



© MShep2 – iStockphoto

3.1.9 Aspekte der Niederschlagsvariabilität in Afrika im Zeitraum 1951–2000

CHRISTOPH BECK

Precipitation trends and shifts of rainfall regimes in Africa in the period 1951–2000: In this contribution the hydroclimatic variability over Africa in the period 1951 to 2000 is examined in terms of linear trend estimates, long-term changes of drought indices and spatiotemporal variations of major African rainfall regimes determined by non-hierarchical cluster analysis. Results indicate significant negative trends in precipitation sums and as well corresponding significant increases in drought severity, most striking in the Sahel region and in northern parts of southern Africa. The comparison of the two periods 1951–1975 and 1976–2000 with respect to the percentage of land area designated to major rainfall regimes reveals an expansion of arid and semi-arid climates and a concomitant reduction of more humid climates.

Die klimatischen Verhältnisse in großen Teilen Afrikas sind durch tropische bis subtropische Bedingungen mit ganzjährig hohen Temperaturen, bei räumlich sehr variablen Niederschlägen geprägt. Hinsichtlich Niederschlag und Wasserverfügbarkeit reicht die Spannweite dabei von humiden innertropischen Bereichen mit bis zu 10.000 mm Jahresniederschlag bis hin zu hyperariden saharischen Trockengebieten mit weniger als 1 mm Jahresniederschlag. Neben Unterschieden bezüglich der jährlichen Niederschlagssummen sind zusätzlich variierende Ausprägungen der intraannuellen Niederschlagsvariabilität zu berücksichtigen, die, insbesondere in Form unterschiedlich lang andauernder und verschieden stark ausgeprägter Trockenzeiten, einen wesentlichen Bestimmungsfaktor der natürlichen Umweltbedingungen darstellen.

Die herausgehobene Bedeutung von Niederschlag und Wasserverfügbarkeit und deren raumzeitlicher Variabilität für natürliche und soziale Systeme in großen

Teilen Afrikas wurde in der Vergangenheit wiederholt während katastrophaler Dürreperioden auf dramatische Weise deutlich, so beispielsweise während der Dürre in den Jahren 1983 und 1984, die fast den gesamten afrikanischen Kontinent umfasste (BENSON & CLAY 1998).

Eine hohe Vulnerabilität der natürlichen und sozio-ökonomischen Systeme gegenüber Schwankungen des Niederschlagsangebots und der Wasserverfügbarkeit besteht dabei insbesondere in ariden und semi-ariden Räumen, wie beispielsweise der Sahel-Region, die durch eine ausgeprägte hygische Variabilität charakterisiert sind, und in denen gleichzeitig eine intensive Landnutzung zu nachhaltigen Veränderungen der Landoberfläche und zu Prozessen der Landschaftsdegradation bis hin zur Desertifikation führt.

Vor diesem Hintergrund kommt der Untersuchung der niederfrequenten raumzeitlichen Niederschlagsvariabilität auf der Basis von Beobachtungsdaten unter verschiedenen Aspekten eine wesentliche Bedeutung

zu: Die beobachteten Degradations- und Desertifikationsprozesse in den trocken sub-humiden bis ariden Regionen Afrikas sind auf regional unterschiedliche, komplexe Wirkungsgefüge zurückzuführen, die mannigfaltige natürliche und anthropogene Einflussgrößen beinhalten (z.B. DESANKER & JUSTICE 2001). Eine detaillierte Kenntnis der raumzeitlichen Niederschlagsvariabilität, als einem der wesentlichen klimatischen Faktoren, ist notwendig, um spezifische Wirkungsanteile natürlicher und anthropogener Einflüsse abschätzen zu können. Hinsichtlich möglicher zukünftiger Niederschlagsvariationen, unter den Bedingungen eines zunehmend anthropogen verstärkten Treibhauseffekts und einer daraus resultierenden globalen Erwärmung, bestehen für die verschiedenen Regionen Afrikas nach wie vor beträchtliche Unsicherheiten bezüglich Ausmaß und teilweise sogar Vorzeichen der zu erwartenden Veränderungen (z.B. HULME et al. 2001). Die Analyse der langzeitlichen beobachteten Niederschlagsvariabilität eröffnet in diesem Zusammenhang die Möglichkeit die Bandbreite der möglichen zukünftigen Niederschlagsänderungen in einen historischen Kontext einzuordnen und zu bewerten.

