

ZIRKULATIONSBEDINGTE VERTEILUNGSMUSTER VON NIEDERSCHLAGSANOMALIEN IM TROPISCHEN BEREICH VON SÜDAFRIKA BIS AUSTRALIEN

Mit 5 Abbildungen und 2 Tabellen

JUCUNDUS JACOBET

Summary: Patterns of rainfall anomalies and corresponding circulations in the tropics from Southern Africa to Australia

Tropical rainfall and upper circulations not only show some longterm trends but also interannual variations which allow one to study different patterns of anomalies on the basis of selected years or seasons with significant deviations. Within the tropics from Southern Africa to Australia four summer monsoonal seasons, with different distributions of coherent rainfall anomalies, are identified on the basis of monthly rainfall data of 50 stations within the period 1968–85, using a special rainfall index which compensates for different rainfall levels and considers different orders of variations. The corresponding circulation patterns have been studied by means of factor analysis of 200 hPa-pentad-windfields, deviations of the seasonally-averaged 200 hPa zonal wind component and 700 hPa relative vorticity, and of frequency distributions of above-average 700 hPa cyclonic wave indices within two tropical latitudinal bands. The upper wind fields extending from the equator up to 48 °S allow one to recognize the interactions between tropical easterlies and extratropical westerlies, and demonstrate quite different patterns of variations which partly fit rather simple concepts of strengthened or weakened easterlies, but partly reveal some other features such as varying positions of anticyclonic centres, upper troughs or wave maxima, transequatorial flows with extended northerlies or spreading westerlies, and alternating tendencies of lower level vorticities.

1. Einleitung

Die Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation in den Tropen manifestieren sich am sinnfälligsten in korrespondierenden Niederschlagsschwankungen (vgl. FLEER 1981, S. 3), die auch ohne extreme Ausmaße von Dürre- oder Überschwemmungsereignissen Naturlandschaftshaushalt und Volkswirtschaft betroffener Regionen nachhaltig beeinflussen. Derartige Anomalien sind längst nicht auf einige Ausnahmegebiete beschränkt, sondern mit unterschiedlichen Häufigkeiten und Intensitäten über die globalen Tropen verbreitet. Darüber

hinaus läßt sich nachweisen, daß signifikante Niederschlagsabweichungen nicht zufällig verteilt oder als isolierte Einzelereignisse auftreten, sondern verschiedene Tropenregionen in großräumigen Fernverbindungen auf unterschiedliche Art und Stärke anomaliegekoppelt sind (FLEER 1981, BEHREND 1984). Allerdings bedeuten Teleconnectionen keine Ausschließlichkeit im Auftreten von Anomaliekombinationen, vielmehr können sich in Abhängigkeit von unterschiedlichen Entwicklungstendenzen und Zustandsformen der atmosphärischen Zirkulation in Einzeljahren oder -jahreszeiten durchaus verschiedene Anomaliekombinationen zwischen großräumig verbundenen Tropenregionen herausbilden. Diese interannuelle Variabilität, die sich längerfristigen Häufigkeitstendenzen bevorzugter Anomaliekombinationen überlagert, besitzt ihre Bedeutsamkeit nicht nur in der Manifestierung weiterer prinzipiell möglicher Zustandsformen mit andersartigen Anomaliekombinationen, sondern auch in der Enthüllung differenzierterer Zirkulationssteuerungen als sie sich bei integrativer Betrachtung über längere Zeiträume oftmals ergeben (vgl. etwa KRÜGER and WINSTON 1974). Nachdem derartige interannuelle Schwankungen bereits für die Sommermonsunzeit im Bereich vom nordafrikanischen Sahel bis zum indischen Subkontinent dargestellt worden sind (JACOBET 1988), sollen im folgenden für einen südhemisphärischen Ausschnitt der Tropen von Südafrika bis Australien analoge Variabilitäten im großräumigen Zirkulationsgeschehen und im Verteilungsmuster zugehöriger Niederschlagsanomalien diskutiert werden.

2. Niederschlagsanomalien

Die vergleichende Darstellung von Niederschlagsabweichungen für Gebiete kontinentaler Ausmaße erfordert eine Größe, die unabhängig von der meist breit streuenden absoluten Niederschlagsmenge der verschiedenen Einzelstationen ist. Absolute mm-

Abweichungen von langfristigen Mittelwerten sind aufgrund der positiven Korrelation ihrer mittleren Schwankungsgröße etwa mit der mittleren Jahresniederschlagsmenge dazu genauso wenig geeignet wie relative Anteilswerte (etwa aktuelle Abweichungen in Prozent mittlerer Niederschlagsmengen ausgedrückt) aufgrund einer entsprechenden negativen Korrelation. Häufigste Verwendung haben deshalb standardisierte Anomalieindizes gefunden (vgl. KATZ and GLANTZ 1986), deren Division von aktueller Niederschlagsabweichung durch die Standardabweichung der gesamten Niederschlagsreihe die gewünschte Unabhängigkeit der Abweichungsgröße von der absoluten Niederschlagsmenge gewährleistet. Nachteil dieser Standardisierung ist allerdings die gleichzeitige Egalisierung unterschiedlicher Schwankungsbeträge verschiedener Stationen (z. B. werden um einen beliebigen Faktor differierende Abweichungen zweier Stationen, die sich bei gleichen mittleren Niederschlagsmengen in der Standardabweichung um denselben Faktor voneinander unterscheiden, jeweils in gleiche Anomalien transformiert). Deshalb ist ein alternativer Niederschlagsindex NSI entwickelt worden, der als Mittelweg zwischen absoluter Abweichung und relativer Anteilgröße verstanden werden kann:

$$\text{NSI} = \text{Abw} * \left[\left(\frac{\text{MF}}{\text{MJN}} - 1 \right) * f(\text{MF}) + 1 \right]$$

mit Abw: Niederschlagsabweichung vom Mittelwert;

MJN: mittlerer Jahresniederschlag;

MF: Maßstabsfaktor

f: Bestimmungsfaktor ($0 < f < 1$)

Für $f = 0$ würden sich absolute Abweichungen, für $f = 1$ relative Anteilswerte ergeben. Gesucht ist mithin ein dazwischengelegener Wert, der Unkorreliertheit zwischen den Standardabweichungen des resultierenden Niederschlagsindex aller betrachteten Stationen und deren mittleren Jahresniederschlagsmengen erreicht. Es erweist sich, daß dieser Wert von der Wahl des Maßstabsfaktors MF abhängt und die Menge aller Punkte (MF, $f(\text{MF})$), die eine derartige Unkorreliertheit erreichen, auf einem flachen Hyperbelast liegen, der sich bei genügend großem Stationskollektiv mit hinreichender Genauigkeit durch eine lineare Beziehung approximieren läßt: $f(\text{MF}) \approx a * \text{MF} + b$. Ausdrücklich vermerkt sei, daß die Geradenparameter a und b bei Veränderungen der Stationsanzahl nur mehr vernachlässigbar variieren, wenn das Gesamtkollektiv hinreichende Mächtigkeit behält. Bei einmal festgelegtem Maßstabs-

faktor resultiert letztendlich ein Niederschlagsindex, der unterschiedliche Niveaus absoluter Niederschlagsmengen ausgleicht und dennoch unterschiedliche Schwankungsbeträge verschiedener Stationen mitberücksichtigt.

Zur praktischen Anwendung wurde aus den *Monthly Climatic Data for the World* ein global-tropisches Gesamtkollektiv von 429 Stationen mit monatlichen Niederschlagsreihen aus dem Zeitraum 1968 bis 1985 zusammengestellt. Niederschlagsanomalien, die im folgenden diskutiert werden, beziehen sich also auf Mittelwerte dieser 18jährigen Periode, die zwar zu kurz für Zeitreihenanalysen wäre, aber die Untersuchung interannueller Variabilitäten ermöglicht. Als Maßstabsfaktor zur NSI-Bestimmung wurde ein Wert gewählt, der die Standardabweichung des Niederschlagsindex für das Gesamtkollektiv den Wert 100 annehmen läßt; auch dieser Wert variiert nur mehr geringfügig bei nicht zu großen Veränderungen des Gesamtkollektivs. Maßstabs- und Bestimmungsfaktor in der Definitionsgleichung des Niederschlagsindex bleiben auch deshalb für das Teilkollektiv der hier betrachteten 50 Stationen aus dem Bereich Südafrikas und Australiens nicht nach kontinental begrenzten, sondern nach global-tropischen Verhältnissen bemessen.

