interessant genoeg heeft Lorenz zijn interesse in beide op de achtergrond geraakte onderwerpen nooit verloren. Het was Wim van Dijk die mij als student op het IMOU (nu: IMAU, red.) bedolf met MIT publicaties, vooral van Starr, maar ook van Lorenz.

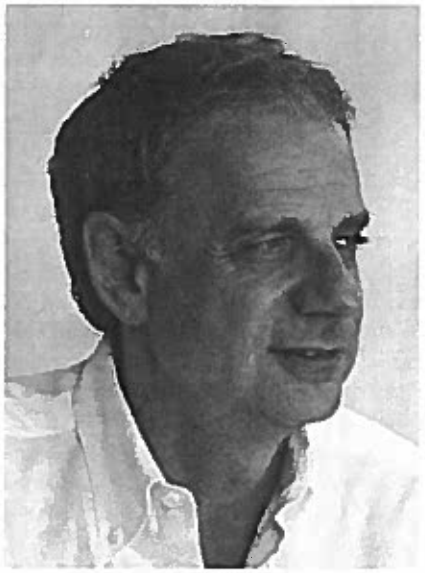
Mijn eigen ervaring met (het werk van) Lorenz

Toen ik naar Amerika ging kende ik delen van het werk van Lorenz vrij goed, maar NIET het artikel uit 1963. Ik zou dat niet eens begrepen hebben. Niettemin kende ik zijn 'voorspelbaarheids'-werk vrij goed, met name van de, toen, allereerste experimenten met GCM's om de foutengroei met behulp van een opzettelijke verstoring in de uitgangstoestand onder 'perfect model' omstandigheden na te gaan. Dat was een initiatief van niet alleen Lorenz, maar ook Charney en Mintz. Van deze drie zette alleen Lorenz zijn tanden in het begrijpen van de resultaten en met name een centraal thema: de verdubbelingstijd van fouten die aanvankelijk op de kleinste schalen zitten. Met drie verschillende methodes (GCM, analogen (!) en een simpel maar wel veelschalig model) kwam hij tot 2 à 3 dagen verdubbelingstijd van kleine fouten. Dit was algemeen bekend bij meteorologen in 1972 – men wist dus van foutengroei, en dat kan blijkbaar zonder vreemde attractors, fractals en Lyaponov exponenten enz. De vraag bleef wel of de groei exponentieel is (dan was de

atmosfeer oneindig lang voorspelbaar als we de fout klein genoeg konden maken), dan wel super-exponentieel. In het laatste geval is de voorspelbaarheid eindig (met de methodes ons bekend) zelfs als we de fout infinitesimaal klein kunnen maken. De (super)exponentiele groei kon volgens herleiding worden gekoppeld aan de helling van het kinetisch energiespectrum voor de korte golven. Men kon de fout vanuit de kleinste schaal het volgende octaaf zien bederven. Was die helling kleiner dan -3 dan was de groei superexponentieel. Lorenz en anderen (Kraichnan, Lilly, Leith) hadden dit inzicht ontwikkeld, en het zoeken was nu naar data met voldoende oplossend vermogen. Holopainen en Schmidt zetten me voor mijn proefschrift aan het werk met de allereerste Cabauw-gegevens op 214 meter hoogte, en wat bleek: de helling gaf super-exponentieel aan, dus principieel begrensde voorspelbaarheid. Zelfs met een steilere helling is de voorspelbaarheid begrensd, maar meer om praktische redenen (we kunnen de initiele fout eenvoudig niet kleiner krijgen.) We horen weinig meer over dit k**-3 onderwerp.

In 1978 brak ik twee armen tegelijkertijd en zat een maand lang thuis en las alles wat los en vast zat. Ik bracht de dag door met bijvoorbeeld de WMO monograaf van Lorenz over de 'algemene circulatie'. Wat een prachtboek, en geen woord te veel. Ook mijn werkgroepgenoten (Reiff, Oerlemans en Opsteegh) hebben dankzij mijn ongeluk dit boek gelezen (wie gunt zich normaal de tijd), om bij mij thuis hierover discussies te hebben.