Die Niederschlagsvariabilität in Afrika wurde in zahlreichen Arbeiten für verschiedene Teilräume Afrikas und unter Zugrundelegung variierender Zeiträume analysiert. Einen umfassenden Überblick der verschiedenen Untersuchungen und eine Zusammenschau der Ergebnisse gibt beispielsweise NICHOLSON (2001). Als wesentliche Charakteristika der Niederschlagsveränderungen in Afrika ergeben sich im 20. Jahrhundert nach NICHOLSON (2001) eine – seit den 1980ern akzentuierte – Zunahme der Aridität in beinahe allen Teilräumen Afrikas sowie insbesondere eine ausgeprägte Niederschlagsabnahme und gleichzeitige Zunahme der Dürrehäufigkeit in der Sahel Region innerhalb der letzten drei Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts (s. Kap. 3.1.13).

In vorliegendem Beitrag wird die multidekadische Niederschlagsvariabilität in Afrika in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zum einen mittels linearer Trendanalysen saisonaler und jährlicher Niederschläge bzw. abgeleiteter Dürreindizes und zum anderen mithilfe der Detektion raumzeitlicher Variationen wesentlicher afrikanischer Niederschlagsregimetyper untersucht. Als Datengrundlage der vorgestellten Studien dienen gegitterte Analysen des monatlichen Niederschlags im Bereich 18°W–52°E und 35°S–38°N für den Zeitraum 1951 bis 2000. Die Daten entstammen einem Datensatz monatlicher Niederschlagssummen für die globalen Landflächen, mit einer horizontalen Auflösung von 0.5°×0.5° (BECK et al. 2005), der aufgrund der Tatsache, dass für die Erstellung dieses Datensatzes nur Niederschlagszeitreihen verwendet wurden, die für

den Zeitraum 1951–2000 quasikontinuierlich verfügbar sind, in besonderem Maße für die hier vorgestellten Variabilitätsstudien geeignet ist.

Niederschlagstrends im Zeitraum 1951–2000

Lineare Trendanalysen des Niederschlags in Afrika im Zeitraum 1951–2000 wurden auf der Basis monatlicher, saisonaler und jährlicher Niederschlagssummen durchgeführt. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die analysierten Niederschlagszeitreihen gemeinhin die Voraussetzung der Normalverteiltheit nicht erfüllen und dementsprechend parametrische Verfahren zur Prüfung der detektierten Trends auf statistische Signifikanz nicht zur Anwendung gebracht werden können, wurden ergänzend nichtparametrische Mann-Kendall Trend Tests (KENDALL 1976) zur Signifikanzprüfung eingesetzt. *Abb. 3.1.9-1* zeigt für die saisonal und ganzjährig aggregierten Niederschläge (jeweils angegeben in mm/Monat) diejenigen linearen Trends, für die sich laut Mann-Kendall Trend Test statistische Signifikanz auf dem 90% Signifikanzniveau ergibt.

Als bestimmendes Element langzeitlicher Niederschlagsvariabilität in Afrika in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts treten negative Trends in Erscheinung, am ausgeprägtesten und flächenmäßig ausgedehntesten in der Sahel- und Sudan-Region im Sommer (JJA) und – bei Verlagerung der betragsmäßig höchsten Trendwerte in den Südwesten – Herbst (SON). Im Winter (DJF) und Frühjahr (MAM) treten die höchsten negativen Trends hingegen im südlichen Afrika, im Kongo-Becken und der Guinea-Region auf. Positive Trends der Niederschlagsentwicklung seit 1951 erreichen in sehr viel weniger Regionen statistische Signifikanz und bleiben in den meisten Fällen auf eine Jahreszeit beschränkt. Lediglich für das Horn von Afrika und für Teilräume der arabischen Halbinsel resultieren für größere zusammenhängende Flächen aus den jahreszeitlichen Entwicklungstendenzen des Niederschlages auch bei ganzjähriger Betrachtung signifikante positive Trends. In allen anderen Regionen werden eventuell auftretende positive Trends in einzelnen Jahreszeiten (z.B. Sommerniederschläge in der Guinea-Region) durch gegenläufige Entwicklungen in den übrigen Jahreszeiten ausgeglichen oder sogar überkompensiert.