Die in Tab. 1 und Abb. 1 ausgewiesene Form von Niederschlagsanomalien ergibt sich schließlich aus folgenden Auswertungsschritten: um individuelle Abweichungen einzelner Stationen, wie sie gerade beim punkthaft ermittelten Niederschlag und seinem betont konvektiven Charakter in den Tropen verstärkt zu erwarten sind, nicht unverhältnismäßig in den Vordergrund treten zu lassen, wurde zunächst eine subregionale Zusammenfassung von Einzelstationen auf der Basis eines ähnlichen Niederschlagsjahresganges, vergleichbarer mittlerer Korrelationskoeffizienten aller zusammenzufassenden Stationen untereinander und der räumlich verbindenden Längen- wie Breitenlage vorgenommen. Für diese Subregionen lassen sich auf Monatsbasis vorzeichenspezifische Anomalieindizes berechnen, indem die Summen aller positiven und aller negativen NSI-Werte jeweils durch die Gesamtzahl der Stationen dividiert werden. Soweit einer dieser Indizes für mindestens zwei Monate in Folge betragsmäßig den Wert ihrer gemeinsamen Standardabweichung überschreitet, wird für diese Anomaliephase (*spell*) der mittlere NSI-Wert jeder betroffenen Station bestimmt. Dieses Verfahren impliziert den Vorteil, zeitliche Verschiebungen im Auftreten von Anomalien über kontinentalen Großräumen zu berücksichtigen, dennoch eine subregionale Vereinheitlichung über Einzelstations-

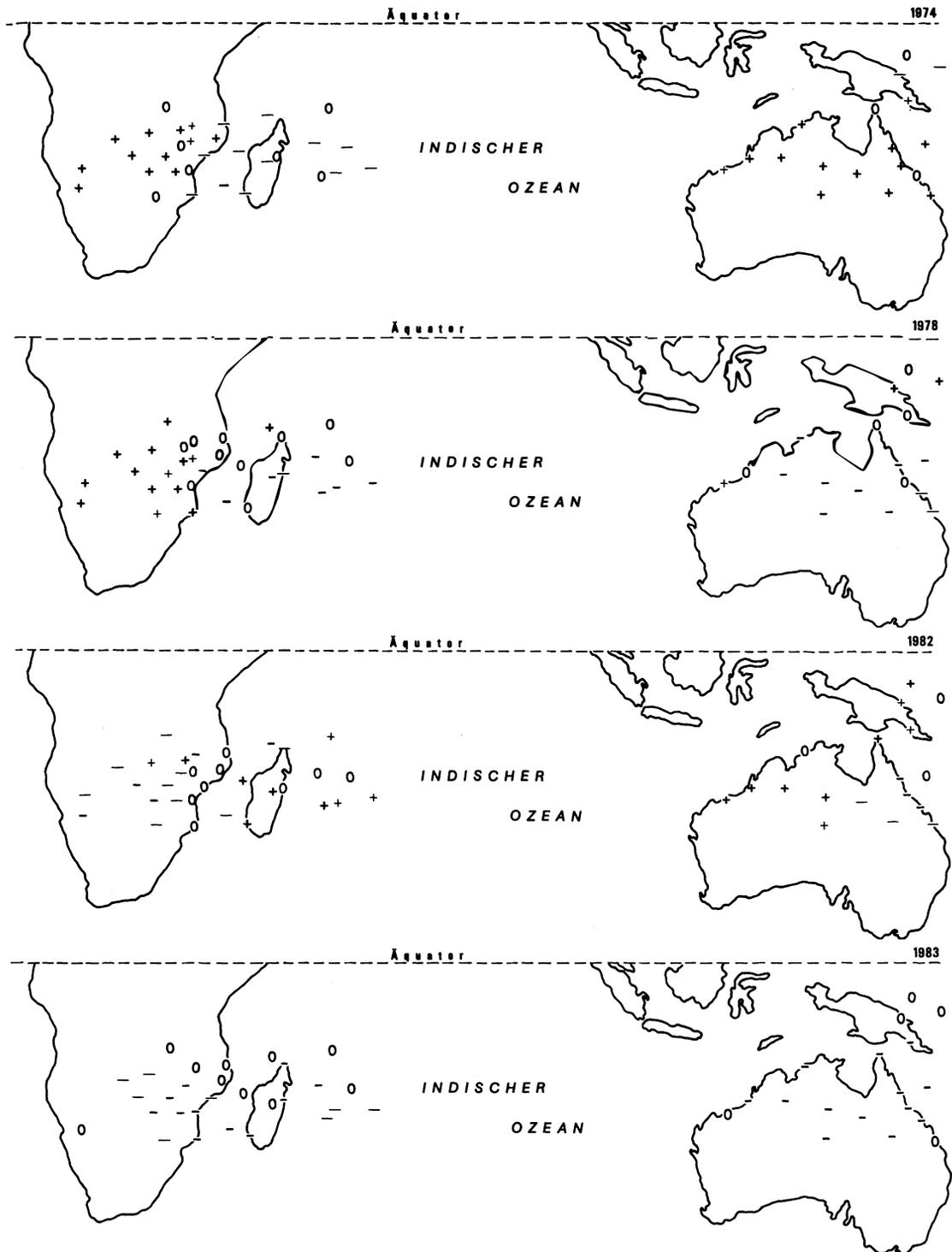


Abb. 1: Klassifizierte mittlere Niederschlagsindizes mindestens zweimonatiger Anomaliephasen während vier verschiedener südhemisphärischer Sommermonsunzeiten (Abweichungen innerhalb der halben Standardabweichung sind als „0“, außerhalb der vollen Standardabweichung als verstärkte Symbole markiert)

Classified mean rainfall indices of anomaly spells of at least two months duration during four different summer monsoon seasons in the southern hemisphere (deviations less than half the standard deviation are indicated by the symbol "0", deviations greater than the total standard deviation by symbols "+", or "-" respectively in bold print)

Tab. 1: Mittlere Niederschlagsindizes mindestens zweimonatiger Anomaliephasen während vier verschiedener südhemisphärischer Sommermonsunzeiten für tropische Niederschlagsstationen von Südafrika bis Australien

Mean rainfall indices of anomaly spells of at least two months duration during four different summer monsoon seasons in the southern hemispheric tropics from Southern Africa to Australia

	1974	1978	1982	1983		1974	1978	1982	1983
Kasama	+ 23,4	+ 150,7	- 71,8	+ 9,9	Tamatave	+ 36,7	- 95,1	+ 42,7	- 116,7
Vila Cabral	+ 72,3	- 48,8	- 117,8	+ 49,5	St. Denis	- 11,0	- 120,0	+ 126,2	- 87,4
Lilongwe	+ 101,8	+ 14,3	+ 112,9	.	Plaisance	- 97,5	- 130,9	+ 75,9	- 92,5
Kabwe	+ 200,9	+ 162,8	+ 96,0	- 54,1	Rodrigues	- 78,6	- 121,8	+ 96,1	- 89,9
Mongu	+ 155,4	+ 170,8	- 80,2	- 58,2	St. Brandon	- 96,2	- 16,3	- 2,6	- 8,7
Grootfontein	+ 219,4	+ 337,2	- 84,4	.	Ile Tromelin	- 84,2	- 110,6	- 1,9	- 136,3
J.G. Strijdom	+ 298,8	+ 164,6	- 134,1	+ 30,2	Agalega	- 17,0	- 42,5	+ 50,0	+ 22,5
Pietersburg	+ 6,5	+ 80,2	- 79,7	- 52,0	Port Hedland	+ 62,5	+ 66,5	+ 174,8	- 31,1
Chipinga	+ 186,6	+ 133,1	- 86,7	- 165,2	Broome	+ 358,9	- 49,4	+ 486,8	- 170,1
Bulawayo	+ 220,5	+ 309,0	- 139,6	- 195,0	Darwin	+ 124,4	- 182,1	+ 23,0	- 138,5
Livingstone	+ 375,5	+ 145,6	- 110,1	- 57,7	Halls Creek	+ 425,1	- 183,1	+ 300,6	- 111,8
Harare	+ 160,4	+ 91,2	- 99,1	- 111,1	Tennant Creek	+ 216,5	- 158,1	+ 196,1	- 117,7
Tete	- 33,1	+ 100,8	- 55,3	- 122,6	Alice Springs	+ 315,1	- 143,6	+ 78,9	- 103,4
Chileka	+ 73,7	+ 96,4	- 10,9	.	Mount Isa	+ 554,0	- 208,1	- 52,0	- 176,3
Nampula	+ 112,0	+ 35,3	- 9,7	- 39,2	Longreach	+ 251,9	- 109,3	- 50,3	- 177,9
Porto Amelia	- 94,7	- 14,5	- 2,3	- 2,3	Gladstone	+ 214,3	- 80,1	- 75,3	- 23,5
Iles Glorieuses	- 86,0	+ 307,9	- 169,1	+ 25,9	Mackay	- 9,0	- 55,3	- 114,1	- 179,4
Diego Suarez	- 194,6	- 34,6	- 66,0	- 143,2	Townsville	+ 426,8	- 6,0	- 115,7	- 225,1
Tananarive	- 85,6	- 156,2	+ 253,4	- 15,1	Cairns	+ 248,1	- 139,5	- 186,0	- 251,5
Ile Juan de Nova	- 64,7	- 48,9	+ 119,9	- 17,7	Willis Island	+ 248,6	- 174,7	- 41,5	- 130,4
Quelimane	- 80,0	- 131,8	+ 16,9	- 90,4	Thursday Island	- 39,5	- 37,2	+ 100,6	- 197,4
Beira	- 0,5	- 18,3	+ 8,7	- 125,7	Port Moresby	+ 59,2	- 20,6	+ 99,2	- 172,1
Inhambane	- 53,8	+ 185,1	+ 46,4	- 108,1	Madang	- 66,4	+ 102,8	+ 62,9	- 4,5
Ile Europa	- 177,9	- 218,6	- 60,2	- 123,5	Rabaul	- 89,4	+ 116,0	- 17,7	+ 6,9
Tulear	- 65,1	- 39,1	+ 240,4	- 108,4	Momote	- 27,4	- 36,3	+ 125,1	- 45,3

