

II Darstellung der Teilprojekte

Projektbereich A

Teilprojekt A1**Diagnose und Modellierung der räumlichen Niederschlagsvariabilität auf intrasaisonalen bis dekadischen Zeitskalen**

Antragsteller	Fach
Prof. Dr. P. Speth (Koordinator) Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln	Meteorologie: Klimadiagnose
Prof. Dr. A. Hense Meteorologisches Institut, Universität Bonn	Meteorologie: Klimadynamik
Prof. Dr. M. Kerschgens Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln	Meteorologie: klein-skalige Modellierung
Prof. Dr. C. Simmer Meteorologisches Institut, Universität Bonn	Meteorologie: Modellierung / Fernerkundung

Zusammenfassung:

Im ersten Projektjahr schritten die Arbeiten zur Vervollständigung und Aktualisierung der stationsbezogenen Messdaten bzw. von Gitterfeldverteilungen zügig voran. Untersuchungen mit einem globalen Klimamodell weisen u.a. auf ein beachtliches Niederschlagsvorhersagepotential an der Guineaküste auf längeren Zeitskalen hin. Erste Ergebnisse auf dem Gebiet der mesoskaligen Modellierungen zeigen eine besondere Sensitivität des Niederschlages für Bodenwassergehalte zwischen Welkepunkt und Feldkapazität.

Die beschaffte Datengrundlage zur Erstellung der Langzeitklimatologie (WP A1-1) ist sehr heterogen mit a priori unbekannten Abschätzungen über die Fehler. Es wird ein Verfahren entwickelt, welches die gesuchten Fehlermatrizen aus Fehlerangaben des Global Precipitation Climatology Centre (GPCP) zu vergleichbaren Datenquellen abschätzt.

Die im Rahmen des WP A1-2 vorgenommenen Auswertungen von vier Realisierungen des ECHAM4-Modelles zum Einfluss der Meeresoberflächentemperaturen (SST) auf die interannuelle bis multidekadische Niederschlagsvariabilität in Westafrika im Zeitraum 1903-1994 zeigen, dass nur für die Guineaküstenzone bis etwa 10°N auf allen Zeitskalen ein klare, SST-induzierte Vorhersagbarkeit für die Niederschlagsjahressumme existiert. Den größten Einfluss haben dabei die SST im angrenzenden Golf von Guinea, die bis zu 50% der gesamten Niederschlagsvariabilität erklären.

Die Koppelung zwischen synoptischen Wellenstörungen, den sogenannten „African Easterly Waves (AEWs)“, und Konvektionsereignissen in Benin (WP A1-2) wurde für den Zeitraum Mai bis Oktober 1998 untersucht. Es wird gezeigt, dass der in Nordbenin im Gegensatz zum August und September zu trockene Juli 1998 durch eine deutlich reduzierte Anzahl der die Region überquerenden AEWs ausgezeichnet ist. Über Nordbenin sind etwa 50% der AEWs auf der Trogvorderseite mit „Squall Lines (SL)“ verknüpft. Die Untersuchungen bestätigen eine herausgehobene Rolle der AEWs für den Niederschlag in Nordbenin.

Im Hinblick auf die mesoskalige Modellierung mit dem LokalmodeLL des DWD (LM) wurden umfangreiche Arbeiten durchgeführt (WP A1-2), die den effizienten Modellbetrieb im zweiten Projektjahr gewährleisten werden. Es wurden Antriebsfelder sowie die besonders relevanten Boden-/und Vegetationsdaten beschafft. Darüber hinaus werden derzeit geeignete Werkzeuge zur LM-kompatiblen Erzeugung von Modellantriebsfeldern und zur Extraktion und Visualisierung des LM-Modeloutputs entwickelt.

Erste Resultate zur Beeinflussung des Niederschlags durch die Landoberfläche unter Variation des Anfangsbodenwassergehaltes und der Oberflächenstruktur zeigen, dass der Anfangswassergehalt einen deutlich stärkeren Einfluss als die Randbedingungen ausübt. Schlüsselt man das Ensemble nach dem Anfangswassergehalt der Böden auf, so zeigt sich, dass die Sensitivität des Niederschlags für die Vegetation vor allem bei Wassergehalten zwischen dem Welkepunkt und der Feldkapazität beträchtlich ist. Neben der Vegetation kommt den Bodenspeichereigenschaften insbesondere bei trockenen Situationen eine kritische Bedeutung für die Niederschlagsbildung zu.

Im Rahmen der Vernetzung der Teilprojekte wurden u.a. Datensätze mit monatlichen und täglichen Niederschlagssummen, Tageswerten weiterer meteorologischer Parameter sowie Niederschlagsraten im Minutenabstand den Partnern in A2, A3 und A4 bereitgestellt.

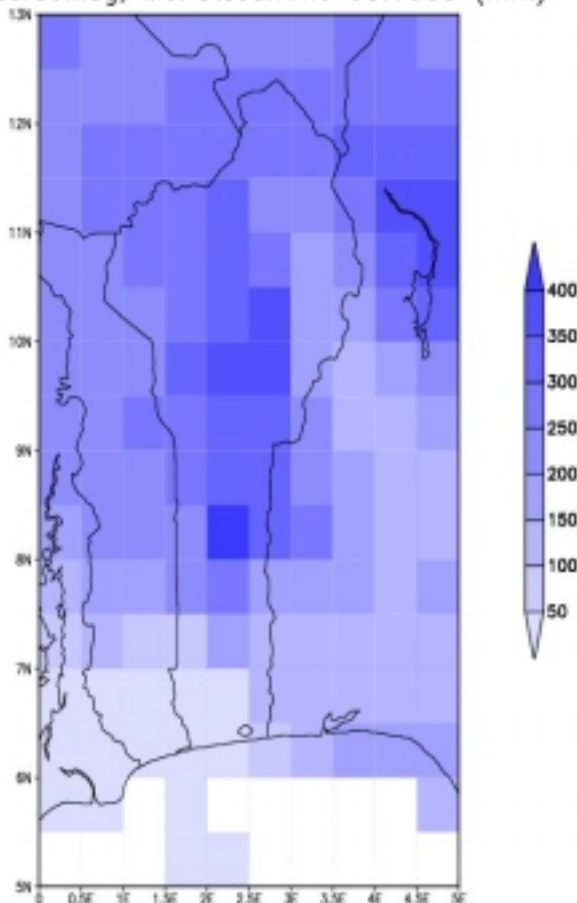
Im ersten Projektjahr schritten die Arbeiten zur Vervollständigung und Aktualisierung der stationsbezogenen Messdaten bzw. von Gitterfeldverteilungen zügig voran. Die Datensätze wurden qualitätsgeprüft, dokumentiert und für die anderen Teilprojekte auf der internen Internetseite des Projektes als herunterladbare Dateien zur Verfügung gestellt. Statistische Untersuchungen mit einem Ensemble von Läufen des globalen Klimamodells ECHAM4 zeigen u.a. ein beachtliches Niederschlagsvorhersagepotential an der Guineaküste auf interannualen bis multidekadischen Zeitskalen. Auf dem Gebiet der mesoskaligen Modellierungen wurden neben umfangreichen technischen Anpassungen und der Beschaffung von Antriebs- und Randfeldern erste Ergebnisse erzielt, die auf eine besondere Sensitivität des Niederschlages für Bodenwassergehalte zwischen Welkepunkt und Feldkapazität hinweisen.

Workpackage A1-1: Klassifizierung und Diagnose der Variabilität von Niederschlagsereignissen

Erstellung einer Langzeitniederschlagsklimatologie

Ziel der Arbeit ist die Beschreibung des Niederschlages in Benin und Umgebung, wobei die horizontale und zeitliche Auflösung so fein wie möglich sein soll. Diese Möglichkeiten sind vorgegeben durch die Ausgangsdaten. Als zu Grunde liegende Datenquellen wurden festgelegt:

Niederschlag, Monatssumme 08.1988 (mm)



- (A) Regensammlerdaten aus Benin und Nigeria auf täglicher Basis
- (B) Monatssummen aus Satellitenmessungen (SSM/I Messungen, Auswertung nach Ferraro) seit 1987, Auflösung: $1 \times 1^\circ$
- (C) Monatssummen aus Regensammlerdaten, Auflösung: $0.5 \times 0.5^\circ$, 1901-1998, Quelle: Climate Research Unit
- (D) Monatssummen aus Regensammlerdaten, Auflösung: $1 \times 1^\circ$, 1986-2000, Quelle: Global Precipitation Climatology Centre (GPCP)
- (E) Hochaufgelöste Niederschlagsabschätzungen aus Satellitendaten (ca. $0.25 \times 0.25^\circ$) für ausgewählte Zeiträume, noch zu erstellen

Die Datenquellen unterscheiden sich somit durch die Art der Beobachtung, die räumliche und zeitliche Auflösung und die zeitliche Abdeckung. Generell ist bei satellitengestützten

Messungen eine gute Darstellung der räumlichen Verteilung, jedoch eine fehlerbehaftete Einschätzung des Mittelwertes (“bias”) zu beobachten. Die Regensammlerdaten (A) sind – abgesehen von den noch nicht vorliegenden Auswertungen von Satellitendaten (E) – die einzige Möglichkeit, im Zeitlichen von der Monats- auf die Tagesskala ‘herunterzukommen’. Hierzu ist zusätzlich eine Abschätzung der Statistik von Niederschlagsereignissen in Benin notwendig, die aus den Regensammlerdaten (A) und aus täglichen Werten, die das GPCP für einen kurzen Zeitraum anbietet, abgeschätzt wird.

Die Art der Verbindung unterschiedlicher Datenquellen hängt entscheidend von den Abschätzungen über die Fehler der einzelnen Daten ab. Diese sind a priori unbekannt und wurden von den Autoren der obenstehenden Datensätze nicht erstellt. Es wird aus diesem Grund ein Verfahren entwickelt, die gesuchten Fehlermatrizen aus Fehlerangaben des GPCP zu vergleichbaren Datenquellen zu schätzen. Die Details dieses Verfahrens sind noch in Bearbeitung.