Zeitliche Variabilität von Dürreindizes

Zur Charakterisierung von Dürreereignissen können verschiedene Dürreindizes herangezogen werden (KEYANTASH & DRACUP 2002). Zur Erfassung der zeitlichen Variabilität von Dürreereignissen in Afrika zwischen

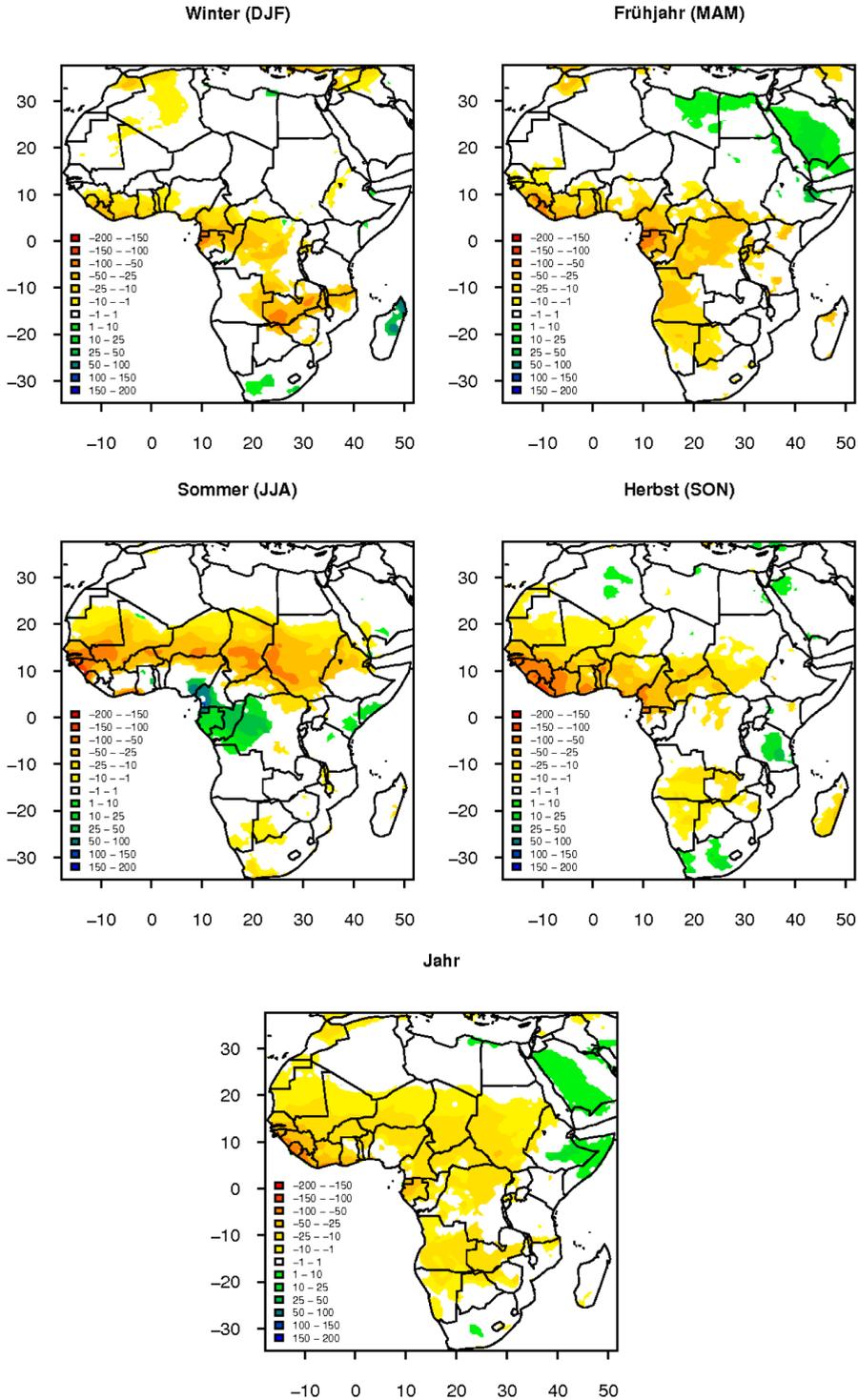


Abb. 3.1.9-1: Lineare Trends (mm/50 Jahre) der saisonalen (DJF, MAM, JJA, SON) und jährlichen Niederschlagssummen (in mm/Monat). Angegeben sind nur solche Trends, für die der nichtparametrische Trendtest nach Mann-Kendall eine Signifikanz ergibt (90% Signifikanzniveau).

