Die struktuur en moontlike aandrywingskragte van die 1991-1992-droogte in suidelike Afrika

M.R. Jury* en J.R.E. Lutjeharms

Departement Oseanografie, Universiteit van Kaapstad, Rondebosch 7700

Ontvang 29 September 1992; aanvaar 16 Maart 1993

UITTREKSEL

'n Diagnostiese model word gebruik om die onderliggende atmosferiese prosesse wat aanleiding gegee het tot die 1991-1992-droogte oor suidelike Afrika, te ondersoek. Dit blyk dat 'n styging in seeoppervlaktemperatuur van meer as 1°C in die tropiese deel van die Suid-Indiese Oseaan in die winter van 1991 aanleiding kon gegee het tot 'n afwyking in die gemiddelde Walker-sirkulasie. Hierdeur is die invloed van warm, vogtige lug vanaf die Mosambiekkanaal oor die oostelike platorand van suidelike Afrika moontlik onderdruk, met 'n gepaardgaande afname in reënval. Die afleiding word gemaak dat die patroon en siklusse van somerreënval oor suidelike Afrika nou goed genoeg verstaan word om tentatiewe voorspellings te waag, maar dat toenemende samewerking tussen instansies in Suider-Afrika wat hulle met die weerkunde besig hou, hiervoor nodig is.

ABSTRACT

The structure and possible forcing mechanisms of the 1991-1992 drought in Southern Africa

A diagnostic model is used to investigate the underlying atmospheric processes that gave rise to the 1991-1992 drought over Southern Africa. The first indicator of the impending drought was a rise of more than 1°C in the sea surface temperatures of the tropical part of the Southern Indian Ocean in the winter of 1991. This may have been instrumental in causing an anomaly in the mean Walker circulation to develop, through which the inflow of warm, moist air from the Mozambique Channel to the eastern escarpment of Southern Africa was inhibited, with a concurrent reduction in rainfall. It is concluded that the pattern and cycles of summer rainfall over Southern Africa are now sufficiently well understood to venture tentative predictions, but that increased co-operation between the meteorological bodies of Southern Africa will be required to achieve this.

INLEIDING

Sommerreënval oor suidelike Afrika, dit is die reënval oor 'n hele somerseisoen, vertoon groot tussenjaarlikse veranderlikheid wat gekenmerk word deur die opeenhoping van 'n aantal verskillende reënvalsiklusse met periodes wat mag wissel van 2 tot 20 jaar. Aangesien Suider-Afrika se landbou in 'n oorwegend droë omgewing plaasvind en dus van nature marginaal van aard is, is die behoefte aan betroubare voorspelling van seisoenale reënval baie groot.

Hierdie probleem het al aandag geniet. So is die tussenjaarlikse aard van reënvalafwykings ondersoek,¹ terwyl Tyson^{2,3} die verband aangetoon het tussen langdurige droë of nat tydperke en die ligging van staande golwe in die middebreedtegrade. Verbande is ook gelê^{4,5} tussen die El Niño/Suidelike Oosiliasie (ENSO) en reënval in Suid-Afrika. 'n Verdere verband is aangetoon⁶ tussen die kwasitweejaarlikse skommeling (KTS, *quasi-biennial oscillation*) in stratosferiese winde in sonale rigting en die reënval in Suid-Afrika. Navorsing het ook getoon⁷⁻⁹ dat daar 'n verband bestaan tussen die seeoppervlaktemperatuur van aangrensende oseane en reënval oor suidelike Afrika. Studies oor die tussenseisoenale gedrag van konveksie oor suidelike Afrika is ook al aangepak.¹⁰⁻¹² 'n Hele aantal van hierdie ondersoeke¹³ het die belangrike rol getoon wat sowel deur die gemiddelde vloei-patrone in die atmosfeer oor die trope as deur ekwatoriale skommelings gespeel word. Hierdie prosesse aktiveer meridionale wolkstrokke waardeur tropiese hittebronne gekoppel word aan kortstondige, middebreedtegraad trêe.

Die wyse waarop uitgebreide prosesse konvektiewe

strukture in die atmosfeer oor suidelike Afrika aandrywe, is alreeds ondersoek¹⁴ deur gebruik te maak van saamgestelde verskille tussen droë en nat somers vir die dekade 1975-1984. Daar is ontdek^{15,16} dat daar 'n beduidende klimatologiese dipool ontstaan in reaksie op die ENSO. Die voorloperfase van hierdie proses is ondersoek¹⁷ om vas te stel of dit vir verbeterde seisoenale voorspellings gebruik kan word.

In hierdie bydrae word 'n oorsig gegee van statistiese patrone in die atmosfeer en in die see, en gepaardgaande reënval oor suidelike Afrika wat verband hou met die droogte van 1991-1992. Die struktuur en die moontlike aandrywingskragte van die droogte word ontleed en aandag word gegee aan die gevolge van die droogte.

DATA EN METODES

Die somerreënval oor die produktiewe landbougebiede in die oostelike deel van suidelike Afrika is ontleed deur gebruik te maak van die afwykings van die Januarie-Februarie-reënval van die gemiddelde, gedeel deur die standaardafwyking. Die tydreeks van afwykings van die gemiddelde reënval vir 'n gestandaardiseerde gebied vir die tydperk 1955-1983 (fig. 1), vertoon 'n wye spektrum van klimatologiese uiterstes wat hulle leen tot die bepaling van droogte-aanwysers. Meteorologiese produkte op 'n reëlmatige ruitnet wat deur die *Climate Analysis Centre* (CAC) van Washington, VSA, opgestel word en die *Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (COADS) is gebruik om sirkulasiepatrone wat hulle tydens droë somers reëlmatig voordoen, te identifiseer.

*Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word.

FIGUUR 1: Gestandaardiseerde afwykings in die reënvalgemiddeldes vir die tydperk Januarie-Februarie 1955-1958 vir die Suid-Afrikaanse gebied wat op die kaartjie aangedui word. Gegewens is ontleen aan Nicholson et al.¹⁹

Aandag is ook gegee aan die gestandaardiseerde afwykings van langgolfuitstraling (LU) as 'n plaasvervangende waarneming vir reënval.¹⁸ Ontledings is gemaak van die winde op 200 hPa- en 850 hPa-drukvelde om afleidings te kan maak van die beweging van waterdamp, die vortisiteit van die sirkulasie en die divergensie. Die hittebronne in die anomalieë van seeoppervlakte-temperatuur is ook geïdentifiseer. Hierdie datastelle is op 'n soortgelyke manier deur sowel Arkin et al.²⁰ en Gruber et al.²¹, as deur Halpert en Ropelewski²² ontleed. Oor die algemeen is hierdie datastelle van korter duur as dié oor reënval.

RESULTATE

Tydgebonde veranderinge in reënval en droogte

Reënval oor suidelike Afrika het in 1964, 1968, 1970, 1982 en 1983 gedaal tot minder as 0,5 maal die standaardafwyking vir alle tye (fig. 1). Dit het ook in 1984, 1987 en 1992 gebeur. As hierdie tydserie van reënval statisties ontleed word, vind ons spektraalpeke met periodes van 2,3 en 4,65 jaar in die reënvalsiklus. Hierdie peke verteenwoordig die invloed van die KTS en die ENSO respektiewelik. 'n Spektraalontleding van 'n langer (1920+), vergladde rekord van reënval oor suidelike Afrika toon 'n sterk sikliese periode in die bereik van 17,3 tot 19 jaar.¹⁴ Die 17,3-jaarpeke kom natuurlik ook voor in die ENSO-statistiek.

Die reënval oor suidelike Afrika is statisties in verband gebring met die KTS en met die ENSO. As KTS-aanwyser is gebruik gemaak van die Januarie-Februarie-gemiddelde van die gestandaardiseerde afwyking van die 30 hPa sonale wind soos gemeet by radiosonde-stasies op die ewenaar, byvoorbeeld soos dié by Singapoer. Die ENSO-fase is gedefinieer deur die Januarie-Februarie-gemiddelde van die Suidelike Oosilasië-indeks (SOI). Laasgenoemde word op sy beurt gedefinieer as die atmosferiese drukverskil tussen Darwin in Australië en Tahiti in die Stille Oseaan. Die korrelasie tussen hierdie drie datastelle by verskillende vertraginge word in tabel 1 aangetoon.

TABEL 1
Korrelasies tussen die KTS, die SOI en die reënval oor suidelike Afrika

Vertraging (jare)	reënval/KTS	reënval/SOI
-3	0,00	-0,02
-2	0,24	0,12
-1	-0,09	0,04
0	0,30	0,44
+1	-0,31	0,26
+2	0,27	-0,11
+3	-0,06	-0,35

Negatiewe vertraging toon reënval kom eerste. Gegewens vir die tydperk 1955 – 1983, $n = 29$, waardes $> 0,31$ statisties betekenisvol by 95%.

Die negatiewe SOI skyn duidelik 'n invloed op droogte te hê; so ook die oostelike (negatiewe) fase van die KTS. Die reënval-SOI-korrelasie het sy hoogste waarde by 0-tydsvertraging, 'n waarde van 0,44, wat 'n swak reënval van El Niño-somers impliseer. Hierdie resultaat stem ooreen met die bevindings van sowel van Heerden et al.⁴ as van Lindesay.⁵ Die korrelasies bly positief van -2 tot +1 jaar vertraging, wat beteken dat somers sowel vóór as ná 'n El Niño-gebeurtenis droog mag wees. Die korrelasie met die KTS wissel al om die ander jaar wat te wagte is by 'n verskynsel met 'n reëlmatige siklus van 2,3 jaar. Kurwes wat die SOI en die KTS van 1950 tot 1992 aandui, word in fig. 2 weergegee.

Mason en Tyson⁶ het aangetoon dat korrelasies met Suid-Afrikaanse reënval verdubbel as slegs somers in ag geneem word waartydens sowel die SOI as die KTS negatief is. Dit is ook duidelik dat die KTS ongeveer elke vier jaar in fase is met die middel van die somer, sowel as met die ENSO. Die korrelasie tussen die KTS en reënval oor suidelike Afrika sal

FIGUUR 2: Tydreeks van die ENSO-indeks (bo) en die KTS (onder) vir die tydperk 1950 – 1991. Die eerste reeks is verglad deur gebruik te maak van 'n 16 maand lopende gemiddelde; die tweede reeks met 'n 1-2-1-beswaarde gemiddelde.

waarskynlik in sulke jare toeneem, alhoewel die getal gevalle sou afneem, waardeur die statistiese betroubaarheid beperk sou word.

Siende dat die meeste droogtes plaasvind tydens negatiewe fases van die SOI en die KTS, is dit ter sake om vir ooreenkomstige afwykende klimatologiese patrone te soek. Hierdeur kan dan 'n diagnostiese model ontwikkel word wat al die voorspellingsaanwysers wat gereeld voorkom, sal insluit. Al die herkenbare patrone van klimaatelemente wat konsekwent voorkom, sal ook ingesluit moet word.

'n Diagnostiese model gebaseer op historiese droogtes

Die plattegrond van en die seksies deur so 'n diagnostiese model vir droogtes in suidelike Afrika word in fig. 3 getoon. Die belangrikste eienskappe van die model word hieronder saamgevat, vergesel van tydreeksaanwysers.