Für die Zwischenzeit bis zur Erstellung der gesuchten Niederschlagsklimatologie bietet sich die Datenquelle (C) an. Diese wurde erst vor kurzem fertiggestellt und ist im Rahmen des Projektes beschafft worden. Die obenstehende Abbildung zeigt ein beispielhafte Niederschlagsfeld. Für das Teilprojekt A4 wurden die von Bearbeiter Holger Hinterthür benötigten Daten aus diesem Datensatz den Bedürfnissen entsprechend ausgelesen und transformiert, wobei diese Arbeit in enger Kooperation der Bearbeiter erfolgte. Bei Interesse kann in entsprechender Weise jedes Teilprojekt auf diese bereits vorliegenden Daten Zugriff nehmen.

Gleichwohl ist mit dem Auftreten dieses Datensatzes die geplante Arbeit nicht als erledigt anzusehen. Als wichtigste Punkte sind zu nennen:

- Die raum-zeitlichen Strukturen müssen – zumindest für einzelne Episoden – mit Regensammlerdaten und satellitenbasierten Messungen verglichen werden.
- Es wird versucht, noch eine höhere räumliche Auflösung zu erzielen.
- Die Daten liegen nur in der Monatssumme vor. Die täglich vorliegenden Regensammlerdaten bieten die Möglichkeit, die zeitlich feinere Auflösung der Daten zu erzielen.

Workpackage A1-2: Großskalige und synoptische Antriebe für den Niederschlag

Einfluss der SST auf die großskalige Niederschlagsverteilung in Westafrika

Eine der Zielsetzungen in Workpackage A1-2 und B1-1 lautet, den Einfluss der SST auf die großskalige Niederschlagsverteilung in Westafrika anhand von ECHAM-Modelldaten zu untersuchen. Auf Initiative unserer Arbeitsgruppe wurde kürzlich ein Ensemble von ECHAM4-Simulationen in T42-Auflösung erstellt, welches als untere atmosphärische Randbedingung die beobachteten SST des GISST2.2-Datensatzes berücksichtigt. Darüber hinaus wurde auch der atmosphärische CO₂-Gehalt entsprechend den beobachteten Konzentrationen sukzessive erhöht. Mittlerweile stehen im Zeitraum 1903 bis 1994 vier solcher Monte Carlo-Experimente zur Verfügung, welche nun eine geeignete Datenbasis bilden, um den langfristigen Einfluss der globalen SST auf die Niederschlagsvariabilität in Westafrika zu quantifizieren (vergl. Paeth et al. 1999; Rodwell et al. 1999; Paeth et al. 2000). Mit Hilfe einer univariaten Varianzanalyse (ANOVA) lässt sich das gemeinsame externe Signal, in diesem Falle SST und CO₂, von den modellinternen Schwankungen differenzieren, um somit ein Maß für die Vorhersagbarkeit des simulierten westafrikanischen Niederschlages abzuleiten.

In Abb. A1-1 ist die Methode zunächst auf die Jahressummen des Niederschlages über dem Großraum Westafrika (30°W-30°E; 40°N-10°S) und den Gesamtzeitraum 1903 bis 1994 angewendet worden. Den größten Einfluss auf das Niederschlagsgeschehen üben die SST über dem Golf von Guinea aus (oben) mit annähernd 70 % der gesamten Niederschlagsvariabilität. Eine relativ große Bedeutung der SST liegt jedoch auch für den gesamten Guinea-Küstenbereich bis ca. 10° N vor. Es ist anzunehmen, dass mit der starken Kopplung der Jahresniederschläge an das SST-Feld die afrikanische Sommermonsundynamik charakterisiert wird. Darüber wird in naher Zukunft eine saisonal differenzierte Betrachtung Aufschluss geben können. Der untere Kartenausschnitt in Abb. A1-1 zeigt die zeitliche Veränderung des Jahresniederschlages über Westafrika im 20. Jahrhundert. Es wird jeweils der Ensemblemittelwert dargestellt, da dieser ein guter Schätzer des gemeinsamen externen Signals repräsentiert. Es ergibt sich ein klarer Nord-Süd-Gradient mit deutlich höheren Regenmengen im Küstenbereich zwischen Guinea und Nigeria sowie schwach negativen Trends über dem zentralen und nördlichen Teil Westafrikas.

Da in Westafrika zwei Regionen mit konträrer Niederschlagsentwicklung existieren, bietet es sich an, entsprechende Flächenmittelwerte zu bilden, um neben der räumlichen Ausprägung (Abb. A1-1) auch die zeitliche Entwicklung des externen Signals und die charakteristische Zeitskala der Vorhersagbarkeit zu identifizieren. Die Zeitreihen in Abb. 2 beziehen sich auf den Ausschnitt 20°W-20°E und 13°-35°N ("Nordwestafrika") bzw. 5°-13°N ("Guinea-Küste"). Für zukünftige Ansätze ist eine stärkere Differenzierung des ersten Teilgebietes in Sahel (13°-22° N) und Nordafrika (22°-35° N) sowie eine Beschränkung auf die Landpunkte geplant.

Es zeigt sich, dass der größte Anteil des positiven Trends im südlichen Teilgebiet zu Beginn des 20. Jahrhunderts auftritt (a). Dieses Ergebnis ist analog zu Paeth et al. (2000) und deutet vermutlich auf eine großräumige und umfassende Veränderung im SST-Feld hin, obwohl die Verlässlichkeit der GISST-Daten vor 1950 nicht völlig unumstritten ist. Die rezente Zunahme nach 1970 könnte Ausdruck eines CO₂-induzierten Erwärmungssignals sein, wofür aber durch weitere Untersuchungen unter Einbeziehung der bereits vorliegenden Modelldaten vom Hadley Centre zusätzliche Indizien zu suchen sind. Insgesamt ist die simulierte Niederschlagsvariabilität im Küstenbereich deutlich stärker als im ariden Teil Westafrikas, wo die Niederschlagsabnahme zwischen 1903 und 1994 kaum auffällt (b). Das ECHAM4-Modell reproduziert sogar die vielzitierten humiden 50er Jahre und die darauffolgende Reduktion der Jahresniederschläge zwischen 1960 und 1980. Danach erhöhen sich die jährlichen Regenmengen seit Mitte der 80er Jahre wieder kontinuierlich.

Die zeitliche Entwicklung des Signals wird deutlich, indem die ANOVA über gleitende 20-jährige Perioden der Niederschlagszeitreihen durchgeführt wird. Über dem westafrikanischen Küstenstreifen (c) unterliegt der SST-Einfluss während des 20. Jahrhunderts kaum zeitlichen Variationen und dominiert mit ca. 60 % das Niederschlagsgeschehen. Ganz anders präsentiert sich die Situation über dem ariden Teilgebiet (d), wo der externe Faktor sporadisch 40 % der gesamten Niederschlagsvariabilität erklärt, häufig jedoch keine statistisch signifikanten Werte erreicht.

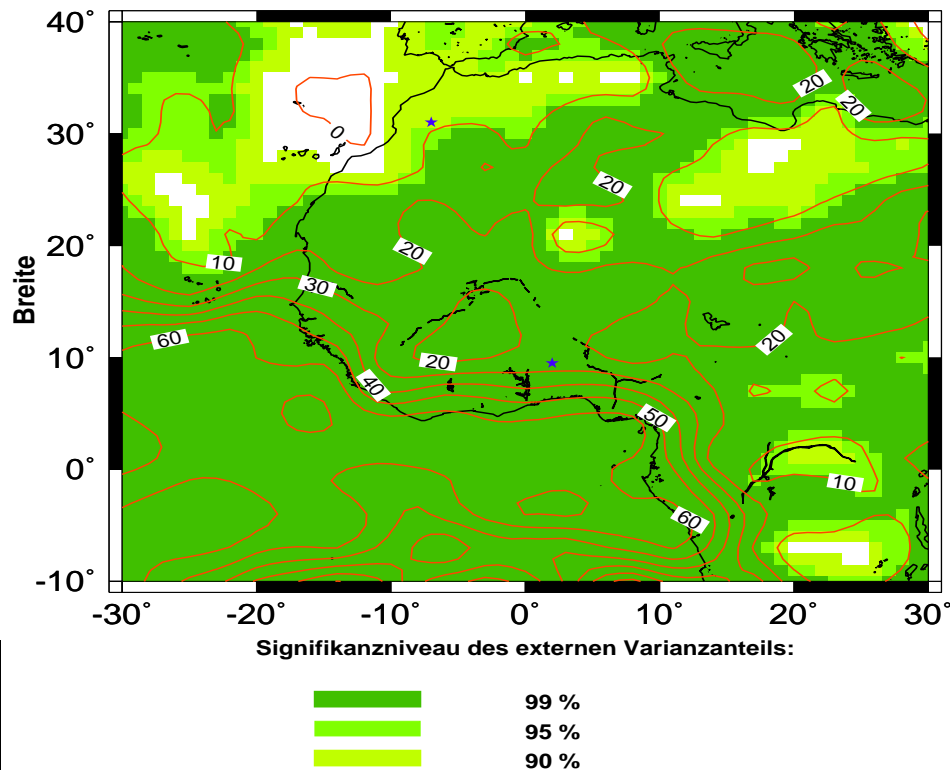
Die bevorzugte Zeitskala der SST-induzierten Vorhersagbarkeit leitet sich aus einer spektralen Aufschlüsselung der extern erklärten Varianz ab. Dabei bezieht sich die ANOVA jeweils auf zunehmend geglättete Niederschlagszeitreihen. Mit Tiefpassfiltern zwischen einem und vierzig Jahren werden alle Zeitskalen von interannuell bis multidekadisch abgedeckt. Im Falle der Guinea-küste (e) lässt sich besonders die dekadische bis multidekadische Niederschlagsvariabilität aus dem SST-Feld reproduzieren, wobei immerhin erklärte Varianzen von 80 % überschritten werden gegenüber ca. 60 % bei den interannuellen Schwankungen. Im nördlichen Teil Westafrikas (f) sind ebenfalls die 10- bis 20-jährigen Perioden am besten reproduzierbar, allerdings auf einem deutlich geringeren Niveau von ca. 50 %.