Variabilitäten hinaus zu erzielen, dabei auch teilräumliche Differenzierungen zu erfassen und in der resultierenden Einzelstations-Darstellung kohärente Verteilungsbilder zu liefern.

Konzentriert man sich auf die südhemisphärische Sommermonsunzeit von Dezember bis März, so treten während des 18jährigen Zeitraums von 1968 bis 1985 im Untersuchungsraum von Südafrika bis Australien vier Jahreszeiten mit unterschiedlichen, markanten Verteilungsmustern zwei- bis viermonatiger Niederschlagsanomaliephasen hervor, deren Einzelwerte in Tab. 1 explizit aufgelistet und in Abb. 1 nach Signifikanzstufen klassifiziert wiedergegeben sind (innerhalb der $\sigma/2$ -Schwelle als insignifikant, außerhalb der σ -Schwelle als hochsignifikant). Die Sommermonsunzeit von 1974 zeigt dabei verbreitet positive Anomalien über beiden kontinentalen Gebieten, während im westlichen Indischen Ozean Negativabweichungen vorherrschen. 1978 bringt ähnliche Verhältnisse im afrikanischen Sektor, aber trockenere Bedingungen im mittleren und östlichen

Australien. 1982 zeigt demgegenüber eine generelle Umverteilungstendenz im afrikanischen Großraum (Negativanomalien über dem Kontinent, positive Abweichungen über dem West-Indik) und feuchtere Verhältnisse im Bereich Australiens mit trockeneren Bedingungen im östlichen Teil. 1983 schließlich bringt von einigen Insignifikanz-Ausnahmen abgesehen in allen stationsbesetzten Großräumen generell Negativanomalien.

3. Erfassung großräumiger Zirkulationsverhältnisse

Zur Untersuchung der zugehörigen, interannuell variierenden Zirkulationsverhältnisse wurden tägliche Gitternetzpunktfelder der horizontalen Windkomponenten im 200- und 700 hPa-Niveau herangezogen, die bei einem Punktabstand, der einer fünf Längengrad äquivalenten Äquidistanz einer Mercator-Projektion entspricht, bis 48,1 °S und damit bis über den Wechselwirkungsbereich zwischen tro-

pischer und außertropischer Zirkulation hinausreichen. Die vorliegende Analyse der Strömungsverhältnisse stützt sich dabei auf folgende vier Vorgehensweisen:

a) Faktorenanalyse der 200 hPa-Höhenströmung während der vier genannten Jahreszeiten mit unterschiedlichen Anomalieverteilungen. Dabei fungieren die Windfelder als Variablen und die Anzahl der Gitternetzpunkte als Anzahl der Fälle (cases). Um ein vertretbares Verhältnis zwischen Variablenzahl und Fallanzahl zu gewährleisten und um einen Teil untergeordneter Variabilität vorab herauszufiltern, wurden als Eingangsvariable nicht Einzeltages-, sondern Pentaden-Felder verwendet. Die resultierenden Windfelder der Faktorenwerte repräsentieren die wichtigsten voneinander unabhängigen Steuerungstendenzen der Höhenströmung im betrachteten Zeitausschnitt, die (z. B. saisonal) unterschiedlichen Erklärungsanteile der einzelnen Faktoren an der Gesamtvarianz spiegeln die unterschiedlich starke Gewichtung dieser unabhängigen Steuerungstendenzen in verschiedenen Teilzeiträumen (z. B. Jahreszeiten) wider.

b) Eine wichtige Rolle für die Dynamik der tropischen Zirkulation spielen Lage und Intensität von tropischer Ostströmung und außertropischer Westdrift, die sich in ihrer unterschiedlichen Ausprägung als Abweichungen der zonalen Windkomponente von mittleren Verhältnissen darstellen lassen. Dabei werden jahreszeitlich gemittelte Windfelder des 200 hPa-Niveaus zugrundegelegt, als Bezugsgröße der saisonalen Abweichungen zeitlich entsprechende Mittelwerte des 18jährigen Gesamtzeitraums von 1968 bis 1985 verwendet und die resultierenden Abweichungsgrößen in Form interpolierter Isanomalien dargestellt. Positive Abweichungen meinen jeweils richtungsabhängige Verstärkungen der vorzeichenspezifischen mittleren Zonalkomponente (kräftigere Ost- bzw. Westströmung), negative Abweichungen analoge Abschwächungen. Die Äquidistanz der Isanomalien wurde als 0.5facher Wert der über alle tropischen Gitternetzpunkte gemittelten Standardabweichung festgelegt.

c) Neben der steuernden Höhenströmung sind auch die stärker den energetischen Erdoberflächeneinflüssen ausgesetzten Verhältnisse der unteren Troposphäre zu berücksichtigen. Gerade das 700 hPa-Niveau zeigt in den Tropen verbreitet Wellenerscheinungen (easterly waves), die mit ihren Divergenz- und Konvergenzgebieten Verbreitung und Ausmaß von Niederschlagsereignissen wesentlich beeinflussen. Ein Zirkulationsparameter, der Stromlinienkrümmung und Lateralscherung quantitativ

mißt und damit Vorzeichen und Intensität von Wellenbewegungen erfaßt, ist die Vertikalkomponente der relativen Wirbelgröße ζ . In kartesischen Koordinaten läßt sie sich ausdrücken als

$$\zeta = \frac{\delta v}{\delta x} - \frac{\delta u}{\delta y}$$

(vgl. HOLTON 1979, S. 83) und damit durch endliche Differenzen der horizontalen Windkomponenten u und v approximieren. Angewandt auf jahreszeitlich gemittelte Windfelder des 700 hPa-Niveaus und ausgedrückt als Abweichungen vom zeitlich entsprechenden 18jährigen Mittelwert ergeben sich wieder interpolierte Isanomalien, deren Äquidistanz analog zu Punkt b) festgelegt wurde. Positive Abweichungen bedeuten eine relative Verschiebung zur zyklonalen, negative zur antizyklonalen Seite hin.

d) Um weitere Aufschlüsse über die Verbreitung zyklonaler Wellenstrukturen zu erhalten, sind räumliche Häufigkeitsverteilungen eines intensitätsabgestuften Zyklonalwellenindex erstellt worden. Dieser Index mißt den Betrag der Windrichtungsdifferenzen aller zyklonal gekrümmten, zonal oder meridional benachbarten Windvektor-Paare in jeder aufeinanderfolgenden, 10 Längen- und Breitengrade umfassenden Ausschnittregion. Da flache Wellen sehr oft erkennbare Wetterwirksamkeiten vermissen lassen (RIEHL 1979, S. 336), sind die prozentualen Häufigkeiten pro Einzeljahreszeit nur für überdurchschnittliche Indexwerte ausgezählt und schließlich in zonalen Verteilungsspektren für die tropischen Breitenstreifen 0–10°S und 10–20°S dargestellt worden. Derartige Spektren lassen längen- und breitengerichtete Verlagerungen der Häufigkeitsextrema erkennen und ermöglichen damit Rückschlüsse auf unterschiedliche Lageanordnungen von Aktionszentren in verschiedenen Strömungskonfigurationen.