Tydreeksaanwysers

- ENSO begin sy warm fase in die Stille Oseaan in die voorafgaande winter met maandelikse SOI-waardes laer as -1,0 teen Oktober;

- aanvang van KTS se negatiewe (oostelike) fase tydens die voorafgaande lente.

Plattegrond

- Die sentrale deel van die suidelike Atlantiese Oseaan se seeoppervlaktemperatuur daal tot benede normaal in die voorafgaande lente en somer;
- die tropiese deel van die suidelike Indiese Oseaan se seeoppervlaktemperatuur styg met meer as 1 °C bo die gemiddelde in die voorafgaande lente en somer, spesifiek in die oseaangebied begrens deur 0° – 20° S, 50° – 80° O;
- 'n daling van 1 °C onder die gemiddelde in die Suid-Indiese Oseaan se seeoppervlaktemperatuur langs 30° S teen midsomer en 'n toename in die Hadley-selsirkulasie by die lengtegrade 50° – 80° O;
- seeoppervlaktemperatuur benede die normale in die suidelike lope²³ en retrofleksiegebied²⁴ van die Agulhas-stroom suid van Afrika;
- 'n toename in die atmosferiese monsoenuitvloei op lae vlakke en terugbuigings in die ekwatoriale gebied noord van Madagaskar. Hierdie sirkulasie mag lei tot 'n sikloniese sirkulasiestelsel op 'n lae vlak met 'n straal van meer as 1000 km en met 'n middelpunt oor Madagaskar tydens die maande Oktober tot Maart;
- windafwykings op 850 hPa-vlak: uit die suide in die Mosambiekkanaal, uit die weste in die Comora-Seychelle-Agalega-omgewing, uit die noorde ten ooste van Mauritius en uit die ooste ten suide van Madagaskar;
- toenames in die ekwatoriale oostewinde op 200 hPa oor die Indiese Oseaan noordoos van Madagaskar, en ook toenames in die westewinde suid van Afrika, op dieselfde vlak. Hierdie toenames veroorsaak 'n hoë antisikloniese sirkulasiestelsel-anomalie wat min of meer bokant die sikloniese anomalie wat op lae vlak geleë is, lê.

Snitte

- Vertikale verheffing en bonormale konveksie (negatiewe langgolfuitstralingsanomalieë van meer as 15 W/m²) oor die gebied met bonormale seeoppervlaktemperatuur van die tropiese Suid-Indiese Oseaan;
- vertikaal dalende beweging oor suidelike Afrika waardeur die konvektiewe dipoolsirkulasiestelsels in die boonste en onderste vlak verbind word tot 'n Walkersel-anomalie;
- hierdie Indiese Oseaan-Afrika-Walkersel toon 'n wisselwerking met die warm fase van die ENSO in die Stille Oseaan;
- koel, droë lug vanuit die suidelike Atlantiese Oseaan dring suidelike Afrika binne en die tropiese konveksie skuif ooswaarts van 30° O tot 80° O;
- die oostelike fase van die KTS tree in wisselwerking met die boonste arm van die Walkersel-anomalie oor die Intertropiese Konvergensiesone waar hoofsaaklik tropiese siklone voorkom.

Die uiteensetting hierbo, asook fig. 3, verskaf voldoende wenke wat voorspruit uit die historiese ontledings van droogtes om daaraan te kan begin dink om voorspellings te waag oor die interseisoenale verskuiwing van tropiese konveksie vanaf suidelike Afrika na die Suid-Indiese Oseaan. Met dalende lugstrome gevestig oor suidelike Afrika, word die skakel tussen die hittebronne van die trope en die trône in

FIGUUR 3: Resultate van 'n diagnostiese model wat die sirkulasie, seeoppervlaktemperatuur en konvektiewe anomalieë aantoon wat verantwoordelik is vir droogtes in suidelike Afrika. Die boonste paneel toon 'n plattegrond, die onderste 'n snit deur 'n weergawe van die model. SOI is die Suidelike Osislasie-indeks; KTS, die kwasitweejaarlikse skommeling.

die midbreedtegrade verbreek. Hierdie ont koppeling is veral duidelik in satellietontledings van die duur van reënwolke en in terugkerende reëntekorte wat oor die sone 20° tot 25° S, hoofsaaklik dan die Limpopovallei.

Die koppeling tussen die KTS en die Walkersel bly voorlopig bloot 'n hipotese. Dit blyk egter wel dat die diep tropiese konveksie en siklone ten noordooste van Madagaskar baie sterk afnames in temperatuur met hoogte vertoon in die boonste troposfeer, d.i. tussen 400 tot 100 hPa. Ons spekuleer dat die tropopouse onder hierdie omstandighede deurbreek mag word met 'n gepaardgaande opwaartse oordrag van momentum tussen die stratosfeer en die boonste deel van die troposfeer. Wanneer daar 'n droogte oor suidelike Afrika is wat ooreenstem met die oostelike fase van die KTS, verhoog die voorkomsfrekwensie en intensiteit van tropiese konvektiewe versteurings oor die Suid-Indiese Oseaan aanmerklik. Voorbeelde hiervan is waargeneem in die somers van 1982 en 1984.²⁵ Dit is juis tydens hierdie bepaalde fase van die KTS dat die invloed van die ENSO blykbaar die maklikste van die Stille Oseaan na suidelike Afrika oorgedra kan word.