Zusammenfassend lässt sich schon jetzt sagen, dass die Variationen des globalen SST-Feldes eigentlich nur im Guinea-Küstenbereich ein zuverlässiges Vorhersagekriterium offerieren. Insbesondere in der Sahara und Sahelzone lässt das ECHAM4-Modell keinen klaren Zusammenhang zwischen den Jahresniederschlägen und dem thermischen Zustand der Meeresoberfläche erkennen. Für die Küstenzone hingegen ergibt sich auf allen Zeitskalen eine klare SST-induzierte Vorhersagbarkeit, die wahrscheinlich aus dem afrikanischen Sommermonsunregime resultiert. Diesem Aspekt muss in naher Zukunft eingehender nachgegangen werden, indem die Jahressummenbetrachtung saisonal verfeinert wird. In diesem Kontext ist im Projekt vor allem auch die Realisierung von Ensemblesimulationen mit dem regionalen Klimamodell REMO vorgesehen. Die Initialisierung von REMO ist derzeit eines der vordringlichen Forschungsvorhaben und seit einiger Zeit bereits in vollem Gange. Darüber hinaus empfiehlt sich aber auch die Einbeziehung

anderer Modelldaten, z.B. vom Hadley Centre (Rodwell et al. 1999), um die Modellunsicherheiten der vorliegenden ECHAM-Version abzuwägen.

ANOVA des ECHAM4/GISST-Ens.: Jahressummen von N
Zeitraum 1903-1994; global in T42

erklärte Varianz in %



Trend des Ensemblemittels, 1903-1994: Jahressummen von N

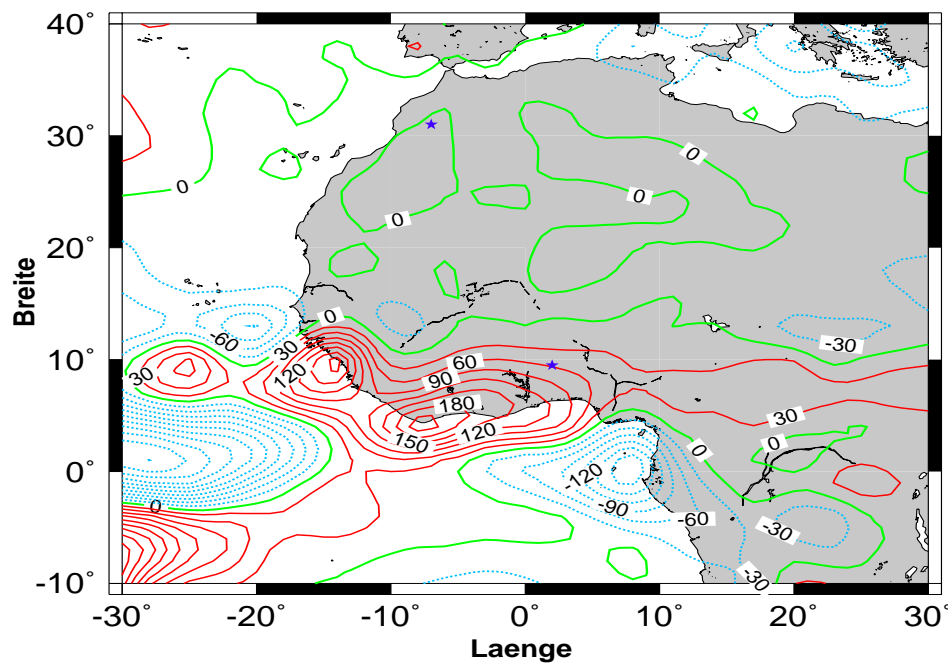


Abb. A1-1: (Oben) SST-Anteil an der gesamten Niederschlagsvariabilität in Westafrika (Isolinien) und Signifikanzniveau (Hintergrundfarbe). Unten: Langjähriger Niederschlagstrend im Ensemblemittel der ECHAM4-Simulationen.

Vorhersagbarkeit des Niederschlags in Westafrika: ECHAM4/GISST-Ens.

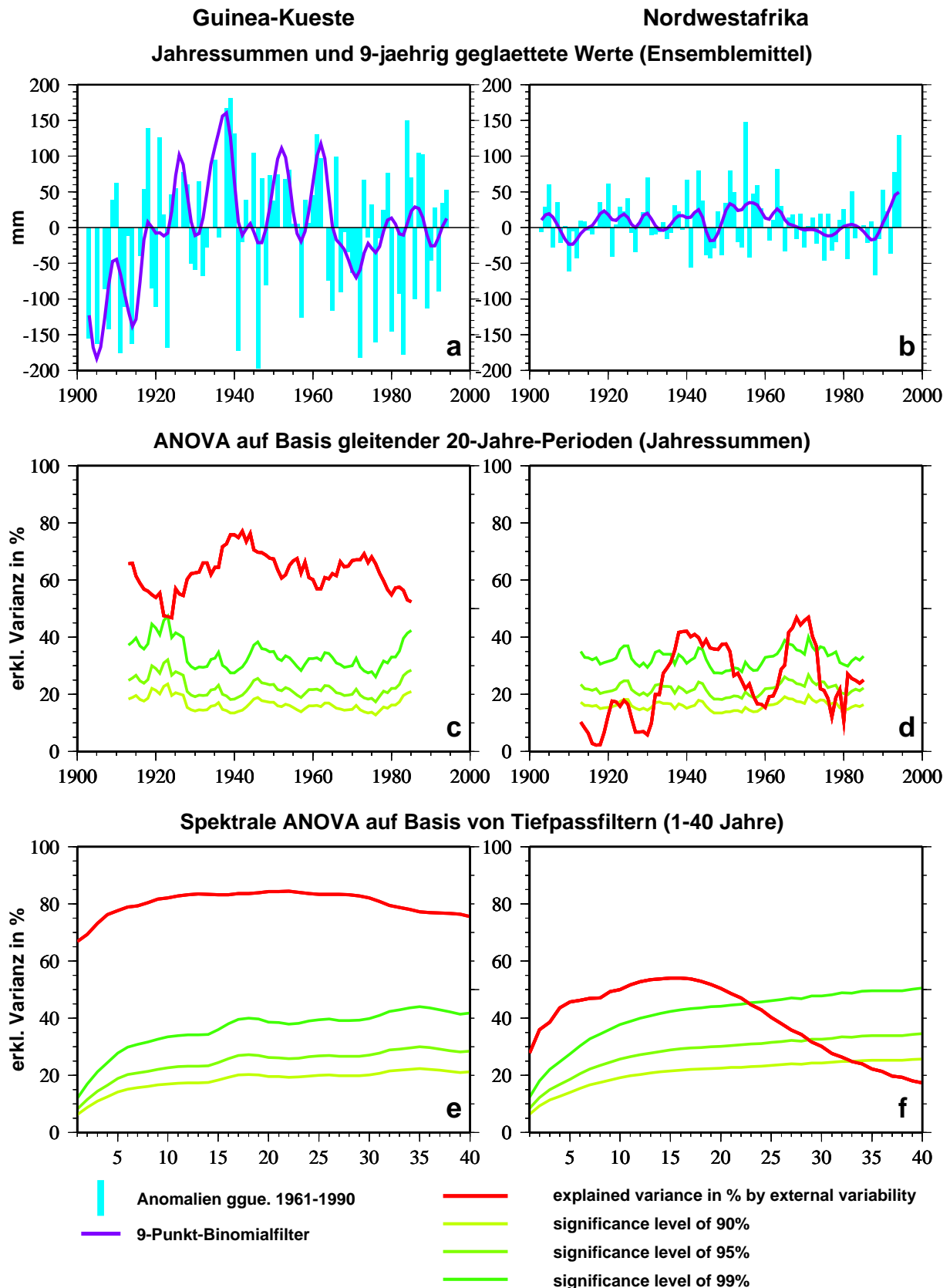


Abb. A1-2: (Oben): Zeitreihe der Jahresniederschläge im Gebietsmittel über dem Guinea-Küstenstreifen (links) und Nordwestafrika (rechts). Mitte: SST-Anteil an der gesamten Niederschlagsvariabilität auf Basis 20-jähriger Zeitscheiben. Unten: Vorhersagbarkeit der Niederschlagsvariabilität in Abhängigkeit von der Zeitskala der Tiefpassfilterung.

Quantifizierung der Koppelung zwischen „African Easterly Waves“ und Konvektionseignissen in Benin

Einleitung

Die Bedeutung der "African Easterly Waves" (AEWs) für den Niederschlag in der Sahel- und Sudanzone ist bis heute noch nicht quantitativ geklärt. Speziell der Zusammenhang zwischen den AEWs und "Squall Lines" (SLs), die zu etwa 75% zum gesamten monsunalen Niederschlag in der Sahelzone und zu 52% in der Sudanzone (Omotosho, 1985), in welcher das Intensivmessgebiet des oberen Ouémétales (HVO) gelegen ist, beitragen, ist nicht vollständig verstanden. So zeigen die klassischen Arbeiten von Reed et al. (1977) und Payne und McGarry (1977), aber auch neuere Studien von Duvel (1990) und Diedhiou et al. (1999), dass eine Häufung von Niederschlagsereignissen auf der Trogvorderseite, zwischen dem Bereich maximaler Nordwinde und der Trogachse, zu beobachten ist. Andere Arbeiten von Bolton (1981), Rowell und Millford (1993) und Shinoda et al. (1999) bestätigen diesen Zusammenhang aber nicht. Die Problematik besteht darin, dass viele der obigen Untersuchungen auf einen Zeitraum von einem Monat oder weniger basieren. Daher wird in dieser Arbeit für das Jahr 1998 die Beziehung zwischen den AEWs und SLs für die Monate Mai bis Oktober, d.h. den Zeitraum der maximalen monsunalen Niederschläge, untersucht.

Die Regenzeit des Jahres 1998 zeichnet sich durch einen trockenen Beginn aus, wobei speziell die Niederschlagsmengen an der Atlantik- und Guineaküste gering ausfielen. Der Juli war sogar in nahezu allen Regionen Westafrikas zu trocken. Dabei wurden als Bezugszeitraum die Jahre 1968 bis 1999 zugrunde gelegt. Die zweite Hälfte der Regenzeit (August und September) lieferte deutliche Niederschlagsüberschüsse in der Sahelzone, so dass 1998 insgesamt ein Dipoljahr war, mit positiven Niederschlagsanomalien in der Sahelzone und negativen an der Guineaküste. Ebenso ist Benin bezüglich der Niederschlagsanomalien zweigeteilt. In Nordbenin (nördlich von 8°N) treten, außer im Juli, im gesamten betrachteten Zeitraum, überdurchschnittliche Niederschlagsmengen auf; im südlichen Teil Benins wurden dagegen durchweg unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen beobachtet.