4. Ergebnisse

Die vorstehend erläuterten Berechnungsverfahren sind auf den südhemisphärischen Großraum von 0–48,1°S sowie von 20°W–160°E angewandt und auf die vier in Teil 2 explizierten Jahreszeiten unterschiedlicher Anomalieverteilungen erstreckt worden. Da die einzelnen Niederschlagsanomaliephasen von variabler Dauer und Zeiteinordnung sind und die Früh- sowie Spätphasen der Sommermonatzeit größeren Einzelabweichungen unterliegen, ist für die Zirkulationsanalysen lediglich der Kernzeitraum der Hauptmonatzeit von Januar bis Fe-

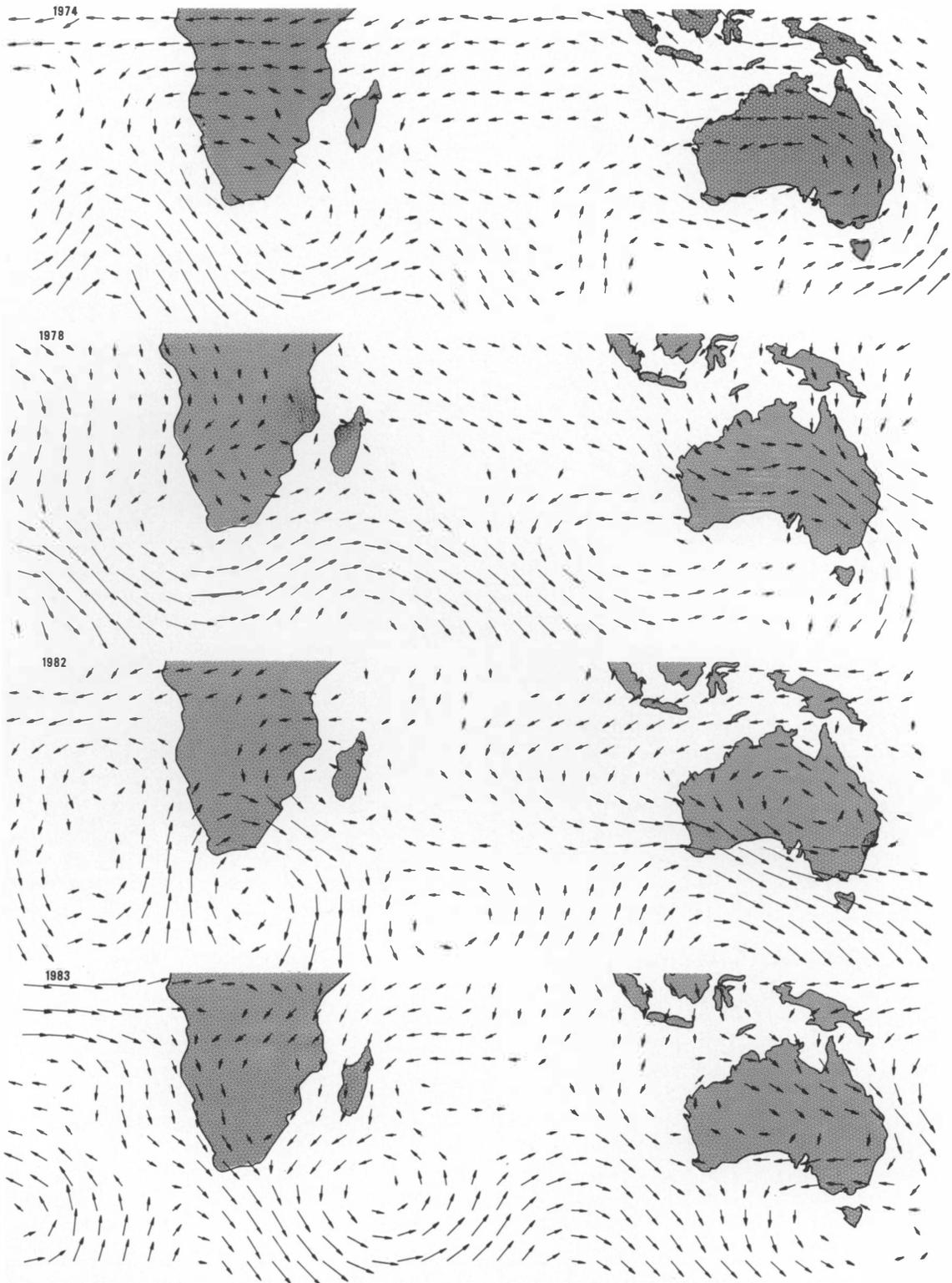


Abb. 2: Windfelder der ersten vier Faktoren der sommermonsunalen (Jan.-Febr.) 200 hPa-Strömung von 1974, 1978, 1982 und 1983

Wind vector fields of factors 1 to 4 related to the culminating summer monsoonal (Jan.-Feb.) 200 hPa circulation of 1974, 1978, 1982, and 1983

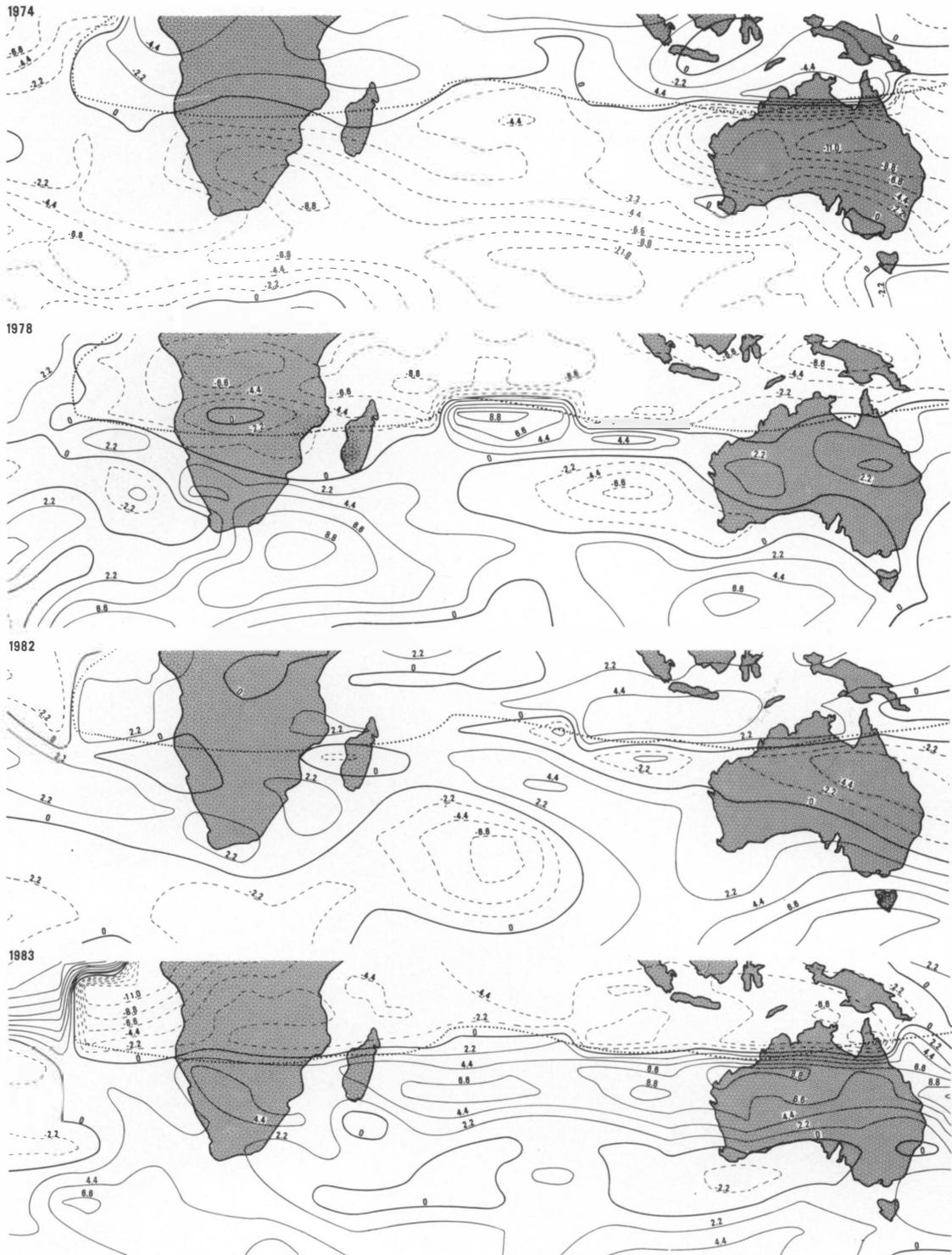


Abb. 3: Abweichungen der mittleren 200 hPa-Zonalkomponente (m/s) während vier verschiedener Hauptmonsunzeiten (Jan.-Febr.) vom entsprechenden Mittel 1968–1985. Die gepunktete Linie markiert die mittlere Grenze zwischen Ost- und Westströmung