Dit blyk dat seeoppervlaktemperatuur 'n belangrike rol speel in die ondersteuning van bogenoemde sirkulasiestelsels. Ropelewski en Halpert²⁶ het 'n golf 2-verspreiding waargeneem in sowel tweejaargefilterde seeoppervlaktemperatuur-anomalieë as in sonale windafwykings in ekwatoriale gebiede. Hoë seeoppervlaktemperatuur en westewindafwykings van die sentrale Indiese Oseaan kom ooreen met meer intense El Niño-toestande in die oostelike deel van die Stille Oseaan. Die grootste seeoppervlaktemperatuurafwykings gedurende droë somers oor suidelike Afrika, kom langs die kus van Peru voor. Die afwykings kan groter as 2°C wees. Korrelasies minder as -0,5 tussen reënval oor suidelike Afrika en afwykings in seeoppervlaktemperatuur kom voor met temperatuur gemeet in die tropiese deel van die Suid-Indiese Oseaan. Die tydvertraging is 2 tot 4 maande.

Dit sou interessant wees om vas te stel of die algemene ontwikkeling in patrone vir droogtes wat hier uiteengesit is, ook geldig is vir die 1991-1992-droogte.

Aandrywing en struktuur van die 1991-1992-droogte

'n Ontleding van die 1991-1992-droogte is gemaak deur die afwykingsvelde te gebruik wat gereeld in die *Climate Diagnostic Bulletin* van die *Climate Analysis Centre* gepubliseer word. Tydens die winter van 1991 het seeoppervlaktemperatuur in die tropiese deel van die Indiese Oseaan met 1°C bo die gemiddelde toegeneem. Daar was ook 'n negatiewe tendens in die KTS en die SOI; al drie sou dui op 'n op hande synde droogte. Tydens Augustus-September 1991 was die seeoppervlaktemperatuur $0,6^{\circ}\text{C}$ bo normaal oor 'n groot deel van die oseaan ten ooste van Madagaskar (fig. 4). Hierdie positiewe afwykings in die gemiddelde seeoppervlaktemperatuur het voortgeduur tot in Januarie-Februarie 1992, soos sigbaar is in fig. 4. In die omgewing van 30° Suiderbreedte het negatiewe seeoppervlaktemperatuur-anomalieë ontwikkel tussen 40° en 80° O wat bygedra het tot 'n toename in die Hadley-sirkulasie.

Sover dit die sirkulasieveld betref, het afwykings in die laevlakwestewinde en afwykings in hoërvlakwestewinde teen Oktober 1991 oor die tropiese Suid-Indiese Oseaan sigbaar geword (fig. 5). 'n Omvangryke antisikloniese afwyking by 200 hPa het as sy middelpunt die suidelike Mosambiekkanaal gehad. Die Suid-Indiese Oseaan is op sy beurt weer gedomineer deur 'n sikloniese sirkulasiestelsel by 950 hPa met 'n straal van 2000 km met as middelpunt die eiland Mauritius wat op 20° S, 55° O lê.

Al hierdie tekens het, gebaseer op die vorige historiese ontledings, sterk gedui op die moontlikheid van 'n komende droogte oor suidelike Afrika. 'n Formele waarskuwing oor so 'n op hande synde droogte is dan ook aan die Waternavorsingskommissie deur die eerste skrywer voorgelê.

Reënvalneerslae oor die somerreënvalgebied was baie

laag teen midsomer en dagtemperature op grondvlak het reëlmatig 40 °C oorskry. Die afwykings in die atmosferiese sirkulasie wat daarvoor verantwoordelik was dat die invloed van vogtige lug oor die oostelike platorand onderdruk is, het voortgeduur. In Februarie 1992 (fig. 6) was daar nog steeds 'n geografiese omvangryke windafwyking in die vorm van 'n antisikloniese sirkulasie op 200 hPa oor die tropiese deel van die Suid-Indiese Oseaan. Aan sy westelike flank is dit gevoed deur 'n as van afwykings in westelike winde wat

FIGUUR 4: Anomaliekaarte van seeoppervlakte-temperatuur wat voortspruit uit die CAC-ontledings vir Augustus-September 1991 (bo) en Januarie-Februarie 1992 (onder).

FIGUUR 5: Kaarte vir windanomalieë afgelei van CAC-ontledings vir Oktober 1991. Die boonste een is vir 200 hPa; die onderste een vir 850 hPa. Gebiede waar baie hoë waardes voorkom, is ingesluit deur 'n gebroke lyn; groter as 6 m/s bo, 3 m/s onder.

dwarsoor suidelike Afrika by ongeveer 20° Suiderbreedte gelê het.

Konvergensie op hoë vlakke was ongeveer $-2 \times 10^{-5}/s$ oor Zimbabwe volgens die CAC-ontledings. Die sikloniese windafwyking op die lae 850 hPa-vlakke is versterk en het ooswaarts geskuiwe na 20° S, 75° O (fig. 6). Verder is dit opmerklik dat die afwykings in die noordwestelike winde oor die Suidoos-Atlantiese Oseaan versterk het, terwyl daar terselfdertyd 'n toename in seeoppervlakte-temperatuur langs die suidwestelike kus van Afrika was. Hierdie trog en warmer oseaangebiede mag die droogtetoestande oor die westelike platorand van suidelike Afrika verleng het.

Die droogtetoestand word miskien ten beste geïllustreer deur die langgolfuitstraling (LU) vir die 6-maandetydperk Oktober 1991 tot Maart 1992 in fig. 7. Oor Zimbabwe is die LU-afwykings $+12 \text{ W/m}^2$ (20° S, 30° O) en oor die Suid-Indiese Oseaan in kontras, -18 W/m^2 (20° S, 80° O). Hierdie afwykings dui op vertikale beweging. So 'n patroon pas natuurlik die konvektiewe dipoolhipotese wat in die vorige seksie uiteengesit is, uitstekend (fig. 6). Die geografiese gebied wat ingeslote is by die $+9 \text{ W/m}^2$ LU dui op die area waar die droogte die ergste gevoel is. Dit sluit Zimbabwe, die sentrale deel van Mosambiek, suidoostelike Botswana en die noordelike deel van Suid-Afrika in.