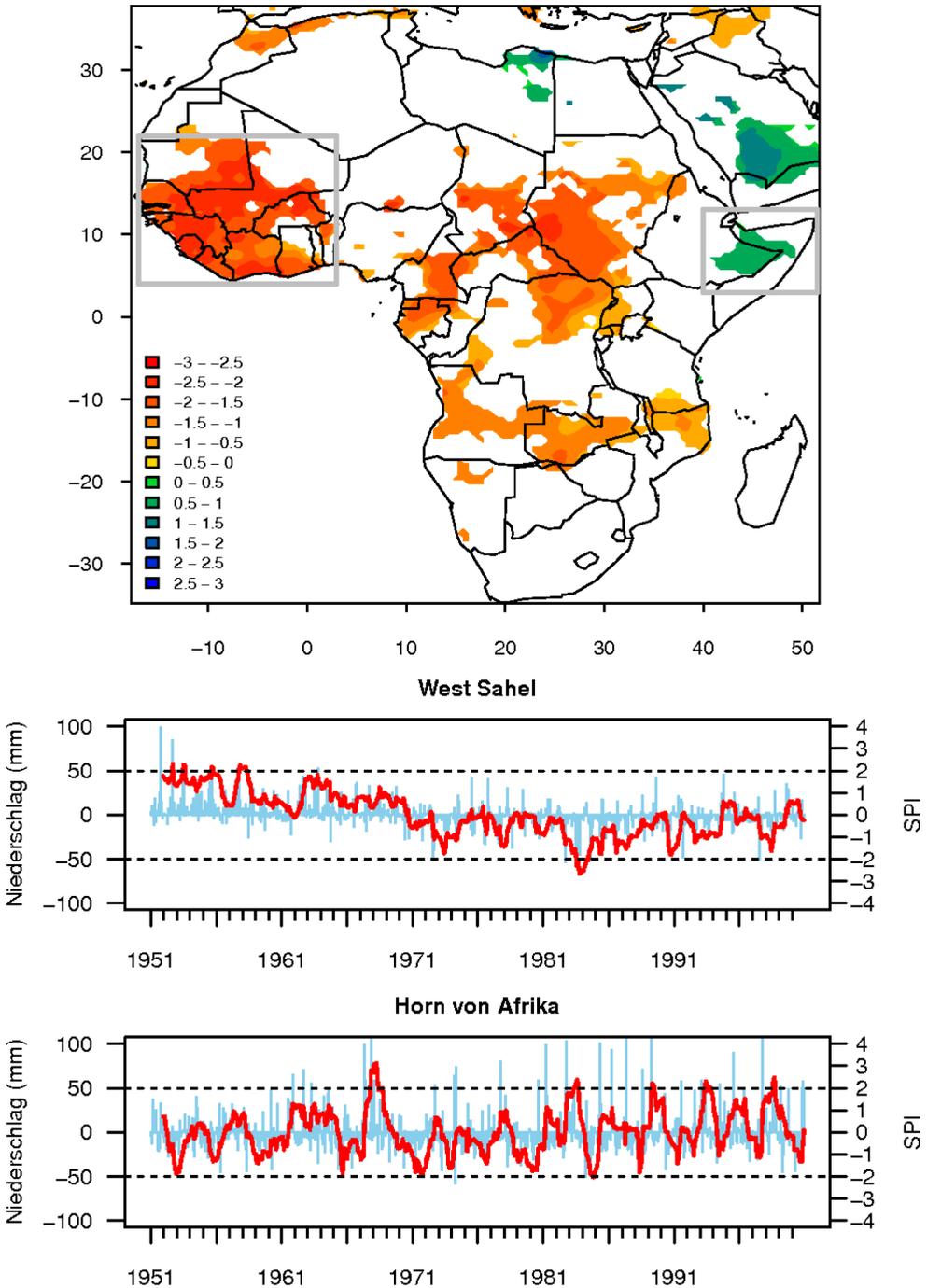


Abb. 3.1.9-2: Raumzeitliche Variationen des SPI (Standardized Precipitation Index) im Zeitraum 1951–2000. Statistisch signifikante (90% Signifikanzniveau, unter Berücksichtigung zeitlicher Autokorrelation) lineare Trends des 12-monatigen SPI (oben). Regionale Zeitreihen der monatlichen Niederschlagsanomalien (blaue Balken; Abweichungen vom jeweiligen monatlichen Mittelwert 1951–2000) und des 12-monatigen SPI (rote Linien) für den West-Sahel (oben) bzw. das Horn von Afrika (unten). Horizontale gestrichelte Linien verdeutlichen extrem feuchte/trockene SPI-Werte oberhalb von 2/unterhalb von -2.