AEW-Zugbahnen

Für die folgenden Untersuchungen der AEWs wurden die Analysen des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) verwendet. Die Identifikation der Wellentröge erfolgt zunächst anhand von Hovmöllerdiagrammen des transienten meridionalen Windes (in 850 und 700 hPa). Mit Hilfe dieser Diagramme wird die ungefähre geographische Länge des Trogas der AEWs ermittelt. Die Festlegung der geographischen Breite und des exakten Längengrades erfolgt anschließend anhand von Horizontalverteilungen der Stromlinien des 2-6-tägig bandpaßgefilterten Horizontalwindes (in 850 hPa) und der ebenfalls bandpaßgefilterten relativen Vorticity (in 700 hPa).

Das Ergebnis dieser Identifikationsmethode ist in der Abb. A1-3 (oben) für Juli, August und September dargestellt. Insgesamt traten von Mai bis Oktober 38 AEWs auf, von Juli bis September 24. In der Regel treten zwei Wellen gleichzeitig auf, eine im Norden, die meistens zwischen 15° und 20°N wandert, und die andere im Süden, die meistens zwischen 5° und 10°N beobachtet wird. Der trockene Monat Juli unterscheidet sich von den feuchten Monaten August und September darin, dass in nur vier Fällen im Norden und im Süden die beiden beschriebenen Wellen gleichzeitig auftreten. Die restlichen fünf AEWs des Juli werden allein im Norden beobachtet, so dass im Vergleich zum August und September die Wellenaktivität im Süden deutlich geringer ausfällt. Auch zwischen 3° und 1°O (Benin) treten im Juli nur drei südliche Wellen auf, wohingegen im August und September sieben bzw. sechs Wellen zu beobachten sind. Die geringere Wellenaktivität bezieht sich aber nicht nur auf die Anzahl der südlichen AEWs, sondern auch auf die Lebensdauer dieser Wellen und damit auf die Länge der Zugbahnen. Dieses Ergebnis deutet daraufhin, dass zum Höhepunkt der Regensaison (Juli bis September) die Wellenaktivität im Süden im Zusammenhang mit den beobachteten Niederschlagsmengen steht.

SL-Zugbahnen

Die Identifikation der SLs erfolgt mit Hilfe der Satellitendaten der "Tropical Rainfall Measuring Mission" (TRMM) und der drei Satelliten F11, F13 und F14 (Polarorbiter) des "Defense Meteorological Satellite Program" (DMSP). Dabei werden für jeden Überflug über Westafrika aus den Messungen im Mikrowellenbereich des "TRMM Microwave Imager" (TMI) und des "Special Sensor Microwave/Imager" (SSM/I) Regenraten berechnet. Diese Berechnung erfolgt anhand des von Ferraro und Marks (1995) entwickelten Algorithmusses, der für diese Studie mit Hilfe von Regenmessungen am Boden (HVO-Gebiet) und dem Regenradar des TRMM-Satelliten an die westafrikanischen Niederschlagssysteme angepasst wurde. Zwei Beispiele solcher Überflüge mit den dazugehörigen berechneten Regenraten zeigt die Abb. A1-3 (mitte und unten). Es ist in beiden Fällen eine gut entwickelte SL zu erkennen, mit einer Linie stärkster Niederschläge ("leading edge", dunkelgrau) und einem sich anschließendem "Schirm" schwacher Niederschläge (hellgrau). Für die Bestimmung der Zugbahnen wird die Position der SL an der Lage der "leading edge" festgelegt. Da zwischen sechs und acht Überflüge der vier verwendeten Satelliten pro Tag stattfinden, besteht die Möglichkeit die Verlagerung der langlebigen SLs (> 6 Std) zu verfolgen. Ist es unklar, ob zwei verschiedene Überflüge die gleiche SL zeigen, werden zur eindeutigen Zuordnung Infrarotbilder von METEOSAT in dreistündiger Auflösung hinzugezogen.

Die so ermittelten Zugbahnen verlagern sich von Mai bis August nach Norden, so dass im Mai die meisten Zugbahnen zwischen 5° und 10°N zu beobachten sind, im August dagegen zwischen 10° und 17.5°N . Anschließend, im September und Oktober, verlagern sich die Zugbahnen wieder nach Süden. Der Vergleich des trockenen Monats Juli mit den feuchten Monaten August und September zeigt, dass im August und September zum einen deutlich mehr SLs auftraten und zum anderen in diesen beiden Monaten eine größere SL-Aktivität östlich von 10°O zu beobachten ist.

In Benin ist im Juli allerdings kein starker Rückgang der SL-Anzahl zu beobachten. So überquerten im Juli sechs, im August sieben und im September acht der untersuchten langlebigen SLs Benin. Die Frage, ob ein Rückgang der Niederschlagsergiebigkeit pro SL-Ereignis oder Anomalien bei anderen regenproduzierenden Systemen für die Trockenheit im Juli verantwortlich ist, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Zusammenhang zwischen AEW-Phase und SL-Lebenszyklus

Um zu untersuchen, in welcher Phase einer AEW SLs entstehen bzw. sich auflösen, sind zunächst alle 38 Wellen, die zwischen Mai und Oktober auftraten, in acht Bereiche unterteilt worden. Daraufhin wurden die Entstehungs- und Auflösungsgebiete aller SLs, die zur selben Zeit wie die AEWs auftraten, diesen acht Bereichen zugeteilt. Es ergibt sich, dass die SLs südlich von 12.5°N im wesentlichen auf der Trogvorderseite entstehen und eine Auflösungstendenz im Bereich des Rückens aufweisen. Abb. A1-3 (mitte) liefert ein Beispiel einer SL, die sich auf der Trogvorderseite einer AEW organisiert hat. Die Position der Tröge wurde durch Kreuze gekennzeichnet und die Trogachse, sowie der Rücken und der Bereich maximaler Nordwinde, durch Linien (T, R, N). Abb. A1-3 (unten) zeigt dagegen ein Beispiel einer SL, die unabhängig von einer AEW aufgetreten ist. Eine weitergehende Analyse des Bereichs zwischen 3° und 1°O (Benin) ergab, dass sich auf der Trogvorderseite von etwa 50% der AEWs (14 von 29), die östlich von 3°O entstanden sind, SLs gebildet haben, die Benin überquerten.

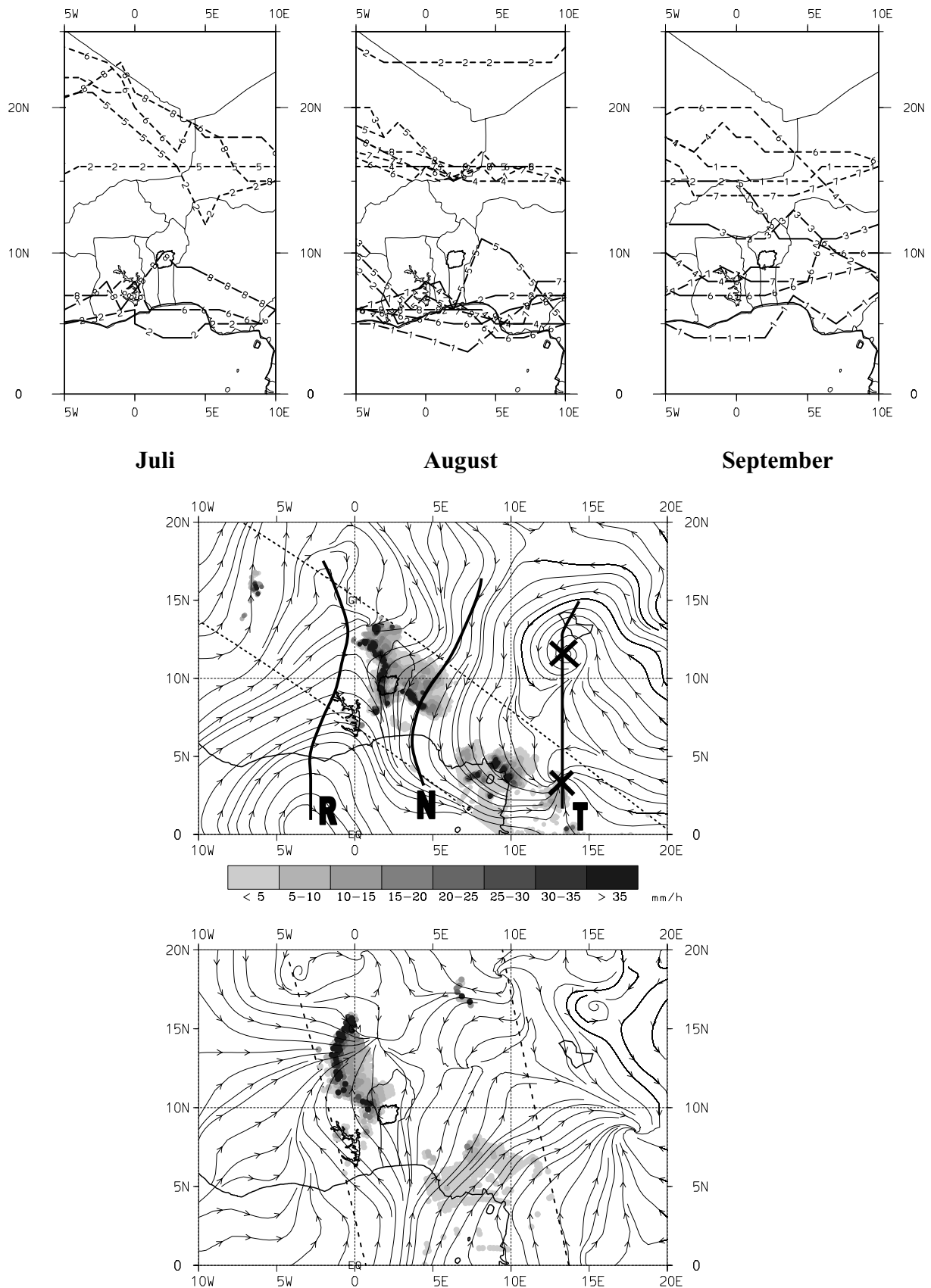


Abb. A1-3: Oben: AEW-Zugbahnen für Juli, August und September 1998. Die Zahlen entlang der Zugbahnen geben an, um die wievielte Welle im Monat es sich handelt. Mitte+Unten: Stromlinien in 850 hPa (AEW-Tröge sind durch Kreuze gekennzeichnet) und berechnete Regenraten aus Satellitenüberflügen von TRMM (mitte) und F13 (unten).