Die droë gebied, d.w.s. daár waar die LU positief was, was aan sy westelike flank ingeperk, maar het verder oor suidelike Madagaskar in 'n suidooswaartse rigting gestrek. In teenstelling hiermee het die oseaangebiede oos van Mauritius bonormale reënval ontvang, wat afgelei kan word van die negatiewe LU-afwykings oor dié gebied. Verder kan van die LU-inligting afgelei word dat die westelike derde van suidelike Afrika, te wete Angola, Namibië en die Kaapprovinsie van Suid-Afrika wes van 20° O, nie aan die droogtetoestand onderhewig was nie.

FIGUUR 6: Kaarte vir windanomalieë afgelei van CAC-ontledings vir Februarie 1991. Die boonste een is vir 200 hPa; die onderste een vir 850 hPa. Gebiede waar baie hoë waardes voorkom, is ingesluit deur 'n gebroke lyn; groter as 6 m/s bo, 3 m/s onder.

FIGUUR 7: Kaarte van langgolfuitstraling in W/m^2 volgens CAC-ontledings vir die tydperk Oktober 1991 – Maart 1992. Die anomalieveld verskyn bo. Droogtegebiede is daar waar die langgolfuitstraling meer as $6 W/m^2$ is. Die onderste paneel toon die standaardafwyking vir dieselfde gegewens aan.

Standaardafwykings van die LU-gegewens vir die somer word in fig. 7 weergegee en verteenwoordig interseisoenale veranderlikheid. Die grootste mate van veranderlikheid in konveksie was aanwesig oor die oseaaniese Intertropiese Konvergensiesone/tropiese sikloongebied noordoos van Madagaskar. 'n Sekondêre maksimum was geleë oor Botswana op $20^\circ S$ en tussen 20° en $25^\circ E$. Twee asse waar hoë veranderlikheid oor die droogtegeteisterde gebied voorgekom het, is sigbaar (fig. 7). Die een is oos van Zimbabwe tot by Madagaskar; die tweede meer suidelik langs $30^\circ E$ oor Suid-Afrika. Hierdie asse verteenwoordig uitverkose liggings van meridionale wolkstrokke wat kort tydperke van ligte reën vir suidelike Afrika veroorsaak het.

Trefkrag van die 1991-1992-droogte

Die duur van reënwolke oor suidelike Afrika vir die somer van 1991-1992 word in fig. 8 getoon. Die basiese wolk-inligting is verkry van die sensors aan boord van die METEOSAT-satelliet en verwerk deur algoritmes wat by die SADCC-droogtemoniteringsentrum in Zimbabwe ontwikkel is. Die duur van reënwolke is gewoonlik van 200 tot 500 uur oor die oostelike helfte van suidelike Afrika vir die Oktober-April-tydperk, behalwe oor die Limpopovallei waar die duur gewoonlik minder as 200 uur is. Die Natal-Transkeikus het oor die algemeen 'n wolksduur van meer as 500 uur gehad wat vergelykbaar is met die tropiese gebiede noord van $20^\circ S$ (fig. 8). Hierdie plaaslike hoë wolksduur kan waarskynlik toegeskryf word aan die nabyheid van die warm Agulhasstroom langs hierdie kuslyn.^{27,28}

Die 1989-1990-somer, waarvoor resultate nie hier getoon word nie, het wolksduur van meer as 300 uur oor die grootste deel van suidelike Afrika gehad. In kontras hiermee (fig. 8) is 'n duur van reënwolke van meer as 300 uur tydens die 1991-1992-seisoen nêrens op die kontinentale plato suid van

Angola en Zambië ($20^\circ S$) gevind nie. 'n Wolkstrook met 'n duur van minder as 100 uur het weswaarts versprei van die suidelike deel van Mosambiek, oor die Limpopovallei en tot in die sentrale deel van Botswana.

Daar kan nog verdere inligting oor die trefkrag van die droogte gevind word deur ondersoek in te stel na die reënvaltekort by reënvalstasies versprei oor die gebiede wat die droogte die sterkste gevoel het. Tekorte aan reënval, d.i. afwykings van die gemiddelde, vir die Oktober 1991 tot Maart 1992-tydperk, gebaseer op grondstasies, word in fig. 9 getoon.

Dit is duidelik dat die ernstige droogtetoestande voorgekom het oor die platorand van Zimbabwe wat oos

FIGUUR 8: Die duur van reënwolke oor suidelike Afrika vir die tydperk Oktober 1991 – April 1992 in ure soos verkry uit gegewens van die METEOSAT-satelliet. Algoritmes wat hiervoor gebruik is, is ontwerp by die SADCC-sentrum vir droogtemonitering in Zimbabwe.

FIGUUR 9: Tekorte in die somerreënval in mm vir die tydperk Oktober 1991 tot Maart 1992 vir die gebied wat die ergste onder die onlangse droogte deurgeloop het. Kontoure is vir 200 mm-intervalle en gemete waardes by stasies word aangetoon.

front. Die dorp Umtali het 759 mm minder reën as normaalweg gehad en Nyanga 789 mm minder. In reaksie hierop het die riviere wat hierdie gebied dreineer en deur Mosambiek vloei, soos die Limpopo en die Save, opgedroog. Inligting in die maandelikse nuusbriewe van die SA Weerburo en elders²⁹ dui daarop dat die reënval tussen 30% en 60% van die gemiddelde was oor die gebied as geheel vir die tydperk Oktober 1991 tot Maart 1992. Watervlakke in opgaardamme in die Transvaal het gedaal van 'n gemiddelde van 81% vol tot 46% vol wat 'n verlies van ongeveer 10^9 m³ water verteenwoordig. Damme in die opvanggebied van die Vaalrivier, 'n produktiewe landbougebied, se inhoud het van 87% tot 59% gedaal, wat 'n verlies van ook sowat 'n 10^9 m³ water beteken. Damme in die Oranjerivier het 32%, of 3×10^9 m³ water verloor.