Deviations of the mean 200 hPa zonal component (m/s) during four different culminating summer monsoon seasons (Jan.-Feb.) from the corresponding average 1968–1985. The dotted line indicates the mean boundary between easterlies and westerlies

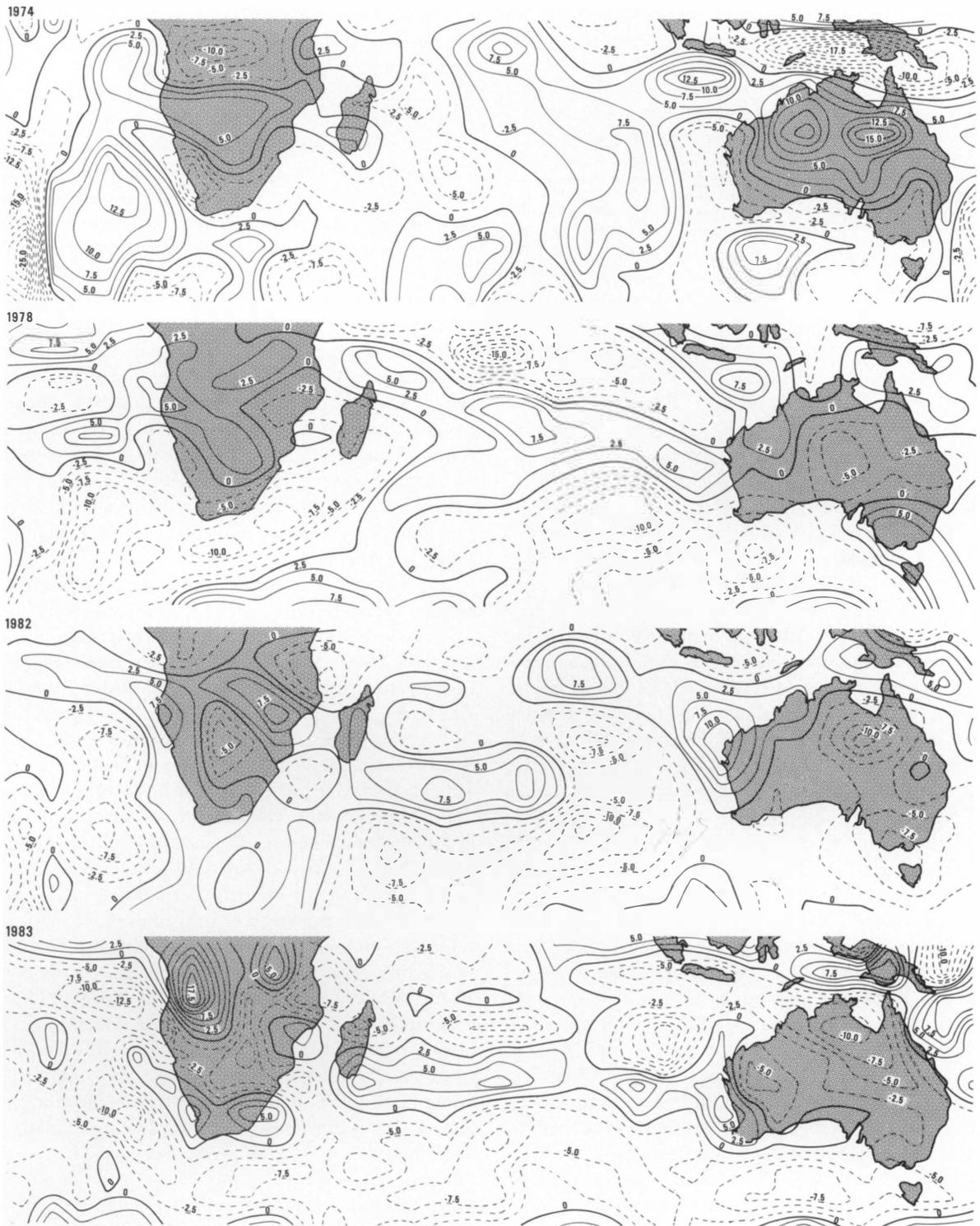


Abb. 4: Abweichungen der mittleren 700 hPa-Wirbelgrößenapproximation während vier verschiedener Hauptmonsunzeiten (Jan.-Febr.) vom entsprechenden Mittel 1968–1985

Deviations of the mean approximation of 700 hPa relative vorticity during four different culminating summer monsoon seasons (Jan.-Feb.) from the corresponding average 1968–1985

Tab. 2: Prozentuale Varianzerklärungsanteile der ersten vier Faktoren der 200 hPa-Strömung in vier verschiedenen südhemisphärischen Hauptmonsunzeiten (Jan.-Feb.)

Percentages of total variance explained by factors 1 to 4 of the 200 hPa circulation during four different culminating summer monsoon seasons (Jan.-Feb.) of the southern hemisphere

Faktor	1	2	3	4
1974	52,4	13,6	12,9	8,3
1978	16,7	41,6	14,5	9,6
1982	23,5	18,4	27,9	11,0
1983	14,3	30,6	14,7	21,9
Gesamt	26,7	26,1	17,5	12,7

bruar zugrundegelegt worden. Diese zeitliche Beschränkung verändert gegenüber der gesamten Sommermonsunzeit die maßgeblichen Tendenzen nur unwesentlich, läßt sie aber in instruktiver Weise deutlicher hervortreten.

Die Faktorenanalyse der 5tägig gemittelten 200 hPa-Windfelder ergibt bei 48 Eingangsvariablen vier Faktoren, die jeweils mehr als 2,5% und zusammen genommen rund 83% der involvierten Gesamtvarianz erklären. Ihre vektoriellen Windfelder sind in Abb. 2 illustriert, ihre einzelsaisonal zusammengefaßten Varianzerklärungsanteile in Tab. 2 spezifiziert. Dabei wird deutlich, daß die verschiedenen Strömungstendenzen in den einzelnen Hauptmonsunzeiten unterschiedlich repräsentiert sind: Faktor 1 erreicht 1974 einen nahezu doppelt so hohen Varianzerklärungsanteil als im Gesamtkollektiv, deutlich niedrigere Werte dagegen 1978 und 1983; Faktor 2 ist 1978 über- und vor allem 1974 unterrepräsentiert; Faktor 3 erreicht sein Maximum 1982 und Faktor 4 1983. Diese Gewichtsunterschiede bedeuten verschiedenartige Dominanzmomente in den einzelnen Jahreszeiten und bedingen deren unterschiedlichen Gesamtcharakter.