Untersuchungen zur Koppelung zwischen „African Easterly Waves“ und Konvektion im LM Modell

Einleitung

Die Arbeiten zur mesoskaligen Modellierung mit dem Lokalmmodell des DWD (LM) waren in dieser Anfangsphase des Projekts eher technischer Natur. So mussten die Voraussetzungen für den Modellbetrieb geschaffen werden (siehe auch die Beschreibung zum Teilprojekt B1). Das geschah zum einen durch die Beantragung von Rechenzeit und Speicherplatz auf den Parallelrechnern des *John von Neuman Institutes for Computing* (NIC) in Jülich, zum anderen durch die Beschaffung von Antriebsdaten und Boden/Vegetationsdaten. Es sollte auch angemerkt werden, dass die „Modellinfrastruktur“ für die Umgebung des LM – also Auswerteroutinen und eine Umgebung zur Erzeugung von Modellantriebsdaten – vom DWD nicht geliefert wird und daher nur in Bruchstücken in den bereits existierenden Arbeitsgruppen vorhanden ist. Der Umfang der geplanten Arbeiten setzt allerdings eine solche Umgebung voraus, so dass hier mit der Entwicklung geeigneter Werkzeuge begonnen werden musste.

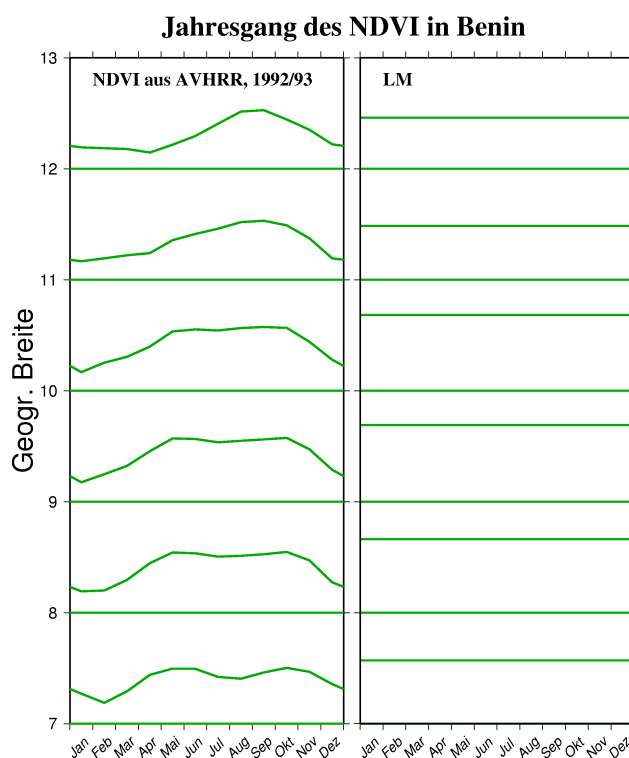


Abb. A1-4: Zeitreihen des NDVI für Benin in Abhängigkeit von der geographischen Breite. Links die aus AVHRR-Daten für 1992/93 abgeleiteten Reihen, rechts die vom DWD gelieferten Daten, die für Breiten unterhalb von 20°N keinen Jahresgang mehr vorsehen. Im linken Bild wird im Süden die mit der Verlagerung der Konvergenzzone im Jahresverlauf verbundene zweigipfelige Struktur deutlich

Einrichten der Modellinfrastruktur und Beschaffung von Antriebsdaten

Das Ziel der mesoskaligen Modellierungen in diesem Teilprojekt ist die Untersuchung konvektiver Ereignisse vor allem im Hinblick auf deren Wechselwirkung mit den AEWs. Das geschieht durch die Analyse von Fallsimulationen interessanter Konvektionseignisse. Für das Jahr 2000 sind bereits eine Reihe von Fällen ausgewählt worden, für die GME-Analysedaten vom DWD beschafft wurde. Die vom DWD gelieferten Vegetationsdaten waren in Afrika für unseren Bedarf unzureichend, wie der Vergleich der Vegetationszyklen mit denen aus NDVI-Daten des Zeitraums April 1992 – März 1993 (Hagemann et al. 1999) zeigt (Abb. A1-4).

Aktuelle Landnutzungs- und Vegetationsdaten werden von der RSRG aus Teilprojekt A3 vermutlich im Laufe des Sommers 2001 für ganz Nordafrika zur Verfügung gestellt werden. Vorübergehend wurden Boden- und Vegetationsdaten des *U. S. Geological Survey* (USGS) akquiriert, die global auf einer Skala von 1 km für die Landnutzungen und von 0.5° für die Bodenklassifikationen vorliegen. Diese Daten sind zwar Ende 2000 gebietsweise überarbeitet worden, müssen aber für die bearbeiteten Regionen noch qualitätsgeprüft werden. In Tab. A1-1 befindet sich eine Übersicht über die vorliegenden Daten des USGS.

Typ	Quelle und Beschreibung
Landnutzung	USGS, globale Vegetationsklassifikationen in einer Auflösung von 3 sec. (etwa 927 m Gitterweite in zonaler Richtung). Klassifikationen für: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Biosphere Atmosphere Transfer Scheme</i>, 20 Klassen (nur Vegetation) - <i>International Geosphere-Biosphere Programme</i>, 17 Klassen - <i>Olson Global Ecosystem Land</i>, 96 Klassen - <i>Simple Biosphere</i>, 10 Klassen - USGS, 24 Klassen
Geländemodell	USGS, 1km Auflösung global
Bodencharakteristik und -typ	Webb et al. 1991: 1° Auflösung global. Inhalt der Datenbank: <ul style="list-style-type: none"> - Bodenpartikelgröße, 107 Kategorien - Bodenprofilhöhe - Texturbasierter potentieller Wasserspeicher - Klimatologischer Wassergehalt - Potentieller Wasserspeicher im Bodenprofil - Potentieller Wasserspeicher in der Wurzelzone - 15 Horizonttiefen - Anteile von Sand, Lehm und Schlamm in den Horizonttiefen
Bodenklassifikation	FAO, 1° Auflösung, Klassifikation von 133 Typen
Geländemodell	<i>Earth Resources Observation System (EROS)</i> Hydrologisches digitales Geländemodell für Afrika mit abgeleiteten Parametern, 1km Auflösung: <ul style="list-style-type: none"> - Geländehöhen - Neigung und Exposition - Barrieren und künstliche (subskalige) Abflüsse - Definition von Einzugsgebieten - Flüsse und Flussrichtungen

Tab. A1-1: *Verfügbare Datensätze zur Landnutzung und Bodenklassifikation*

Die Vegetationsklassifikation beinhaltet allerdings noch keine Information über den saisonalen Vegetationszyklus; vorläufig muss dieser aus den oben beschriebenen Daten der NOAA-Satelliten aus den Jahren 1992/3 abgeleitet werden. Später werden die von A3 zur Verfügung gestellten Daten auch für längere Zeiträume Aufschluss darüber geben. Dabei wird natürlich interessant sein, welcher interannuellen Variabilität diese Vegetationszyklen unterliegen. Besonders in trockenen Regionen ist zu erwarten, dass die Vegetationsstärke, die im NDVI oder dem LAI gemessen werden kann, eher direkt mit den auftretenden Niederschlagsereignissen als mit klimatologischen Jahresgängen verknüpft ist.

Die Vegetations- und Bodendaten werden auch bei der Verwendung von TOPLATS als Bodenmodul im LM in höherer als der vom DWD gelieferten Auflösung benötigt. Derzeit wird das TOPLATS bereits in A2 ohne meteorologisches Modell betrieben. Die Implementation von TOPLATS in das LM erfolgt derzeit am Meteorologischen Institut der Universität Bonn, wobei das SVAT-Modul mit einer höheren Auflösung (1km) als des Atmosphärenmodell (2.8...7 km) betrieben wird.

Zur Analyse der GME-Daten und des LM-Modelloutputs wurden verschiedene Werkzeuge geschaffen. Dabei wird generell zwischen der Aufbereitung von Daten für druckfähige Grafiken und für die interaktive (animationsorientierte) Analyse von Modelldaten unterschieden, da die Anforderungen an die Software sehr unterschiedlich sind. Die Auswertung erfolgt in drei Schritten:

- Extraktion der GRIB1-codierten Daten mit Programmen auf der Basis von NOAA-Software, in die lediglich die nationalen GRIB-Variablentabellen des DWD eingeführt werden mussten.
- Die Grafiken für qualitativ bessere Darstellungen werden mit Hilfe des *Generic Mapping Tools* (GMT, Smith and Wessel 1991; 1998) erstellt. Dazu wurden entsprechende Auswertprogramme (Interpolation, Vertikalschnitte, Stromlinien und andere abgeleitete Variablen) erstellt, welche die GRIB-extrahierten Daten in geeigneter Form aufbereiten.
- Die Animations-orientierte Analyse erfolgt mit Hilfe der Software Vis5d. Sie ermöglicht in besonders einfacher Weise die Kontrolle des Modelloutputs beispielsweise bei Instabilitäten oder bei schnellen zeitlichen Entwicklungen. Auch hier musste die Schnittstelle zwischen den aus dem LM-Grib-Code extrahierten Daten und dem Vis5d erstellt werden.

Die Programme wurden so gestaltet, dass sie möglichst einfach auf andere UNIX-Workstations übertragbar sind.