Ik ontmoette Lorenz voor het eerst in 1982 in Princeton. Ik had toen de gewoonte om met iedereen een praatje te beginnen, om mijn plaats onder vakgenoten in een nieuw land te winnen. Maar met Lorenz praten bleek ongehoord moeilijk. Ik heb nooit iemand ontmoet die zo schuchter, nederig, beleefd en terughoudend is. Dat valt vooral op omdat ook ons vak wordt beheerst door schreeuwlelijken en kanebraaiers. Zonder tegenbericht verwacht je dat een beroemdheid dominant en arrogant is. Maar Lorenz zat rustig met zijn hand omhoog te wachten tot de voorzitter van de vergadering hem eindelijk opmerkte zodat hij een verlossend woord kon spreken terwijl de rest van de zaal al een half uur zinloos door elkaar schreeuwde. Ik probeerde met Lorenz te praten, maar slaagde nog voor geen 10%. De lange pauzes in ons gesprek verwarden me. Ik ken zijn werk, heb hem ongeveer tien keer ontmoet, maar heb ik Lorenz zelf ooit echt leren kennen? Maar



Figuur 3. James Gleick (Foto: Phyllis Rose).

wie zou hem echt gekend hebben???

Behalve over de voorspelbaarheid had ik een band met Lorenz' (werk) over twee andere onderwerpen: analogen en EOFs. Ik raakte rond 1985 ineens hevig geinteresseerd in analogen. Weliswaar werd een artikel van Lorenz uit 1969 over analogen vaak negatief (wederom: door anderen!) geciteerd, alsof analogen 'onmogelijk waren' maar Lorenz zelf heeft zoiets nooit gezegd of geschreven. (Zei hij trouwens ooit iets negatiefs??, of bekritiseerde hij anderen??? Ik geloof er niets van.) Ik vond een *limited area approach* die het principe van de werking van analogen in een voorspelprobleem demonstreerde. Ik had het geluk dat Lorenz op een dag bij ons, de Universiteit van Maryland, op bezoek kwam. Nederig reisde hij van kantoor naar kantoor om zich met ons te verstaan. Stotterend legde ik mijn limited area analogen uit toen hij voor een half uurtje aan mijn bureau plaats nam. Ik zag hem instemmend knikken, en wat opbouwende opmerkingen maken, vooral over de super-exponentiele foutengroei die ik meende te zien. "Dit zou ik maar snel publiceren" zei Lorenz. Verder aanmoediging had dit broekie niet nodig.

Tien jaar later had ik een aanval om EOFs beter te begrijpen. Ik greep terug op de inspiratie in de jaren 1940 en 50 op MIT, dat wil zeggen voordat numerieke methodes alles gingen overheersen. In dat kader had Ed Lorenz EOFs afgeleid. De terminologie EOF is van hem, de ontdekking ook, maar later bleek dat hij lang niet de eerste ontdekker was. Lineaire statistiek speelde een centrale rol bij het idee van empirische verwachtingsmethoden, bijvoorbeeld bij Wiener die lange tijd meende dat het met NWP niets zou worden. Don Gilman (later mijn baas; dat verklaart wel iets) was de student van Lorenz die aan EOF werkte. Misschien hebben EOF's niet gebracht wat er toen van verwacht werd, met name niet voor voorspellingen, maar ze zijn waanzinnig populair voor diagnostisch werk. NWP schoot de banden lek onder vrijwel alle empirische voorspelmethodes, maar dit is het minst het geval voor de lange termijn waar NWP (zelfs gekoppeld aan de oceaan) ook nu nog niet veel bewerkstelligt. Mijn eigen fabricatie, de geconstrueerde analoog, werkt vrij aardig en combineert het originele idee van analogen met een speciale vorm van EOF's, namelijk EOT's die alleen in de ruimte orthogonaal zijn en hun eigen tijdsafgeleide uit de waarnemingen meebrengen. Lorenz, die volgens velen had aangetoond dat analogen onmogelijk zijn, waardeerde dit soort werk juist.

Ik heb juist de laatste jaren enkele malen meer intensief contact gehad met Lorenz. Dat begon met mijn biografietje over de wiskundige George David Birkhoff, voor de Dutch-American geschiedenis club; Birkhoff vormde de brug waarover de ideeen van Poincare naar Lorenz toe kwamen. Vervolgens was er een heel mooi AMS Lorenz symposium waar ik toevallig bij was. Daarna mocht ik een seminar geven voor de MIT-studenten, met Ed Lorenz hogelijk geïnteresseerd op de eerste rij. Dat hij bereid was een voorwoord te schrijven voor mijn boek "Empirical Methods in Short-Term Climate Prediction." vond ik natuurlijk fantastisch. Hij deed dat eerder ook voor Bram Oort's boek (met Peixoto): "Physics of Climate". Lorenz heeft ons daarmee echt willen helpen. Bram Oort voegt hier toe: "Ed en Jane waren altijd bijzonder aardig voor aankomende buitenlandse studenten. Toen Bineke en ik voor het eerst op MIT kwamen in de zomer van 1961, haalde Ed ons af van de trein en nodigde ons uit om enkele dagen bij hen thuis te logeren. Ook hielp Jane ons met het vinden van een appartment op Park Drive, en hielp Ed ons met het transport van een enorme hutkoffer die net in zijn gele VW bug paste, uitstekend boven het open dak".