Die in beiden kontinentalen Gebieten überdurchschnittlich feuchte Regenzeit von 1974 ist in ihrem dominanten Höhenströmungsfeld (Faktor 1) durch eine gut ausgebildete und bis in Wendekreisnähe reichende tropische Ostströmung gekennzeichnet, die nach Abb. 3 auch im saisonalen Mittel verstärkt und vor allem über den kontinentalen Bereichen durch großräumige Hochdruckgebiete über Südostafrika und Südastralien (man beachte den entgegengesetzten Umdrehungssinn der Südhalbkugel!) abgestützt ist. Höhenträge der außertropischen Westwinddrift, die nach Abb. 3 durchgehend abgeschwächt ist, liegen jeweils etwas westlich der kontinentalen Längsbereiche und vermögen deren mon-

sunale Zirkulationen nicht zu stören. Die Wirbelgrößenanomalien der unteren Troposphäre (Abb. 4) zeigen dementsprechend positive Abweichungen über Australien und dem mittleren Teil Südafrikas, jeweils nördlich davon allerdings Negativanomalien, die mit den äußerst geringen Häufigkeiten stärkerer Zyklonalwellenindizes im äquatornahen Breitenstreifen 0–10°S (Abb. 5) zusammenhängen. Offensichtlich hat unterhalb der kräftig entwickelten östlichen Höhenströmung eine polwärtige Verlagerung der bevorzugten Wellenbildung in den Tropen stattgefunden, wie die hohen Häufigkeitswerte im Breitenstreifen 10–20°S (Abb. 5) zeigen. Nicht davon erfaßt worden ist allerdings der Bereich des westlichen Indischen Ozeans, der umgekehrt ein relatives Minimum aufweist und dementsprechend negative Niederschlagsabweichungen erlebt (Abb. 1). Auch die negativen Wirbelgrößenanomalien östlich von Madagaskar (Abb. 4) unterhalb der antizyklonal drehenden Ostströmung des dominanten ersten Faktors unterstreichen die aktuelle Ausnahmestellung dieses Bereichs.

Alle weiteren Faktoren zeigen mehr oder weniger gestörte tropische Ostwinde, mit Ausnahme von Faktor 3 im östlichen Bereich (Abb. 2). Dort liegt allerdings die Höhenantizyklone über Australien gegenüber Faktor 1 nordostwärts verschoben und sorgt für eine bedeutsame Modifikation: im Jahr der überproportionalen Repräsentanz von Faktor 3 (1982) bilden sich negative Wirbelgrößenanomalien der unteren Troposphäre über Nordost-Australien heraus (Abb. 4) und bewirken Niederschlagsdefizite im östlichen Teil des ansonsten Überschüsse aufweisenden australischen Gebietes (Abb. 1). Im Bereich Südafrikas, das verbreitet trockenere Verhältnisse erlebt, ist hingegen eine regelrechte Umordnung der großräumigen Steuerungszentren gegenüber 1974 zu beobachten: ein mächtiger Hochdruckrücken an der Vorderseite und ein kräftiger Tiefdrucktrog im Längsbereich Südafrikas (Faktor 3) definieren eine Strömungskonfiguration, in der sich großräumige tropische Ostwinde erst über dem Atlantik rekonstituieren, während über dem Kontinent Strömungslücken oder kleinräumigere Antizyklonalzirkulationen dominieren. Die Wirbelgrößenanomalien der unteren Troposphäre (Abb. 4) zeigen negative Werte im südlichen Zentrum des Kontinents, positive Werte im östlich daran anschließenden, tendenziell feuchteren Teil des Westindik, aber auch in einem zwischenliegenden kontinentalen Streifen, der sich auch in einem bis Madagaskar reichenden Bogen von Niederschlagsstationen mit Überschüssen (Abb. 1) andeutet. Dies mag zusammenhängen

mit der bemerkenswert großen Häufigkeit intensiverer Zyklonalwellen im Breitenstreifen 10–20°S (Abb. 5), die allerdings ihr Aktivitätsmaximum erst an der Westseite des Kontinents entwickeln. Zu berücksichtigen bleibt schließlich die nur leicht unterdurchschnittliche Repräsentanz von Faktor 1 in der Hauptmonsunzeit von 1982 (Tab. 2), die zwar weniger als die Hälfte derjenigen von 1974 beträgt, aber 1982 nur einige Prozent unter derjenigen von Faktor 3 liegt. Dadurch werden Feuchtigkeitstendenzen in Australien nur weiter unterstützt, in Südafrika zumindest orts- und zeitweise mit in die Gesamtentwicklung eingebracht.

Gänzlich andersartige Verhältnisse dominieren während der Regenzeit von 1978, die in Südafrika feuchter, in Australien trockener als im Durchschnitt ausfällt. Faktor 2 als maßgebliches Höhenströmungselement (Tab. 2) zeigt kräftige westliche Winde über Australien, die westlichen bis nordwestlichen Strömungen über dem tropischen Südindik und transäquatorialem Massenfluß über Indonesien entstammen und erst östlich von Australien in die außertropische Westwinddrift einbezogen werden (Abb. 2). Auch über Afrika und dem benachbarten Atlantik herrscht eine südwärts gerichtete transäquatoriale Höhenströmung, die sich allerdings weiträumig fort-

setzt und erst jenseits des Wendekreises auf die westlichen Richtungen der mäandrierenden Höhenströmung der Außertropen einschwenkt. Dementsprechend zeigen die Isanomalien der mittleren Zonal Komponente (Abb. 3) im gesamten Bereich der tropischen Ostströmung Negativwerte, während die Verstärkungen der Westdrift über dem Indik und Australien sich unmittelbar anschließen, über Südafrika aber erst weiter südlich nach einer Zone der relativen Abschwächung folgen. Die Verteilung der 700 hPa-Wirbelgrößenanomalien (Abb. 4) deckt sich im wesentlichen mit derjenigen der Niederschlagsabweichungen (positive Werte über dem Großteil des südafrikanischen Kontinents, negative östlich daran anschließend und erneut über dem mittleren und östlichen Teil Australiens mit positiven Werten westlich und nördlich davon).

Während der allseits trockeneren Hauptmonsunzeit von 1983 schließlich gewinnt mit Faktor 4 eine Höhenströmungskomponente überdurchschnittliches Gewicht (Tab. 2), die im Vergleich mit Faktor 2 durch Ähnlichkeiten wie Gegensätzlichkeiten gekennzeichnet ist (Abb. 2). Nahezu invers ist die Phasenordnung der außertropischen Wellenbewegung, Vergleichbarkeiten lassen sich dagegen im tropisch-subtropischen Bereich feststellen: etwa die

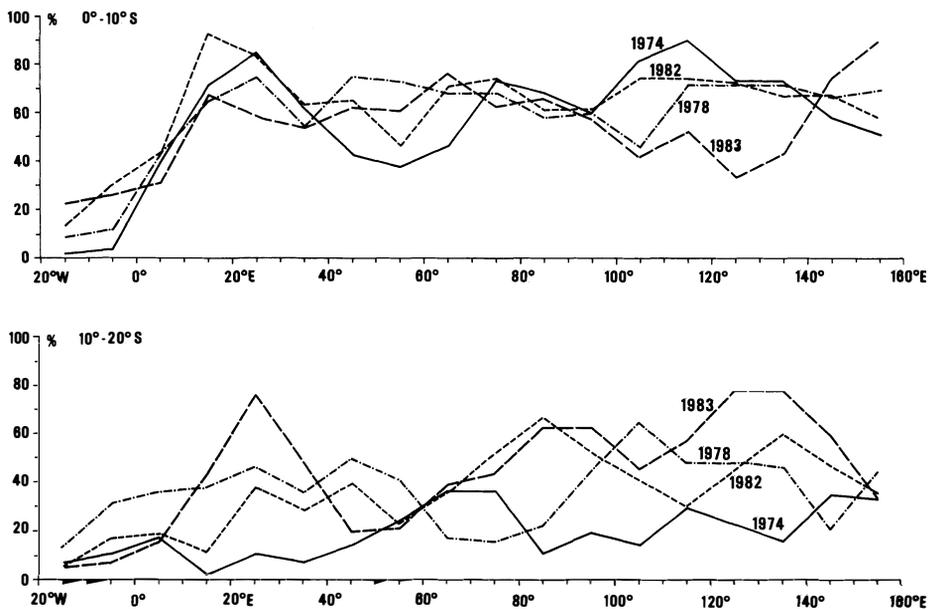


Abb. 5: Prozentuale Häufigkeiten überdurchschnittlicher Zyklonalwellenindizes (siehe Text) während vier verschiedener Hauptmonsunzeiten (Jan.–Febr.) für $10^\circ \times 10^\circ$ -Gebiete zweier tropischer Breitenstreifen zwischen 20°W und 160°E