1951 und 2000 wurde der Standardized Precipitation Index SPI (McKee et al. 1993) auf der Grundlage der monatlichen Niederschlagswerte berechnet. Der SPI beruht auf der Ermittlung der Niederschlagsabweichungen im Vergleich zum langjährigen Mittel. Negative Werte des SPI repräsentieren niederschlagsdefizitäre Verhältnisse, während positive Werte Niederschlagsüberschüsse anzeigen. Die Ermittlung des SPI unter Verwendung von Bezugszeiträumen variabler Länge – üblicherweise zwischen einem und 24 Monaten – ermöglicht dabei die Fokussierung auf unterschiedliche Arten von Dürreereignissen.

Meteorologische Dürren werden bei Verwendung von Bezugszeiträumen bis zu drei Monaten erfasst. SPI-Werte für Zeitabschnitte bis zu sechs Monate sind geeignet insbesondere landwirtschaftliche Dürreereig-

nisse zu charakterisieren, während hydrologisch relevante, länger andauernde Trockenperioden am besten bei Zugrundelegung von Bezugszeiträumen bis zu 24 Monaten repräsentiert werden. Eine Zuordnung sozio-ökonomisch bedeutsamer Dürreereignisse zu spezifischen Längen der für die SPI-Berechnung verwendeten Bezugszeiträume ist, aufgrund der hochkomplexen Ursache-Wirkungs-Beziehungen, nicht ohne weiteres möglich. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurden SPI-Werte für Bezugszeiträume von drei, sechs, 12 und 24 Monaten ermittelt.

Abb. 3.1.9-2 zeigt die räumliche Verteilung der linearen Trends des 12-monatigen SPI (dargestellt sind nur Trends, die statistische Signifikanz auf dem 90% Signifikanzniveau erreichen) sowie Zeitreihen der monatlichen Niederschlagsanomalien (Abweichungen