Een zuinig man

Lorenz gebruikte bijna altijd verbazend eenvoudige middelen, en was zuinig met computertijd. Het belangrijke artikel in 1982 over ECMWF's foutengroei en voorspelbaarheid werd gedaan door de integraties van gisteren en vandaag met elkaar te vergelijken, niet met nieuw gecreëerde ensembleleden, dat wil zeggen er zijn geen kosten aan verbonden.

Creativiteit uit (ten behoeve van de) zuinigheid? Zo ook met de middelen zelf. Als het eenvoudig kon, dan moest het ook zo eenvoudig mogelijk. In een bepaald artikel gebruikte Lorenz gemiddelden over N elementen als spectraalanalyse. Wel wetende dat reviewers daar 'standaard' over vallen, presenteerde hij dat als een "poor man's spectral analysis". Maar hij was niet arm, vond slechts dat de methode goed genoeg was (en moest dus niet zwaarder zijn) voor het probleem dat hij besprak. Deze eenvoud en zuinigheid waren een extraatje bovenop de ouderwets goede neiging problemen zelf maximaal te simplificeren zodat de essentie behouden blijft terwijl de analyse en het inzicht makkelijker wordt.

Publicaties in de AMS tijdschriften

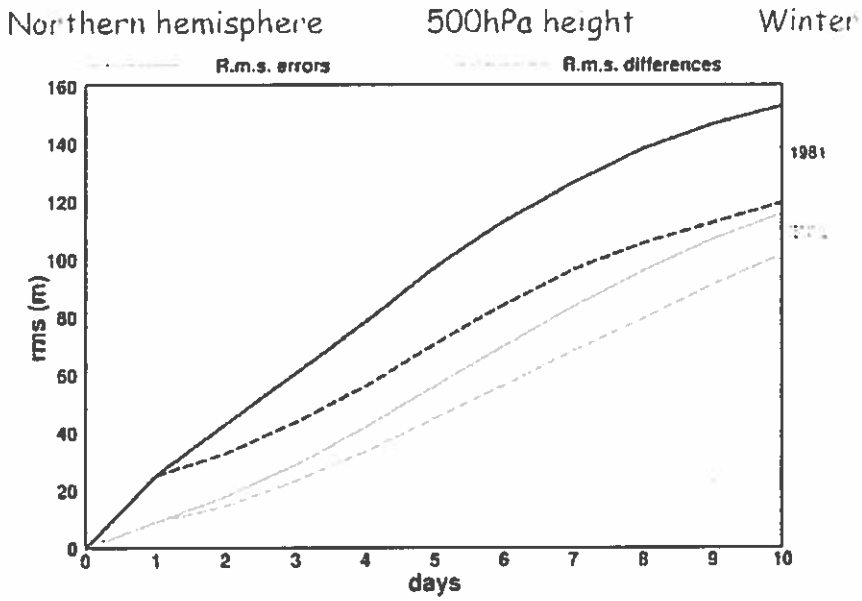
Het valt mij op dat Lorenz niet eens zo veel gepubliceerd heeft in de tijdschriften van de American Meteorological Society. Ik tel maar 24 artikelen en een *reply*. Kan niets in American Geophysical Union vinden. Daarmee word je geen assistant professor vandaag de dag. Wellicht omdat hij alleen sprak als hij iets te zeggen had. Hij heeft bovendien bijna geen enkel artikel samen met een van zijn studenten geschreven. Dat zal komen door de ongewone bescheidenheid van Lorenz, dat wil zeggen omdat hij geen dwingend adviseur was. Hij had natuurlijk ook enkele artikelen in Tellus, met name dat hele beroemde over Available Potential Energy. Zijn veelgeciteerd EOF-werk is alleen als intern MIT-rapport bekend. Het waren andere tijden toen Lorenz een jonge professioneel was, tijdschriften in ons vak hadden geen enkele traditie en het "publish or perish" dreigement bestond nog niet.

Studenten en hun promotor

In de VS laat men zich graag voorstaan op de reputatie van de promotor, en meet men de reputatie van een professor wel via de posities bereikt door z'n studenten. Bij navraag bleek dat Lorenz in de periode 1955-1985 22 promoties (P) heeft geleid, plus 27 Master Diplomas (M). Onder z'n studenten, velen al gepensioneerd, lees ik enkele bekende namen: Kirk Bryan (P), Howard Bluestein (M), Ron Errico (P), Ross Hoffman (P), Mankin Mak (M), John Roads (P), Alan Robock (P), David Salstein (P), Bill Sellers (P), John Stackpole (M,P), Kevin Trenberth (P), Dave Williamson (P) en John Young (P).