Percentage frequencies of above-average cyclonic wave indices (see text) during four different culminating summer monsoon seasons (Jan.–Feb.) based on $10^\circ \times 10^\circ$ sections of two latitudinal bands between 20°W and 160°E

südwärts gerichteten transäquatorialen Strömungen über Indonesien und die westlichen Komponenten zumindest über dem nördlichen Australien oder die in weitem Bogen über Südafrika hinweg in die Westdrift einmündenden Strömungen aus nördlichen Richtungen. Auch die mittleren Zonalkomponenten von 1983 (Abb. 3) zeigen übereinstimmend negative Abweichungen im gesamten Bereich der tropischen Ostströmung. Auf der anderen Seite bleibt im Unterschied zu Faktor 2 die Zonalkomponente von Faktor 4 über dem nordwestlichen Südindik westwärts gerichtet, während sie über dem äquatornahen Südatlantik mit großen Beträgen entgegengerichtet ist. Die daraus resultierenden Drehungen scheinen sich noch in den mittleren Wirbelgrößenanomalien der unteren Troposphäre abzubilden (Abb. 4), die positive Werte über dem nördlichen Südafrika, negative über dem Westindik bis in die Wendekreisnähe annehmen. Die im Zentrum des Kontinents ausgebildeten Negativabweichungen liegen dagegen annähernd in einem Bereich, der in der Höhenströmung von Faktor 4 durch großräumige Windschwächen gekennzeichnet ist. Ganz Australien ist gleichermaßen von negativen Wirbelgrößenanomalien überdeckt, die erst nördlich des Kontinents ihr Vorzeichen wechseln. Eine Konzentration der Zyklonalaktivität auf die äquatornäheren Bereiche zeichnet sich für die kontinentalen Sektoren auch in den Häufigkeiten intensiverer Zyklonalwellen ab (Abb. 5), die im Gegensatz zu 1974 zwischen 0 und 10°S besonders hoch, zwischen 10 und 20°S jedoch erkennbar niedriger liegen. Die 1983 im Unterschied zu allen anderen Jahren gegebene Gleichsinnigkeit der Niederschlagsabweichungen zwischen Westindik und Südafrika (Abb. 1) mag durch die jahreszeitlich sogar noch stärkere Repräsentanz von Faktor 2 (Tab. 2) mitbedingt sein, dessen Trogbildung südlich von Madagaskar die Entwicklung hochreichender Ostwinde über dem Westindik hemmt, während die südwärts gerichtete Höhenströmung über Südafrika offensichtlich auch Negativausbildungen der unterlagernden Wirbelgrößenanomalien ermöglicht.

5. Folgerungen

Zusammenfassend läßt sich aus den vorliegenden Ergebnissen eine Reihe von Folgerungen ziehen:

a) Es existiert eine größere Zahl räumlicher Verteilungsmuster signifikanter Niederschlagsanomalien, die in den verschiedenen Teilräumen der hier betrachteten Tropen von Südafrika bis Australien teils gleich-, teils gegensinnig kombiniert sind. Diese

mehrgestaltige Herausbildung, die in Analogie zu korrelationsstatistischen Typisierungen aus langzeitlichen Niederschlagsreihen innerhalb Afrikas steht (NICHOLSON 1986a und 1986b), konnte auf der interannuellen Zeitskala mit unterschiedlichen Zirkulationsmustern im interkontinentalen Untersuchungsraum parallelisiert werden.

b) Dabei fällt die große Einwirkung außertropischer Strömungserscheinungen auf die innertropischen Zirkulationsverhältnisse auf: etwa in Gestalt großräumiger Hochdruckgebiete oder Höhenrücken, die stabilisierend oder verstärkend auf die tropische Ostströmung einwirken, oder in Gestalt großamplitudiger Höhenträge, die durch ihre entgegengesetzte Stirnseitenströmung einer kontinuierlichen Entwicklung tropischer Ostwinde entgegenwirken. Nach RIEHL (1979, S. 342) ist für die Entstehung niederschlagsfördernder *easterly waves* eine kräftige Vertikalentwicklung östlicher Strömungen Voraussetzung, wodurch die genannte Einwirkung außertropischer Wellenbewegungen für die Tropen klimatologisch bedeutungsvoll wird.

c) Gleichzeitig zeigt sich dabei die steuernde Funktion der Höhenströmung (vgl. TYSON 1988), die allerdings zeitweise auch so indifferent ausgeprägt sein kann, daß niedertroposphärische Zirkulationsentwicklungen eigenständig bestimmend zu werden vermögen. So ermöglichen die Höhenströmungstendenzen der Faktoren 2 und 4 mit teilweise unterbrochenen nördlichen Strömungen über Südafrika dortselbst in verschiedenen Einzeljahreszeiten sowohl positive als auch negative Wirbelgrößenanomalien in der unteren Troposphäre über dem randtropischen Kernraum und dementsprechend entgegengesetzte Niederschlagsanomalien über weiten Teilen des tropisch-sommerfeuchten Kontinents.

d) Als wesentliches Bestimmungsmoment der tropischen Monsunzirkulation sind Lage und Intensität der oberen Ostströmung bekannt (KANAMITSU und KRISHNAMURTI 1978; TYSON 1984). Auch die vorliegenden Ergebnisse zeigen die verschiedenen klimatischen Konsequenzen ihrer unterschiedlichen Ausprägung: die über den Kontinenten feuchtere Sommermonsunzeit von 1974 mit ihrer verstärkten Ostströmung und ihrer Verlagerung der zyklonalen Aktionszentren in äquatorfernere Breitenbereiche oder die trockenere Sommermonsunzeit von 1983 mit ihrer abgeschwächten Ostströmung und ihren äquatornäher verbleibenden zyklonalen Aktionszentren; gleichzeitig ist die Intensität der außertropischen Westdrift jeweils invers zu derjenigen der tropischen Ostströmung verändert. Allerdings liegt bereits in diesem Fall keine vollständige Gegenläufig-

keit vor, denn 1974 bleibt im Westindik gegenphasig trockener (äquatornähere Höhenantizyklone im ozeanischen Bereich), 1983 nunmehr gleichphasig ebenfalls trockener (Beeinträchtigung der Monsunzirkulation durch außertropische Höhenträge oder antizyklonale Wirbelgrößenanomalien).

e) Weitere Einzelfälle fügen sich nicht in dieses einfache Generalbild ein und lassen anderweitige Steuerungsmechanismen erkennen: 1978 etwa zeigt ebenfalls durchgehend abgeschwächte Ostwinde und gleichzeitig relativ feuchte Bedingungen in Südafrika, die durch weiträumig nördliche Höhenströmungen über dem Kontinent und dem benachbarten Atlantik bei positiven Wirbelgrößenanomalien in der unteren Troposphäre ermöglicht und begünstigt werden. Dabei schiebt sich inmitten des Kontinents zwischen die abgeschwächten Ostwinde und die erst weiter südlich verstärkten Westwinde eine Zone abgeschwächter Westwinde, die der niedertroposphärischen Zyklonalitätsentwicklung in den Randtropen ebenfalls förderlich ist (in anderem Zusammenhang werden Breiten-Differenzierungen der Westdriftintensität ebenfalls als Moment tropisch-außertropischer Wechselwirkungen diskutiert, vgl. NICHOLLS 1977). 1982 wiederum zeigt über Südafrika kaum Abweichungen der mittleren Zonalkomponenten, bleibt aber verbreitet relativ trocken. Dies steht im Zusammenhang mit großamplitudigen Höhenträgen der Außertropen und antizyklonalen Umlenkungen der tropischen Ostströmung. Im Bereich Australiens verteilen sich 1982 die Abweichungen der mittleren Zonalkomponente ähnlich wie im Feuchtjahr 1974, allerdings mit deutlich geringeren Beträgen vor allem in der Westwindzone. Darin spiegelt sich die nordöstlichere Position der Höhenantizyklone, die im Nordosten sogar zu einer Abschwächung des bodennahen Monsuntroges (vgl. SUMNER and BONELL 1986) und zu subregional trockeneren Verhältnissen führt.

f) In den Jahren 1978 und 1983 spielen westliche Komponenten in der tropischen Höhenströmung eine größere Rolle, die allerdings nicht als äquatorwärtige Ausdehnungen außertropischer Höhenträge zu verstehen sind, sondern zu einem erheblichen Teil (v. a. im indisch-australischen Bereich) aus transäquatorialen Strömungen der Nordhemisphäre resultieren. Bemerkenswert dabei ist die weitere Strömungsentwicklung nach Äquatorübertritt: während in einem analogen Fall des nordhemisphärischen Sommers 1975 über dem Indischen Ozean ein relativ konzentriertes Band äquatornaher Westwinde entsteht, die im Bereich von Südindien mit zyklonaler Drehung in die tropische Ostströmung einschwen-

ken und dort eine ergiebige Regenzeit auslösen (JACOBET 1988), breiten sich in den vorliegenden Fällen die transäquatorialen Strömungen ohne Einschwenken in östliche Richtungen weiter über die Südhemisphäre aus und münden entweder wie über Australien in westliche Höhenwinde, die die Vertikalentwicklung des monsunalen Zirkulationssystems beschränken und zu relativen Trockenphasen führen, oder setzen sich wie über Südafrika in nördlichen Strömungen fort, die erst jenseits des Wendekreises in die außertropische Westdrift einbezogen werden und je nach der niedertroposphärischen Wirbelgrößenentwicklung entweder feuchtere oder trockenere Verhältnisse zur Folge haben.