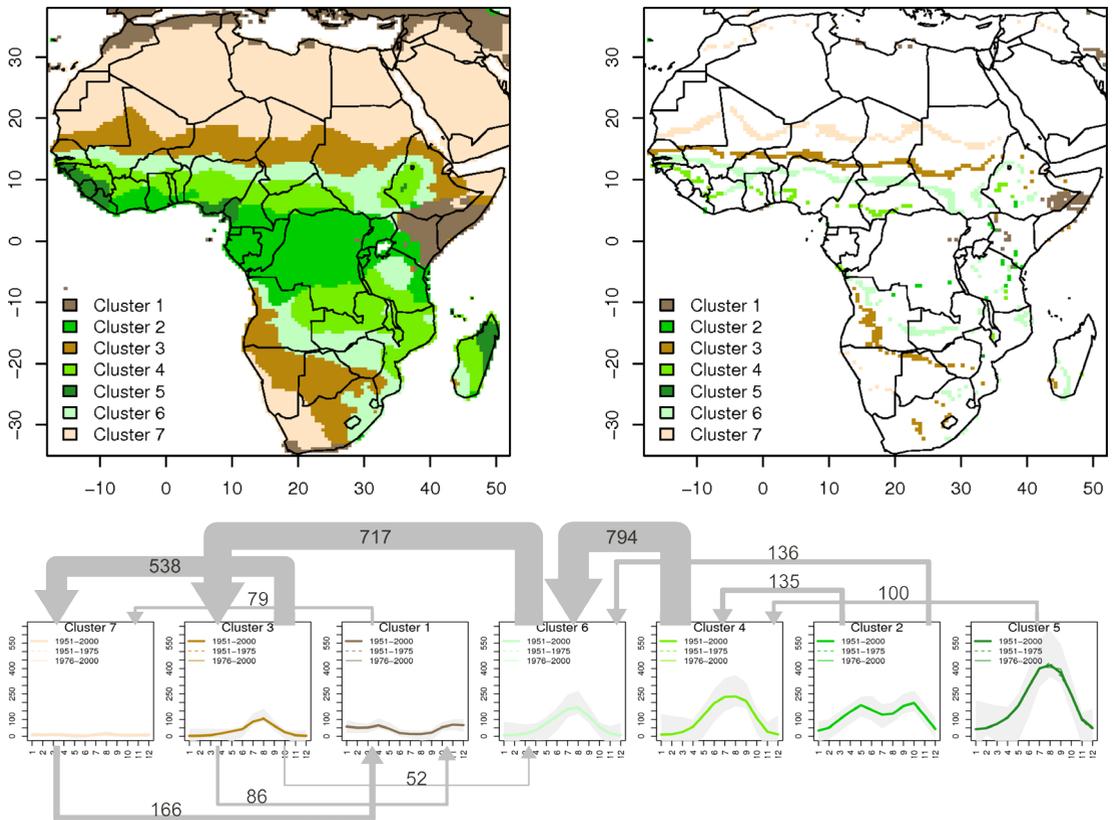


Abb. 3.1.9-3: Räumliche Verteilung wesentlicher Niederschlagsregimtypen. Ermittelt durch nichthierarchische Clusteranalyse mittlerer monatlicher Niederschlagssummen für $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ Rasterflächen im Zeitraum 1951–2000 (links). Zuordnung zu Niederschlagsregimtypen im Zeitraum 1976–2000 für diejenigen Rasterflächen, die in 1951–1975 und 1976–2000 verschiedenen Regimtypen zugeordnet wurden (rechts). Mittlere Niederschlagsjahresgänge (Clusterzentroide) der 7 Niederschlagsregimtypen für die Zeiträume 1951–2000, 1951–1975 und 1976–2000. Der Bereich der einfachen Standardabweichung um die Mittelwerte des Zeitraums 1951–2000 ist jeweils grau hinterlegt. Die Blockpfeile verdeutlichen Flächenumverteilungen (in 1.000 km²) zwischen den Regimtypen von 1951–1975 nach 1976–2000 (unten).

vom langjährigen monatlichen Mittelwert) und des 12-monatigen SPI für zwei Regionen mit großen Flächenanteilen signifikant negativer bzw. positiver langzeitlicher SPI-Trends (Westliche Sahel-Region bzw. Horn von Afrika). Der ausgeprägten Autokorrelation der SPI-Zeitreihen wurde bei der Signifikanzschätzung der Trends durch die Ermittlung und Berücksichtigung des effektiven Stichprobenumfangs Rechnung getragen (siehe z.B. WERNER 2002).

Das räumliche Verteilungsmuster der statistisch signifikanten Trends des 12-monatigen SPI – als Indikator für hydrologisch relevante Dürreereignisse – zeigt für Regionen mit signifikant positiven/negativen Trends der jährlichen Niederschläge (siehe *Abb. 3.1.9-1*) größtenteils auch entsprechende signifikante Trends der Dürreintensität. Als Ausnahmen sind allerdings beispielsweise die zentrale Sahel-Region und Teile des südlichen Afrika zu erwähnen. Trends der für kürzere Intervalle ermittelten Dürreindizes (drei- und sechsmonatiger SPI als Indikator für landwirtschaftliche Dürren) zeigen grundsätzlich sehr ähnliche räumliche Verteilungsmuster (nicht gezeigt), mit identischen Kerngebieten positiver bzw. negativer langzeitlicher Entwicklungstendenzen, allerdings bei teilweise reduzierter räumlicher Ausdehnung.

Für zwei ausgewählte Regionen gegensätzlicher SPI-Trends über den Gesamtzeitraum – West -Sahel bzw. Horn von Afrika – illustrieren die in *Abb. 3.1.9-2* dargestellten Zeitreihen die jeweiligen Verläufe der SPI-Entwicklung zwischen 1951 und 2000. Die Zeitreihe des 12-monatigen SPI für die westliche Sahel-Region weist von 1951 an abnehmende Werte auf, die schließlich – zu Beginn der ausgeprägten Dürreperiode – in 1983 auf Werte unter -2 (»extrem trocken«) absinken. Nach 1983 steigen die SPI-Werte zwar bis zum Ende des 20. Jahrhunderts wieder an, bleiben dabei aber größtenteils im negativen Wertebereich. Für das Horn von Afrika ist kein vergleichbar deutlich ausgebildeter langzeitlicher Trend festzustellen, statt-

dessen dominieren ausgeprägte dekadische Schwankungen des SPI, sowohl in die positive als auch in die negative Richtung.