Eerbetoon

Er zullen zeker symposia te zijner eer worden georganiseerd. Het begint met een eendaags symposium door MIT op MIT op 13 september a.s. en men heeft het aangedurfd een citaat van Lorenz over de 'vrije wil' (blz 160 van z'n chaos boek) als motto voor de conferentie te kiezen. De AMS heeft de goede gewoonte ontwikkeld dat soort symposia te organiseren voordat betrokkene overleden is – Lorenz werd op die manier geëerd in januari 2005. Boeken zullen wellicht komen, ik hoop op zoiets moois als het boek dat in 1990 voor J. Charney uitkwam. Veel van de groten zijn namelijk uitgebreid geïnterviewd, en het resultaat wordt discreet als archiefmateriaal behandeld.



Figuur 4. Hoogte van het 500 hPa vlak (in m): gewone foutengroei (getrokken lijn) en foutengroei (gestreepte lijn) tussen twee opeenvolgende verwachtingen (met 1 dag verschil in starttijd) gemiddeld voor wintersituaties van het ECMWF model in 1981 en 2002. De streepjeslijn geeft zo een geschatte foutengroei van een perfect model (zie tekst). De schatting in 1981 voor de maximale foutengroei was dus heel goed als je het vergelijkt met meer moderne schattingen.

Tot slot

Lorenz heeft ons veel nagelaten waar we dankbaar voor mogen zijn. In zijn werk schuilen vast nog wel elementen die door het nageslacht ontdekt moeten worden. En ook iets ongemakkelijk en lacherigs. Als een verwachting misgaat hoort men wel: "Don't blame us. Blame the butterflies". Deze opmerking verraadt de spanning tussen wetenschap en praktijk. In de praktijk moet iets (model, waarnemingen, data assimilatie) of iemand (ik) verantwoordelijk/aansprakelijk gehouden kunnen worden voor een mislukte verwachting, want zo voelt het publiek dat aan, zo werkt de rechtspraak (mochten er klachten zijn), en daar leren we zelf hopelijk van. Maar wat is een mislukte verwachting?? Wetenschappelijk gesproken lijken we tegenwoordig klaar te zijn met een keurige waarschijnlijkheidsverwachting die, indien goed geformuleerd, nooit kan misgaan.

Literatuur

W. N. Lablans:
2001 De visie van Edward Lorenz op de voorspelbaarheid van het weer. Meteorologica, 10
2004 Gouden Buys Ballotmedaille voor Edward Lorenz http://www.knmi.nl/kenniscentrum/buys_ballotmedaille_lorenz.html
2006 Buys Ballot Medal for Edward Lorenz. Bull Amer. Meteor. Soc., vol 87, (met J. Oerlemans)
2008 De voorspelbaarheid van het weer van Lavoisier tot Lorenz. Deel II. Meteorologica 17 (met Van der Schrier)
E.N.Lorenz:
1955 Available potential energy and the maintenance of the general circulation. Tellus, Vol.7
1956: Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction, Scientific Report 1, Statistical Forecasting Project, MIT.
1963 Deterministic nonperiodic flow. Journal of Atmospheric Sciences. Vol.20.
1967 The nature and theory of the general circulation of atmosphere. World Meteorological Organization. No.218
1969 Three approaches to atmospheric predictability. Bulletin American Meteorological Society. Vol.50
1982 Atmospheric Predictability Experiments with a Large Numerical Model. Tellus, vol 34.
1993 The Essence of Chaos. UoWashington Press.
A. H. Oort:
1992: Physics of Climate (met Peixoto. Voorwoord door Lorenz)
H. Tennekes (Editor):
1990: De vlinder van Lorenz. Met hoofdstukken door o.a. Tennekes en Opsteegh.
H. van den Dool:
1975 On the slope of the kinetic energy spectrum. Deel II van proefschrift RUU.
1994 Searching for Analogues. How long do we have to wait?. Tellus, vol 46.
2000 Empirical Orthogonal Teleconnections. J. Climate, vol 13 (met Johansson en Saha)
2003 George David Birkhoff (1884-1944): Dutch-American Mathematician Extraordinaire. Proceedings of 14th biennial AADAS conference, p76-93. Download kan via http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/wd51hd/miscel/birkhofffinalplus.pdf
2007 Empirical Methods in Short-Term Climate Prediction. Voorwoord door Lorenz.