Workpackage A1-3: Mesoskalige Niederschlagsysteme und ihre Wechselwirkung mit größer-skaliger Strömung und Landoberflächenstruktur

Definition der Schnittstellen REMO - LM und Auswahl von Konvektionsereignissen für den Modelltest

In diesem Workpackage sollte die Schnittstelle zwischen REMO und dem LM erstellt werden. Dieses Vorhaben erwies sich aus zwei Gründen als problematisch: Das REMO bedurfte größerer Umstellungsarbeiten, bevor es auf den verfügbaren Plattformen betrieben werden konnte. Die erforderlichen Arbeiten wurden am MPIfM Hamburg durchgeführt; der Programmcode von REMO steht erst ab April 2001 zur Verfügung. Zudem erwies sich die Verwendung anderer Eingangsdaten als der routinemäßig beim DWD verwendeten initialisierten GME-Analysen für das LM mit den zur Verfügung gestellten Mitteln als unmöglich. Dieses Problem ist beim DWD auch bekannt, daher werden die Kooperationspartner des DWD dazu angehalten, neue Schnittstellen zu entwickeln; die Einzelprojekte werden zur Zeit in ein Programmpaket zusammengeführt, das allerdings erst am Beginn seiner Entwicklung steht.

Aus diesem Grund wird auch für die aktuelle Kooperation DWD/MIUB im Rahmen von IMPETUS eine Schnittstelle zum LM geschaffen, die universellerer Natur ist und deshalb die REMO-Schnittstelle enthalten soll.

Zu Beginn der Arbeiten stellte sich heraus, dass die im LM verwendeten GRIB-Leseroutinen GRIB-komprimierte Daten nicht lesen können, die beispielsweise mit (wesentlich benutzerfreundlicheren) von der NOAA vertriebenen Programmen geschrieben wurden, obwohl die GRIB-Komprimierung eigentlich ein Standard ist. Es mussten also die Programme der DWD-GRIB Library auf die verwendeten Plattformen der Linux- und DEC Ultrix-Workstations portiert werden.

Die universelle Schnittstelle sieht die Vorgabe meteorologischer Eingabedaten für das LM auf einem beliebigen Gitter vor. Die Herkunft dieser Daten ist unproblematisch, sie müssen nur in einer bestimmten Form – allerdings ohne festgelegte Gitterstruktur – abgelegt werden. Die Orographiedaten und die Landnutzungsklassen werden aus dem globalen Datensatz nach Bedarf extrahiert. Die Verwaltung der Landnutzungsdaten erfolgt in einer separaten Datenbank in komprimierter Form, um deren Austausch bei Vorhandensein überarbeiteter Daten aus A3 auf einfachem Wege vornehmen zu können.

Grundlage des gesamten Programmpakets ist die Entwicklung effizienter Interpolationsroutinen auch für nichtreguläre Gitter (Gauss-Gitter, globale Triangulation des GME u. a.). Der aktuelle Stand dieser Arbeiten ist, dass die Portierung der DWD-Bibliotheken abgeschlossen ist, die GRIB-Schreib-/Leseroutinen somit für FORTRAN90 verwendbar sind. Ein 2d/3d-Interpolationswerkzeug in Form einer bi/trikubischen Interpolation wurde entwickelt; die Struktur der für das LM notwendigen Daten wurde definiert und dokumentiert. Die Schnittstelle zu

den Boden- und Landnutzungsdaten und dem globalen digitalen Geländemodell ist noch nicht abgeschlossen. Weiterhin muss noch eine Qualitätskontrolle bzw. Balancierung der meteorologischen Daten vorgenommen werden, um in dem LM-Läufen nicht heftige Initialstörungen zu erzeugen.

Ein weiteres Ziel in diesem Workpackage sind ausführliche Tests der Modelle in der Umgebung des Westafrikamonsuns und der AEW. Dazu war auch hier zunächst die Akquisition von Eingabedaten für interessante Fälle notwendig, die Testrechnungen selbst wurden wegen den unzureichenden Vegetationsdaten noch aufgeschoben. Für diesen Zweck wurde beim DWD die Einrichtung eines eigenen Datenbank-Zugriffs erwirkt, da die herkömmliche Verbreitung von Daten auf Band oder mit Hilfe eines seitens des DWD vorbereiteten FTP-Zugriffs wegen der großen Datenmengen und der erwünschten Flexibilität in der Auswahl von Ereignissen sich als undurchführbar erwies.

Für das Jahr 2000 wurden interessante Fälle ausgesucht, die für Modell-Sensitivitätsstudien und zur Entwicklung der Kopplungen dienen können. Die Analysedaten dieser Fälle liegen vor (Tab. A1-2), Testfälle wurden nur für den Aufbau der LM-FOOT3DK-Schnittstelle durchgeführt.

Datum	GME-Analyse	Initialisierte Analyse
21.-22.6.00	18.6.-23.6.	21.-22.6.
19.7.00-21.7.00	16.7.-22.7.	19.7.-21.7.
28.7.00-3.8.00	28.7.-4.8.	28.7.-3.8.
15.9.00-17.9.00	11.9.-18.9	15.9.-17.9.

Tab. A1-2: Zeiträume akquirierter Daten für interessante Konvektionseignisse. GME-Analysen enthalten keinen vollständigen Datensatz zum Start des LM, Zeiträume der initialisierten Analysen beschreiben somit die geplanten LM-Simulationszeiträume. Die initialisierten Analysen liegen in dreistündigem, die normalen in sechsstündigem Abstand vor.

Derzeit werden konzeptionelle Fälle mit synthetischen Anfangsfeldern gerechnet, um die Wirkungsweise der Konvektionsparametrisierung darzustellen. Das Ziel dabei ist letztlich, eine dem Umfeld des Westafrikamonsuns angepasste Umgebung (mit nordwärts gerichtetem Temperaturgradienten, einem AEJ und der monsunalen Scherzone unterhalb von 1.5-2 km Höhe) vorzugeben, in welcher der Parametereinfluss auf den konvektiven Niederschlag untersucht werden kann. Die Schwierigkeit bei der Vorgabe eines derart komplexen Hintergrundfeldes besteht darin, dass es im Sinne der hydrodynamischen Gleichungen balanciert sein muss, um die Initialschwingungen im Modell möglichst gering zu halten.

Mesoskalige Niederschlagsysteme und ihre Wechselwirkung mit größerskaliger Strömung und Landoberflächen-Struktur

Einleitung

Im ersten Antragsjahr konzentrierten sich die technischen Arbeiten auf die Anpassung von FOOT3DK zum Einsatz in IMPETUS. Sie umfassen die Beschaffung und Aufbereitung von Datensätzen zur Formulierung der unteren Modellrandbedingung sowie die Integration des auflösungsvariablen Landoberflächenmoduls in die aktuelle Modellversion, insbesondere seine Abstimmung mit der Niederschlagsparameterisierung. Zudem wurde das Modell im ungenesteten Modus (Antrieb durch Radiosondenprofil) erfolgreich auf seine Einsatzfähigkeit in niedrigen Breiten getestet. Als Hauptaufgabe wurde die Kopplung von FOOT3DK an das Lokal-Modell des Deutschen Wetterdienstes entwickelt und in einer Testversion bereits realisiert (näheres hierzu vgl. Projekt B1).

Die wissenschaftlichen Untersuchungen zur Beeinflussung des Niederschlags durch die Landoberfläche wurden anhand umfangreicher eindimensionaler Ensemble-Integrationen eingeleitet. Aus dem Ensemble wurde mittels uni- und multivariater statistischer Verfahren die Sensitivität des Modellniederschlags in Bezug auf Parameter des Boden- und Vegetationsschemas abgeleitet.

Verfügbarkeit und Aufbereitung von Datensätzen

Als untere Randbedingung von FOOT3DK werden Daten zur Orographie, zur Landoberflächenbeschaffenheit und zur Bodenbeschaffenheit benötigt. Zu diesem Zweck wurden die Datensätze „Global 30 Arc-Second Elevation Data Set“ (GTOPO30, Orographie) und „Global Land Cover Characterization“ (GLCC, Landnutzung) des U.S. Geological Survey (USGS) Earth Resources Observation Systems (EROS) Data Center beschafft. Diese Datensätze sind im Internet frei verfügbar (weitere Informationen unter <http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.html>). Die nominelle horizontale Auflösung beträgt 30 Bogensekunden (ca. 0,925 km in Äquatornähe) für die Orographie und 1 km für die Oberflächenbeschaffenheit. Allerdings weist der tatsächliche Informationsgehalt der Daten große regionale Unterschiede auf. Für den Raum Benin besitzen die GTOPO30-Daten eine ausreichende Qualität, während die GLCC Daten vor allem im HVO-Gebiet nur wenig räumliche Variabilität in der Landnutzung erkennen lassen. In Zukunft ist auf der Basis der in A2 und A3 erzielten bzw. angestrebten Ergebnisse eine differenzierte Charakterisierung von Inhomogenitäten in der Landoberflächenstruktur zu erwarten. Daten zur Bodenbeschaffenheit werden zunächst von Datensätzen des LM übernommen. Die zur Aufbereitung der Datensätze für FOOT3DK-Simulationen notwendige Software wurde am IGM programmiert und getestet. Der Leistungsumfang der Software umfasst die Transformation auf Gauss-Krüger-Koordinaten, die Aggregation und Interpolation für variable Modellauflösungen sowie die Ab-

leitung modellrelevanter Parameter aus den Rohdaten. Auf dieser Basis können bereits Simulationsgebiete für Benin erstellt werden.

Ensemble-Studie zum Einfluß von Vegetations- und Bodenparametern auf den Modellniederschlag von FOOT3DK.

Die Sensitivität der Niederschlagsmodellierung für relevante Landoberflächen-Parameter in FOOT3DK wurde mittels Ensembleintegrationen einer eindimensionalen Version des Modells untersucht. Die Studie dient zum einen dem Aufschluß über mögliche Defizite und Unsicherheiten in der Parameterisierung der beteiligten Prozesse. Zum anderen sollen die von Parameter und Parameterkombinationen des Boden- und Vegetationsmodells in FOOT3DK, die sich in Simulation und Realität besonders kritisch auf das Niederschlagsaufkommen auswirken können, identifiziert werden. Dabei wird auf Standard-Parametersätze zum Betrieb von FOOT3DK zurückgegriffen, die den grundsätzlichen Operationsbereich des Modells abdecken und noch nicht genauer in Bezug auf die Untersuchungsgebiete spezifiziert sind.