Raumzeitliche Veränderungen von Niederschlagsregimetypen

Ausgehend von den bisher präsentierten Erkenntnissen zur langzeitlichen Niederschlagsvariabilität in Afrika zwischen 1951 und 2000 wird abschließend untersucht, inwieweit daraus zeitliche Veränderungen bezüglich der räumlichen Verteilungsmuster unterschiedlicher Niederschlagsregimetypen resultieren. Zu diesem Zweck wurden zunächst wesentliche Ausprägungen charakteristischer Niederschlagsregimetypen in Afrika mittels nichthierarchischer Clusteranalyse (z.B. BAHRENBERG et al. 2003) der rasterspezifischen mittleren Niederschlagsjahresgänge für den Zeitraum 1951–2000 ermittelt. Die spezifischen Niederschlagsjahresgänge sowie die räumliche Verteilung der resultierenden 7 Regimetypen ist in *Abb. 3.1.9-3* dargestellt. Die Erfassung zeitlicher Veränderungen der Raummuster der Niederschlagsregime erfolgt durch die Zuordnung der für die Teilzeiträume 1951–1975 bzw. 1976–2000 ermittelten rasterspezifischen Niederschlagsjahresgänge zu den für den Gesamtzeitraum bestimmten Cluster-Zentroide und den nachfolgenden Vergleich der jeweils resultierenden zeitraumspezifischen Verteilungsmuster.

Die zwischen den beiden Vergleichszeiträumen 1951–1975 und 1976–2000 erfolgten Flächenumverteilungen zwischen den verschiedenen Regimetypen sind ebenfalls in *Abb. 3.1.9-3*, bezüglich ihrer räumlichen Verteilung und ihres Umfanges (in 1.000 km²), dargestellt. Es zeigt sich, dass Flächenumverteilungen von relativ feuchteren zu trockeneren Regimetypen klar dominieren. Dabei finden die umfangreichsten Flächentransfers von Cluster 4 nach Cluster 6, von Cluster 6 nach Cluster 3 und von Cluster 3 nach Cluster 7 statt. *Abb. 3.1.9-4* illustriert die Veränderungen

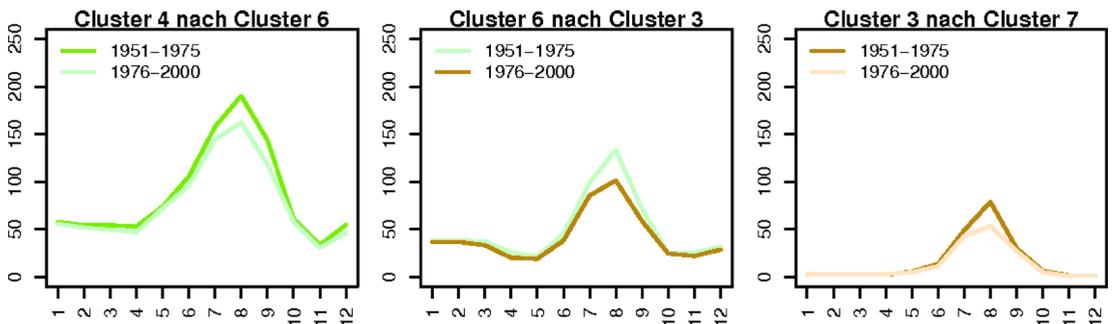


Abb. 3.1.9-4: Mittlere Niederschlagsjahresgänge derjenigen Rasterfelder, die in den Zeiträumen 1951–1975 und 1976–2000 verschiedenen Niederschlagsregimetypen zugeordnet wurden. Dargestellt für die 3 umfangreichsten Flächenumverteilungen aus *Abb. 3.1.9-3*.

der Niederschlagsjahresgänge derjenigen Rasterflächen, die an diesen hauptsächlichen Umverteilungen beteiligt sind. Als wesentliche Veränderung zeigt sich in allen Fällen eine deutliche Reduktion der sommerlichen Niederschlagssummen. Bezüglich der räumlichen Verteilungsmuster der Regimetypen ergibt sich als dominierendes Charakteristikum eine Ausdehnung der Trockenklimate in Richtung Äquator auf Kosten stärker humid geprägter Regime. Eine solche Expansion tropisch-subtropischer Trockenklimate wurde auch durch die Analyse der zeitlichen Variabilität der Verteilung der Klimahaupttypen nach KÖPPEN bestätigt (BECK et al. 2006).