DIE NAVORSINGSPROGRAM

Hierdie opwindende resultate is die produk van navorsingspogings wat 'n lang aanloop gehad het. Om hierdie navorsing in verband te plaas, mag dit insiggewend wees om vlugtig by die geskiedenis hiervan stil te staan.

Werk wat in die sewentigerjare³⁰ in die VSA gedoen is, het getoon dat daar temperatuur-anomalieë met enorme geografiese omvang in die oseane ontstaan en dat hierdie afwykings in die gemiddelde seeoppervlaktemperatuur lank in stand gehou word. Daar is ook getoon dat hierdie temperatuurafwykings statisties verband hou met reënvalpatrone oor die Noord-Amerikaanse vasteland.

Dit het voor die hand liggend gelyk dat hierdie soort studies ook vir Suid-Afrika van heelwat belang sou kon wees. Met die hulp van die destydse Nasionale Program vir Weer-, Klimaat- en Atmosferiese Navorsing van die destydse Koöperatiewe Wetenskaplike Programme, is hierdie navorsing van stapel gestuur by die destydse Nasionale Navorsingsinstituut vir Oseanologie van die WNNR op Stellenbosch. Die eerste belowende resultate³¹ is opgevolg deur 'n omvangryke en deeglike studie wat getoon het⁸ dat daar ook sulke seetemperatuurafwykings ontstaan in die gebiede naby aan Afrika, dat hulle ook 'n lang duur het³² en dat daar ook, soos in die geval van Noord-Amerika, telekonneksies tussen hierdie seetemperatuurafwykings en reënval oor suidelike Afrika bestaan.⁸

Daar is nogal heelwat weerstand by gevestigde weerkundiges teen hierdie bevindings ondervind. Die kritiek het veral gewentel om die gedagte dat bloot statistiese korrelasies weinig nut het aangesien die meganismes waardeur die een die ander sou beïnvloed, nie verstaan word nie.

Die navorsingsprojek wat op hierdie spesifieke probleem gerig is, het intussen, met die beëindiging van basiese navorsing binne die WNNR en die tot niet gaan van Nasionale Programme, na die Universiteit van Kaapstad verskuif. Die huidige werk, waaroor hier verslag gedoen word, is dan ook juis daarop gemik om die dinamiese meganismes in die atmosfeer vas te stel en hierdie bydrae toon van die suksesse wat hiermee behaal word.

Een van die ernstige oorblywende probleme is om navorsing te doen oor die meganismes waardeur die osean die atmosfeer beïnvloed en omgekeerd. Dit is belangrik om te weet *hoe* die getoonde afwykings in die gemiddelde seeoppervlaktemperatuur die atmosfeer beïnvloed. Voorlopige werk oor die warm Agulhasstroom,^{28,33,16} asook oor die

Subtropiese Konvergensie,³⁴ het alreeds getoon dat, in hierdie gevalle, die oseantemperature 'n groot en verreikende invloed op die oorliggende atmosfeer mag hê. Dit is duidelik dat hierdie navorsing voortgesit moet word as ons 'n duidelike begrip wil vorm van die wisselwerking tussen die verskillende stelsels wat vir Suid-Afrika se weer en klimaat verantwoordelik is.

Dit sou natuurlik ook belangrik wees om te probeer vasstel waarom sekere temperatuurafwykings aan die seeoppervlak ontstaan wat dan aanleiding skyn te gee tot reënvalafwykings oor suidelike Afrika. Hieroor is alreeds heelwat navorsing gedoen,^{3,23,35,36} maar hoofsaaklik slegs in die gebied suid en suidwes van Afrika en nie in die Mosambiekkanaal of in die tropiese gebiede van die Indiese Oseaan nie. Laasgenoemde is navorsing wat, in samewerking met lande soos Madagaskar, Mosambiek, Mauritius en Kenia, beslis die aandaan van Suid-Afrikaanse navorsers verdien.

Werk in die tropiese deel van die Indiese Oseaan³⁷⁻³⁹ het tot dusver gekonsentreer op skommelings in die seeoppervlaktemperatuur en die gepaardgaande oppervlakwinde, maar nie op die oorsake vir die afwykings in die seetemperatuur nie. Dit is in die verbygaan interessant om daarop te let dat hierdie temperatuurafwykings in die Indiese Oseaan wat met die SOI verband hou, dié in die oostelike Stille Oseaan voorafgaan.

Uit die oogpunt van navorsingsbestuur is dit interessant om daarop te let dat, alhoewel hierdie navorsing verskuif het van sowel standplaas as befondser en alhoewel 'n hele aantal studente deur hierdie program hulle nagraadse kwalifikasies verwerf het, dit nogtans ongeveer 10 jaar geduur het voordat die projek werklik op 'n hoogtepunt van wetenskaplike produktiwiteit gekom het. Dit is gedeeltelik te wyte aan die feit dat die nodige datastelle eers onlangs beskikbaar geword het.⁸

GEVOLGTREKKINGS

Uit die navorsingsresultate van hierdie program is dit dus duidelik dat die struktuur van plaaslike klimatologiese afwykings, wat gepaardgaan met reënvalseisoene wanneer daar 'n gebrek aan reënval is, sekere kenmerkende eienskappe het, insluitende dié van die 1991-1992-droogte in suidelike Afrika. Hierdie struktuur is natuurlik nie die enigste nie, maar tog skynbaar wel een van die belangrikstes.