Die Ensemblesimulationen wurden unter Variation der Anfangs- und Randwerte des Bodenmodells bei gleichen atmosphärischen Anfangsbedingungen durchgeführt. Im Gegensatz zu vergleichbaren Studien (z.B. de Ridder, 1998) werden Feuchte- und Niederschlagsprozesse durch die explizite Einbeziehung der Parameterisierungen von Wolkenmikrophysik und Feuchtkonvektion in die Modellkonfiguration simuliert. Dadurch besteht eine thermodynamisch voll interaktive Kopplung zwischen dem Bodenmodul und der atmosphärischen Niederschlagsmodellierung, während der dynamische Antrieb in der eindimensionalen Betriebsvariante vorgeschrieben werden muss. Die Konvektionsparameterisierung wird in hybrider Form (explizite Simulation des Niederschlagstransports) mit Feuchteflussschliessung eingesetzt. Die interaktive Kopplung mit dem Bodenmodul erforderte zusätzliche Anpassungen des Konvektionsschemas. In der Realität wird durch bodennahe Konvergenz trockenere Luft in Regionen konvektiver Niederschlagsaktivität nachgeführt. Dieser Prozeß wird im eindimensionalen Betrieb nicht erfaßt, wodurch unrealistische Feuchteakkumulationen in der Grenzschicht entstehen. Durch ein Relaxationsverfahren, bei dem bei Feuchtkonvektion die Feuchte unterhalb der Wolkengrenze entsprechend den parameterisierten Feuchteflüssen an der Wolkenbasis reduziert wird, wird diese Fehlerquelle gemindert.

FOOT3DK wird in allen Simulationen einheitlich mit einer vertikalen Auflösung von 25 Schichten bis zu einer Modellobergrenze von 18 km betrieben. Die Initialisierung der atmosphärischen Komponente erfolgt mit einem Radiosondenaufstieg von Niamey vom 25.08.1999, 00Z, der für die oberen Modellschichten erweitert wurde. Alle Integrationen erstrecken sich über insgesamt zehn Tage.

Die einfache Auslegung des auf ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere Model, Noilhan und Planton (1989)) basierenden Force-Restore-Bodenmoduls in FOOT3DK erlaubt eine relativ hohe Zahl an Simulationen. Das Ensemble wird durch Variation der Anfangs- und Randwerte für

das Boden- und Vegetationsschema wie folgt erzeugt: Das Verhältnis zwischen Anfangs- und Sättigungswassergehalt des Bodens wird in fünf Stufen zu 15%, 35%, 60%, 75% und 100% unterteilt. Hervorzuheben sind hierbei Stufen 1, 3, und 4. Bei 15% liegt der Wassergehalt für alle Böden unter dem Welkepunkt. Bei 60% befindet sich er sich für alle Böden oberhalb des Welkepunkts, aber unterhalb der Feldkapazität, die einheitlich bei 75% erreicht wird. Durch die Wahl der Initialisierungsstufen werden verschiedene Zustände des Bodens und der Pflanzenschicht, welche die bodennahe Verdunstung kontrollieren, abgedeckt.

In die Variation der Parameter des Bodenmodells gehen fünf verschiedene Bodenarten (Sand, Sandlehm, Lehm, Tonlehm und Ton) ein. Insbesondere werden dadurch die bodenspezifische Wasserkapazität und –konduktivität, aber auch die zugehörigen thermischen Bodeneigenschaften verändert. Die Landoberfläche wird durch 15 Kombinationen der Landnutzungsklassen Feld, Weide, Wald, Wüste und Stadt variiert. Die Wahl der Landoberflächen-Kombinationen richtet sich nach einer möglichst umfassenden Abdeckung von oberflächenspezifischen Parametern wie Rauigkeitslänge, Albedo, Versiegelungsgrad, Vegetationsbedeckung, Blattflächenindex und stomatalem Widerstand bei realistischen Landoberflächenstrukturen. Dies wird u.a. durch ein Desertifikationszenario und ein Urbanisierungsszenario einer ursprünglich vegetationsreichen Mischlandschaft mit graduell ansteigendem Wüsten- bzw. Stadtanteil erreicht.

Insgesamt ergibt die Kombination von 5 Initialisierungsklassen, 5 Bodenarten und 15 Oberflächenvariationen eine Ensemblezahl von 375 Simulationen. Daraus gibt sich eine ausreichende statistische Stichprobe.

Ergebnisse

Aufgrund der Eindimensionalität des Modells sind die Simulationen mit der realen Entwicklung in der Umgebung des Initialprofils nicht direkt vergleichbar. Zur Einschätzung der Simulationsqualität wird die Plausibilität der zeitlichen Entwicklung von Niederschlag, Temperatur sowie der bodennahen Energiebilanz aus stichprobenartig ausgewählten Läufen geprüft. Hierzu wird vor allem die als Kontrollexperiment definierte Simulation mit einem initialem Wassergehalt von 60%, Lehmboden und einer anteilmäßig gleichen Mischung der fünf verwendeten Oberflächentypen herangezogen.

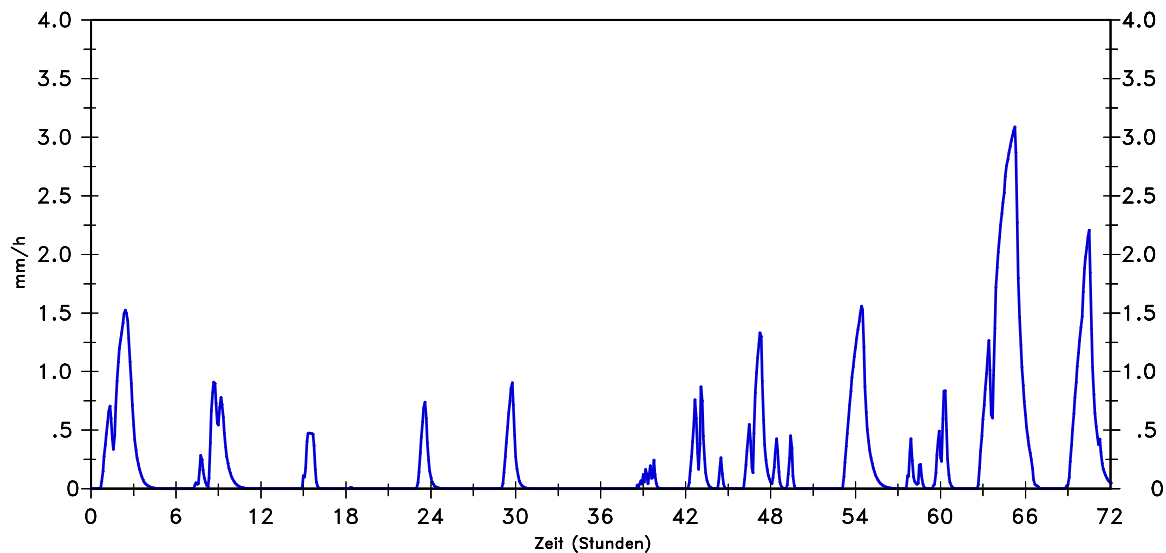


Abb. A1-5: Niederschlagsrate in mm/h für die ersten drei Tage des Kontrollexperiments.

In Bezug auf den Niederschlag liefert das Modell bis zum Ende des dritten Simulationstages plausible Ergebnisse (Abb. A1-5). Am 4. Tag bewirkt die Feuchteakkumulation in den untersten Modellschichten (s.o.) den Umschwung des Modells in einen unrealistischen, quasizyklischen Konvektionsverlauf mit einer dauerhaft gesättigten bodennahen Schicht und kontinuierlich ansteigenden Temperaturen. Hierin zeigt sich auch die konzeptionelle Grenze des Force-Restore-Bodenmodells. Die Strahlungsparameterisierung (Bilanz am Modellunterrand) ermöglicht in Verbindung mit der Feuchteanreicherung auch in den ersten 72 Stunden nur eine unzureichende nächtliche Abkühlung des Bodens. Die Tagesmaxima der Temperatur sind hingegen eher als plausibel einzustufen.

Die Simulationen mit Tonboden tendieren zu stark abweichenden Niederschlagserhöhungen auch bei vergleichsweise trockener Initialisierung. Diese sind auf eine Wechselwirkung zwischen der Parameterisierung der Wärmekapazität, des Feuchteflusses und der Schließung des Konvektionschemas zurückzuführen, deren Realitätsnähe fraglich ist. In die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der statistischen Auswertungen gehen daher die Simulationen mit Tonböden nicht ein. Alle Auswertungen beziehen sich auf den Modellzustand nach 72 Stunden.