Schlußbetrachtung

Die Niederschlagsvariabilität in Afrika in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ist wesentlich charakterisiert durch signifikante negative Trends der jährlichen Niederschlagssummen, die – bei teilweise unterschiedlichen saisonalen Entwicklungstendenzen – besonders deutlich in den Bereichen zwischen 0° und 20°N sowie in den nördlichen und nordwestlichen Bereichen des südhemisphärischen Afrika ausgeprägt sind. Auf der Grundlage variierender Bezugszeiträume abgeleitete Dürreindizes belegen eine Zunahme der Intensität unterschiedlich typisierter Dürren (meteorologische, landwirtschaftliche, hydrologische Dürren) in den Regionen negativer Niederschlagsentwicklung. Ein Vergleich der räumlichen Verteilung von sieben unterschiedlich charakterisierten Niederschlagsregimetypen in den zwei Teilzeiträumen 1951–1975 und 1976–2000 zeigt darüberhinaus umfangreiche Flächenexpansionen arider und semi-arider Niederschlagsregime auf Kosten stärker humid geprägter Regimetypen, am deutlichsten im sahelischen Bereich und in Teilgebieten des südlichen Afrika. Die skizzierten hydroklimatischen Veränderungen und die für das 20. Jahrhundert, ebenfalls für weite Bereiche Afrikas, dokumentierten Temperaturzunahmen (z.B. HULME et al. 2001) stehen in Übereinstimmung mit verschiedenen, auf Veränderungen des Wasserhaushalts zurückzuführende Umweltveränderungen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise Unterbrechungen der Vegetationszyklen und resultierende Ernteausfälle oder die Intensivierung von Desertifikationsprozessen in ariden und semi-ariden Regionen (z.B. GONZALEZ 2001). Diese für die angesprochenen Räume im 20. Jahrhundert dokumentierte hohe Vulnerabilität natürlicher und sozioökonomischer Systeme gegenüber Variationen des Niederschlagsklimas und des Wasserhaushalts verdeutlicht die Notwendigkeit der weitergehenden Analyse und Quantifizierung der beteiligten Prozesse und

Wechselwirkungen, um die potenziellen Auswirkungen möglicher zukünftiger Klimaänderungen begründet abschätzen zu können.

Literatur

- BAHRENBURG G., E. GIESE & J. NIPPER (2003): Statistische Methoden in der Geographie Bd. 2 - Multivariate Statistik, 2. Aufl., Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 415 pp.
- BECK C., J. GRIESER & B. RUDOLF (2005): A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. Klimastatusbericht 2004, 181-190, Deutscher Wetterdienst.
- BECK C., J. GRIESER, M. KOTTEK, F. RUBEL & B. RUDOLF (2006): Characterizing Global Climate Change by means of Köppen climate classification. Klimastatusbericht 2005, 139-149, Deutscher Wetterdienst.
- BENSON C. & E. J. CLAY (1998): The impact of drought on sub-Saharan economies. World Bank Tech Paper No. 401, World Bank, Washington, DC.
- DESANKER, P. V. & C. O JUSTICE (2001): Africa and global climate change: critical issues and suggestions for further research and integrated assessment modeling. *Clim. Res.*, 17, 93-103.
- GONZALEZ P. (2001): Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Clim. Res.*, 17, 217-228.
- HULME M., R. DOHERTY, T. NGARA, M. NEW & D. LISTER (2001): African climate change: 1900-2100. *Clim. Res.*, 17, 145-168.
- KENDALL M.G. (1976): Rank Correlation Methods. 4th Ed. Griffin.
- KEYANTASH J. & J. A. DRACUP (2002): The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 183, 1167-1180.
- MCKEE T. B., N. J. DOESKEN & J. KLIEST (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, American Meteorological Society: Boston, MA, 179-184.
- NICHOLSON S. E. (2001): Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Clim. Res.*, 17, 123-144.
- Werner P. C. (2002): Zur Berücksichtigung der Persistenz im meteorologischen Zeitreihen. In: GERSTENGARBE F. W. (Hrsg.): Angewandte Statistik - PIK Weiterbildungsseminar 2000/2001. PIK Report No. 75, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, 43-54.

*Dr. Christoph Beck
Universität Augsburg
Institut für Geographie
Universitätsstrasse 10 - 86135 Augsburg
christoph.beck@geo.uni-augsburg.de*