Een van die sterkste ooreenkomste is 'n klimatologiese dipool in die atmosferiese sirkulasie wat die Suid-Indiese Oseaan met suidelike Afrika verbind. Aktiewe konveksie word by die eerste pool (20° S, 80° O) aangetref, terwyl dit onderdruk word in die gebied wat 20° S, 30° O omring. 'n Afwyking in hierdie Walkertipe-sirkulasie skyn die onderliggende meganisme te wees, en ontwikkel in reaksie tot die lae fase van die ENSO toenames in seeoppervlaktemperatuur in die Suid-Indiese Oseaan, en word versterk tydens die oostelike fase van die KTS.

Tydens droë somers oor suidelike Afrika word 'n sirkulasie-afwyking oor Madagaskar aangetref wat bestaan uit 'n groot antisikloniese beweging in die bolug en 'n sikloniese sirkulasie daaronder. Afwykings wat 'n toename in suidelike winde oor die Mosambiekkanaal veroorsaak, laag in die atmosfeer, en soortgelyke westelike winde noord van Madagaskar, trek vogtige lug weg van die oostelike platorand van Afrika. Reënvaltekorte van meer as 500 mm vir 'n reënseisoen van Oktober tot Maart kan dan voorkom,

soos waargeneem tydens die 1991-1992-droogte. Dit hang dan saam met konvergensies in die bolug en 'n afname in die amplitude van subtropiese trêe.

Noudat die bestaan en die waarskynlike rol van hierdie klimatologiese dipool tussen suidelike Afrika en die Suid-Indiese Oseaan getoon is, en die moontlike aandrywingskragte en gevolge vasgestel is, sal die volgende probleem wat navorsingsaandag vereis, die beweging van hierdie dipool wees. Hierdie navorsing sal veral aandag moet gee aan watter faktore verantwoordelik is vir klein verskuiwings in die geografiese ligging van die dipool, sowel op 'n interseisoenale as 'n interjaarlikse basis.

Die implikasies van hierdie navorsing en resultate is belangrik. Langtermynvoorspellings van somerreënval kan nou moontlik in die vooruitsig gestel word. Dit sou o.a. moet afhang van die vroegtydige vasstelling van plaaslike afwykings in die gemiddelde seeoppervlaktemperatuur, in die 850 en 200 hPa-winde, sowel as in die LU-, ENSO- en KTS-indekse soos dit blyk uit die daaglikse weerontledings wat deur die SA Weerburo ontvang word as numeriese produkte vir die hele aarde. Nieu samewerking tussen die Weerburo en navorsingsgroepe aan universiteite sou hiervoor vereis word.

Hierdie model (fig. 3) is dus 'n opwindende verklarende model. Dit is egter belangrik om te beklemtoon dat dit bloot 'n konsepsionele diagnostiese model is wat beslis verdere ontleding, ondersoek en aanpassing sal moet ondergaan. Die voorspellingsvermoë van die model is ook grootliks statisties van aard, d.w.s. dit dui slegs op die *waarskynlikheid* van afwykings in die somerreënvalpatroon. Nieteenstaande al hierdie voor die hand liggende beperkings van die model, het sulke voorspellings die potensiaal om in die toekoms 'n belangrike invloed op die bestuur van landbou-aktiwiteite en op die bestuur van waterbronne in die hele suidelike Afrika te hê.

DANKBETUIGINGS

Die navorsing waarop hierdie bydrae berus, is finansiële ondersteun deur die Stigting vir Navorsingsontwikkeling se Spesiale Program vir Klimaatsverandering en vir die *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE). Ons bedank mnr. C. Matarira van die Zimbabwiese Weerkundige Hoofkwartier vir SADCC-reënvalwolkbeelde en vir reënvalontledings. Die diagnostiese model is deels gebaseer op werk wat deur mnr. B. Pathack van die Weerkundige Diens van Mauritius gedoen is. Ons bedank die Waternavorsingskommissie in die besonder vir aanmoediging en volgehoue finansiële ondersteuning.