g) Eine wichtige Rolle für die jeweilige Anomalienverteilung spielen auch die Phasenanstimmungen wellenhafter Bewegungen. So wird z. B. die bevorzugte Position diagonaler Wolkenbänder, die schon von FLOHN (1975, S. 22 ff.) als Wechselbeziehungsmoment zwischen außertropischen Höhenträgen und tropischen Zyklonalwirbeln beschrieben worden sind, im Zusammenhang mit trockenen und feuchten Episoden über Südafrika gesehen (bei kontinentaler Position vermehrte, bei östlicherer Lage über dem Indischen Ozean verringerte Niederschläge über weiten Teilen des Kontinents, vgl. NICHOLSON 1986b, S. 528). Dies erklärt zugleich die Gegenläufigkeit zwischen Südafrika und Westindik in drei der vier betrachteten Jahreszeiten, während die übereinstimmende Trockenheit von 1983 auf die bevorzugt äquatornähere Position intensiverer Zyklonalwellen (Abb. 5) und die mithin geringere Wechselwirkungsmöglichkeit mit geeigneten außertropischen Strömungselementen zurückgeführt werden kann. Für den südafrikanischen Kontinent ist zusätzlich von Bedeutung, daß unabhängig von ihrer absoluten Größe die Häufigkeitsmaxima intensiverer Zyklonalwellen im Breitenstreifen 10–20°S während der feuchteren Jahreszeiten über dem kontinentalen Kernraum liegen, während der trockeneren Jahreszeiten jedoch um 10° nach Westen verschoben sind (Abb. 5).

h) Abschließend bleibt die Frage nach den Gründen der interannuellen Variabilität im Verteilungsmuster der Niederschlagsanomalien und in den zugehörigen Zirkulationsverhältnissen. Neben systeminternen Eigenschwankungen, die die Atmosphäre im Laufe der Zeit unterschiedliche Zustandsformen aus dem Gesamtspektrum ihrer physikalisch möglichen Systemzustände annehmen lassen, und langsam sich ändernden Randbedingungen wie etwa Meeresoberflächentemperaturen oder Bodenfeuchtigkeitsverhältnissen, die den Wechsel atmosphärischer System-

zustände erzwingen können (OWEN and FOLLAND 1988), sind auch mögliche Eingebundenheiten in übergeordnete großräumige Zirkulationstendenzen zu beachten. So bestehen etwa nachgewiesene Beziehungen zwischen der Intensität des australischen Sommermonsuns und der sog. *Southern Oscillation* (HOLLAND 1986), die als großräumige Luftdruckschwankung im tropischen Südpazifik eng mit den gelegentlichen umfassenden Zirkulationsumstellungen der sog. El-Niño-Ereignisse und darüber hinaus mit weitreichenden tropischen Strömungsanomalien verbunden ist (ARKIN 1982). Bei QUIROZ (1983, S. 1687) findet sich für den Zeitraum 1968–1983 die graphische Darstellung eines *Southern Oscillation-Index* (berechnet als normalisierte Differenz der mittleren monatlichen Luftdruckanomalien von Tahiti und Darwin), der in den vier hier betrachteten Einzeljahreszeiten jeweils unterschiedliche Größenordnungen annimmt: 1974 als verbreitete Feuchtzeit erreicht mit die höchsten Werte der gesamten Zeitreihe, 1982 als „Mischzeit“ (relativ trocken in Südafrika, relativ feucht in Teilen Australiens) nahezu mittlere Werte, 1978 als großräumig entgegengesetzte „Mischzeit“ gemäßigt negative Werte und 1983 als verbreitete Trockenzeit die extrem niedrigen Werte des besonders kräftigen El-Niño-Ereignisses von 1982/83. Diese auffällige Abstufung läßt vermuten, daß die großräumigen Zirkulationstendenzen im pazifischen Raum auch die Zustandsentwicklungen im Bereich des Indischen Ozeans und seiner Nachbargebiete beeinflussen und so an der hier aufgezeigten interannuellen Variabilität mitwirken.

Literatur

- ARKIN, P. A.: The Relationship between Interannual Variability in the 200mb Tropical Wind Field and the Southern Oscillation. In: *Monthly Weather Review* 110, 1982, S. 1393–1404.
- BEHREND, H.: Teleconnections of Tropical Rainfall Anomalies and the Southern Oscillation. In: *Bonner Meteorologische Abhandlungen* 31, 1984, S. 1–50.
- FLEER, H.: Large-scale Tropical Rainfall Anomalies. *Bonner Meteorologische Abhandlungen* 26, 1981.
- FLOHN, H.: Tropische Zirkulationsformen im Lichte der Satellitenaufnahmen. *Bonner Meteorologische Abhandlungen* 21, 1975.
- HOLLAND, G. J.: Interannual Variability of the Australian Summer Monsoon at Darwin: 1952–82. In: *Monthly Weather Review* 114, 1986, S. 594–604.
- HOLTON, J. R.: An Introduction to Dynamic Meteorology. *International Geophysics Series* 23, 1979.
- JACOBET, J.: Interannual Variations of Tropical Rainfall and Upper Circulations. In: GREGORY, S. (Ed.): *Recent Climatic Change – a Regional Approach*. London/New York, 1988, S. 217–225.
- KANAMITSU, M. and KRISHNAMURTI, T. N.: Northern Summer Tropical Circulations During Drought and Normal Rainfall Months. In: *Monthly Weather Review*, 106, 1978, S. 331–347.
- KATZ, R. W. and GLANTZ, M. H.: Anatomy of a Rainfall Index. In: *Monthly Weather Review* 114, 1986, S. 764–771.
- KRÜGER, A. F. and WINSTON, J. S.: A Comparison of Flow over the Tropics during two Contrasting Circulation Regimes. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 31, 1974, S. 358–370.
- NICHOLLS, N.: Tropical-Extratropical Interactions in the Australian Region. In: *Monthly Weather Review* 105, 1977, S. 826–832.
- NICHOLSON, S. E.: The Spatial Coherence of African Rainfall Anomalies: Interhemispheric Teleconnections. In: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25, 1986a, S. 1365–1381.
- : The Nature of Rainfall Variability in Africa South of the Equator. In: *Journal of Climatology* 6, 1986b, S. 515–530.
- OWEN, J. and FOLLAND, C.: Modelling the Influence of Sea-Surface Temperatures on Tropical Rainfall. In: GREGORY, S. (Ed.): *Recent Climatic Change – a Regional Approach*. London/New York 1988, S. 141–153.
- QUIROZ, R. S.: The Climate of the “El Niño” Winter of 1982–83 – A Season of Extraordinary Climatic Anomalies. In: *Monthly Weather Review* 111, 1983, S. 1685–1706.
- RIEHL, H.: *Climate and Weather in the Tropics*. London, New York, San Francisco 1979.
- SUMMER, G. and BONELL, M.: Circulation and Daily Rainfall in the North Queensland Wet Seasons 1979–1982. In: *Journal of Climatology* 6, 1986, S. 531–549.
- TYSON, P. D.: The Atmospheric Modulation of Extended Wet and Dry Spells over South Africa. In: *Journal of Climatology* 4, 1984, S. 621.
- : Synoptic Circulation Types and Climatic Variation over Southern Africa. In: GREGORY, S. (Ed.): *Recent Climatic Change – a Regional Approach*. London/New York 1988, S. 202–214.
- U.S. *Department of Commerce*: *Monthly Climatic Data for the World*. Asheville 1968–1985.

ERRATUM

In ERDKUNDE Bd. 43, 1989, H. 2, S. 111 (Beitrag Jacobeit) muß es bei der Beschriftung von Abb. 2 statt 1974, 1978, 1982, 1983 heißen: Faktor 1, Faktor 2, Faktor 3, Faktor 4.