LITERATUURVERWYSINGS

- Janowiak, J.E. (1988). An investigation of interannual rainfall variability in Africa, *J. Climate*, 1, 240-255.
- Tyson, P.D. (1981). Atmospheric circulation variations and the occurrence of extended wet and dry spells over South Africa, *Intl J. Climatol.*, 1, 115-130.
- Tyson, P.D. (1984). The atmospheric modulation of extended wet and dry spells over South Africa, 1958-1978, *Intl J. Climatol.*, 4, 621-635.
- Van Heerden, J., Terblanche, D.E. & Schulze, G.C. (1988). The southern oscillation and South African summer rainfall, *J. Climatol.*, 8, 577-597.
- Lindesay, J.A. (1988). South African rainfall, the southern oscillation and a southern hemisphere semi-annual cycle, *J. Climatol.*, 8, 17-30.
- Mason, S.J. & Tyson, P.D. (1992). The modulation of sea surface temperature and rainfall associations over southern Africa with solar activity and the quasi-biennial oscillation, *J. geophys. Res.*, 97, 5847-5856.
- Nicholson, S.E. & Entekhabi, D. (1987). Rainfall variability in equatorial and southern Africa: relationship with sea surface temperatures along the SW coast of Africa, *J. Clim. appl. Met.*, 26, 561-578.
- Walker, N.D. (1990). Links between South African summer rainfall and temperature variability of the Agulhas and Benguela Current systems, *J. geophys. Res.*, 95, 3297-3319.
- Pathack, B. (1993). Modulation of South African summer rainfall by global climatic processes, Ph.D. thesis, Department of Oceanography, University of Cape Town.
- Lyons, S.W. (1991). Origins of convective variability over equatorial southern Africa during austral summer, *J. Climate*, 4, 23-39.
- Matarira, C.H. & Jury, M.R. (1992). Contrasting meteorological structure of intra-seasonal wet and dry spells in Zimbabwe, *Intl J. Climatol.*, 12, 165-176.
- Chen, T.-C & Tzeng, R.-Y. (1990). Global scale intraseasonal and annual variation of the divergent water vapor flux, *Met. Atm. Phys.*, 44, 133-151.
- Harrison, M.S.J. (1986). *A synoptic climatology of South African rainfall variations*, Ph.D. thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 341 pp.
- Jury, M.R., Pathack, B. & Sohn, B.J. (1992). Spatial structure and interannual variability of summer convection over southern Africa and the SW Indian Ocean, *S. Afr. J. Sci.*, 88, 275-280.
- Jury, M.R. & Pathack, B. (1991). A study of climate and weather variability over the tropical SW Indian Ocean, *Met. Atm. Phys.*, 47, 37-48.
- Jury, M.R. (1992). Marine atmospheric boundary layer response to the Agulhas Current: composite aircraft observations, *J. geophys. Res.*, submitted.
- Jury, M.R. & Pathack, B. (1993). Composite climatic patterns associated with extreme modes of summer rainfall over Southern Africa: 1975-1984, *Theor. Appl. Climatol.*, in press.
- Jury, M.R., Pathack, B. & Waliser, D. (1992). Satellite OLR and microwave data as a proxy for rainfall in the southern Africa-Madagascar region, *Intl J. Climatol.*, submitted.
- Nicholson, S.W., Kim, J. & Hoopingarner, J. (1988). *Atlas of African rainfall and its interannual variability*, Florida State University, 237 pp.
- Arkin, P.A., Kousky, V.E., Janowiak, J.E. & O'Lenic, E.A. (1986). *Atlas of the tropical and subtropical circulation derived from NMC operational analyses*, NOAA Atlas 7 (Climate Analysis Centre, Washington, D.C.).
- Gruber, A., Varnadore, M., Arkin, P.A. & Winston, J.S. (1986). Monthly and seasonal outgoing longwave radiation and anomalies, *NOAA Tech. Rep.*, NESDIS 26 (Washington, D.C.).
- Hapert, M.S. & Ropelewski, C.F. (1989). *Atlas of tropical sea surface temperatures and surface winds*, NOAA Atlas 8, (Climate Analysis Centre, Washington, D.C.), 226 pp.
- Lutjeharms, J.R.E. & Van Ballegooyen, R.C. (1988). The Agulhas Current retroflection, *J. phys. Oceanogr.*, 18, 1570-1583.
- Shannon, L.V., Lutjeharms, J.R.E. & Agenbag, J.J. (1989). Episodic input of Subantarctic water into the Benguela region, *S. Afr. J. Sci.*, 85, 317-322.
- Jury, M.R., Pathack, B., Wang, B., Powell, M.D. & Raholijao, N. (1992). A destructive cyclone season in the SW Indian Ocean: January-February 1984, *S. Afr. J. Geogr.*, in press.
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S. & Wang, X. (1992). Observed tropospheric biennial variability and its relationship to the southern oscillation, *J. Climate*, 5, 594-614.
- Jury, M.R., Valentine, H.R. & Lutjeharms, J.R.E. (1992). Summer rainfall on the southeast coast of South Africa: influence of the Agulhas Current, *J. appl. Met.*, in press.
- Lutjeharms, J.R.E., Mey, R.D. & Hunter, I.T. (1986). Cloud lines over the Agulhas Current, *S. Afr. J. Sci.*, 82, 635-640.
- Laing, M. (1992). The season so far, July 1991 - March 1992, *Newsletter S. Afr. Weather Bureau*, 516, 30-32.
- Namias, L. & Born, R.M. (1970). Temporal coherence in the North Pacific sea surface temperature patterns, *J. geophys. Res.*, 75, 5922-5955.
- Gillooly, J.F. & Lutjeharms, J.R.E. (1984). The ocean and climate: large-scale ocean-atmosphere interactions in the Southern Hemisphere, *S. Afr. J. Sci.*, 80, 36-40.
- Walker, N.D. (1987). Interannual sea surface temperature variability and associated atmospheric forcing within the Benguela system, *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 5, 121-132.

33. Jury, M.R. & Courtney, S. (1991). A transition in weather over the Agulhas Current, *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 10, 159-171.
34. Walker, N.D. & Mey, R.D. (1988). Ocean-atmosphere heat fluxes within the Agulhas Retroflexion region, *J. geophys. Res.*, 93, 15473-15483.
35. Shannon, L.V., Agenbag, J.J., Walker, N.D. & Lutjeharms, J.R.E. (1990). A major perturbation in the Agulhas retroflexion area in 1986, *Deep-Sea Res.*, 37, 493-512.
36. Shannon, L.V., Lutjeharms, J.R.E. & Nelson, G. (1990). Causitive mechanisms for intra-annual and interannual variability in the marine environment around Southern Africa, *S. Afr. J. Sci.*, 86, 356-373.
37. Cadet, D.L. (1985). The southern oscillation over the Indian Ocean, *J. Climatol.*, 5, 189-212.
38. Cadet, D.L. & Diehl, B.C. (1984). Interannual variability of surface fields over the Indian Ocean during recent decades, *Mon. Weath. Rev.*, 112, 1921-1935.
39. Blazejewski, H., Cadet, H.L. & Marsal, O. (1986). Low-frequency sea surface temperature and wind variations over the Indian and Pacific Oceans, *J. geophys. Res.*, 91, 5129-5132.