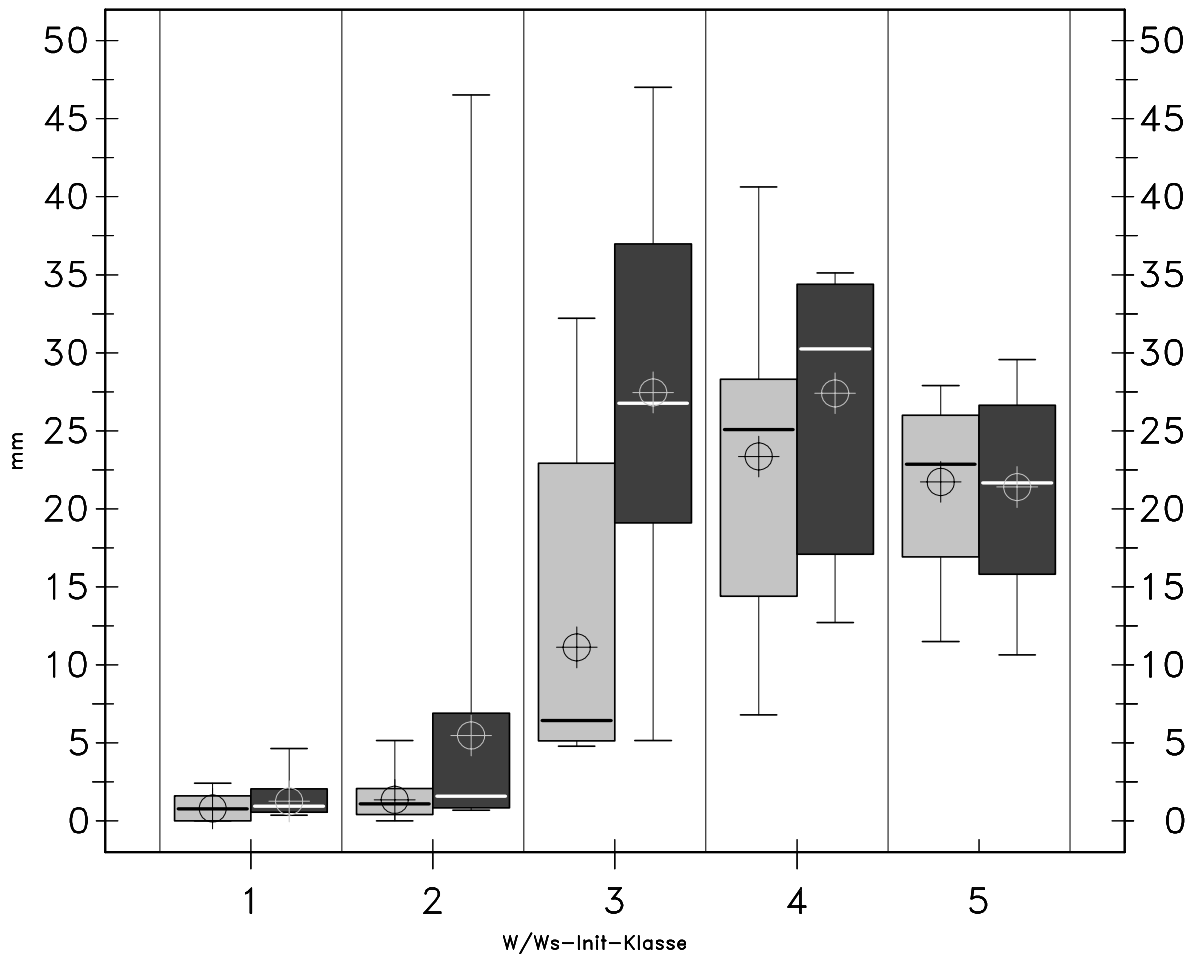


Abb. A1-6: Verteilung der Niederschlagsakkumulation bis zum dritten Tag für Oberflächen mit mittlerem bis hohem Wüstenanteil (hellgraue Boxen) im Vergleich mit vegetationsreichen Oberflächen (dunkelgraue Boxen) in Abhängigkeit von den Initialisierungsklassen bezüglich des Bodenwassergehalts (1: 15%; 2: 35%; 3: 60%; 4: 75%; 5: 100%). Die unteren und oberen Boxränder markieren den 15% bzw. 85% Perzentilwert, die darunter- und darüberliegenden Querstriche das Minimum und Maximum der Verteilung. Der Median wird durch einen Querbalken innerhalb der Box, das arithmetische Mittel durch das Kreis-Kreuzsymbol wiedergegeben.

Bereits die Betrachtung elementarer Verteilungsmaße für zwei Unterensembles (hoher und niedriger Vegetationsanteil, keine Stadtflächen) in Abb. A1-6 zeigt deutlich die starke Variation der in den ersten drei Tagen fallenden Niederschläge. Dabei fallen sowohl der mittlere Anstieg des Niederschlags mit steigendem Initialwassergehalt bis zur Feldkapazität als auch die abnehmende Variabilität bei hohen Anfangs-Wassergehalten auf. Merkliche Unterschiede zwischen vegetationsarmen und vegetationsreichen Oberflächen treten in den Klassen 2 und 3 auf. Am markantesten zeigt sich die Differenz bei einer Initialisierung oberhalb des Welkepunktes, aber unterhalb der Feldkapazität (Klasse 3). Bei sehr trockener Initialisierung unterhalb des Welkepunktes (Klasse 1) ist hingegen keine Pflanzentranspiration möglich, während bei anfänglich gesättigten

Böden (Klasse 5) unabhängig von der Oberfläche ein Überangebot an Verdunstung besteht. In den beiden extremen Klassen 1 und 5 spielt die Vegetation daher nur eine untergeordnete Rolle.

Die nach Initialisierungsklassen aufgeschlüsselte Korrelationsanalyse für das Abb A1-6. zugrundeliegende Unterensemble zeigt damit übereinstimmend die größte Sensitivität des Niederschlags für die Vegetationsparameter bei mittleren Wassergehalten (Abb. A1-7). Interne Korrelationen zwischen der Vegetationsbedeckung (VEG), dem Blattflächenindex (LAI) und dem minimalen stomatalen Widerstand (R_{\min}), die sowohl untereinander als auch mit der Albedo und der Rauigkeitslänge (z_0) bestehen, lassen aus Abb. A1-7 allerdings keine Abwägung der Bedeutung der Vegetationsbedeckung im Vergleich mit anderen Parametern zu. Untersuchungen mit größer gewählten Ensemblegruppen zeigen jedoch, daß die Vegetationsbedeckung in ihrer Bedeutung für den Niederschlag gegenüber den anderen Parametern dominiert (s.u.). Darüber hinaus zeigt sich ein nicht zu vernachlässigender Einfluß der bodenspezifischen Wasserspeicherkapazität ($WS/(1-VSG)$) bei sehr trockenem Initialzustand sowie im Bereich der Feldkapazität, der nicht durch interne Korrelationen mit anderen Einflußgrößen relativiert wird.

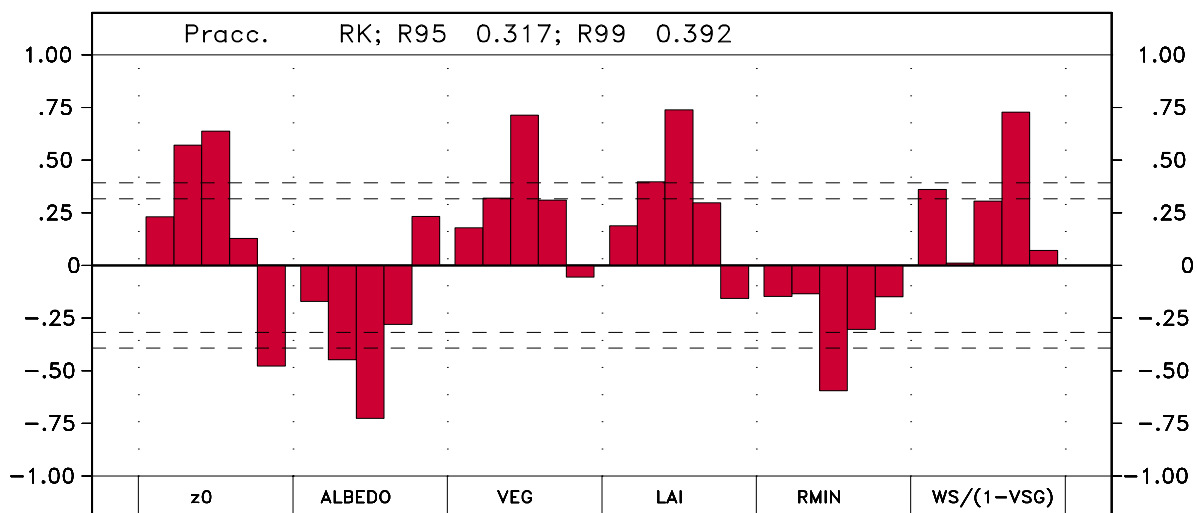


Abb. A1-7: Korrelationen des bis 72h akkumulierten Niederschlags mit verschiedenen Parametern der unteren Randbedingung, nach Initialisierungsklassen aufgeschlüsselt (jeweils 5 Balken für jeden Parameter mit steigendem Wassergehalt von links nach rechts). Parameternamen sind im Text erläutert. Die gestrichelten Linien bezeichnen das 95% und 99% -Signifikanzniveau.

Die Eigenschaften des gesamten Ensembles (ohne Simulationen mit Tonböden, s.o.) spiegeln sich in den Ergebnissen einer Singular Value Decomposition (SVD)-Analyse wieder. Durch das Verfahren werden verschiedene zeitabhängige Zielgrößen, die im Rahmen des Energie- und Wasserkreislaufs mit Niederschlag physikalisch eng verbunden sind, kombiniert. Die Kombination als ganzes wird auf ihren Zusammenhang mit dem entsprechenden Komplex der Anfangs- und Randbedingungen hin untersucht. Dabei zeigt der erste Singulärvektor in den Zielgrößen (Abb A1-8 oben) einen engen positiven Zusammenhang zwischen Niederschlag (Pr_{acc}), , akku-

mulierter Verdunstung (E_{acc}), relativem Bodenwassergehalt (W_2/W_s) und dem Maximum der konvektiven verfügbaren potentiellen Energie des dritten Simulationstages (CAPE) und einen negativen Zusammenhang dieser Größen mit dem akkumulierten Wärme fluß (H_{acc}) der Oberfläche. Die im ersten Singulärvektor repräsentierte Niederschlagsvariabilität wird fast ausschließlich vom initialen Wassergehalt bestimmt, wie die heterogenen Korrelationen seiner Entwicklungskoeffizienten mit den Einflußparametern (Abb. A1-8 unten) erkennen lassen.



Abb. A1-8: Erster Singulärvektor des Niederschlags und physikalisch zusammenhängender Zielgrößen (oben), homogene Korrelationen seiner Entwicklungskoeffizienten mit Zielgrößen (Mitte) und heterogene Korrelationen mit den Einflussgrößen der in die Analyse eingehenden Anfangs- und Randwerte (unten). 95% und 99%- Signifikanzniveaus sind gestrichelt eingezeichnet. Erläuterungen der Parameter im Text.

Der zweite Singulärvektor der Zielgrößen (Abb. A1-9 oben) erklärt immer noch einen beträchtlichen Anteil der Niederschlagsvariabilität (Abb. A1-9 Mitte). Dieser Anteil zeigt sich weitgehend linear unabhängig in Bezug auf die anderen Zielgrößen (Abb. A1-9 Mitte) und entkoppelt vom Anfangs-Wassergehalt (Abb. A1-9 unten). Statt dessen besteht eine deutliche Kopplung an die Randbedingungen (Abb. A1-9 unten). Die größte Sensitivität zeigt der im zweiten Singulärvektor

enthaltene Anteil der Niederschlagsvariabilität gegenüber dem Anteil versiegelter Stadtoberflächen (VSG; negativer Zusammenhang) sowie gegenüber der Vegetationsbedeckung (VEG; positiver Zusammenhang). Ein positiver Einfluß der bodenspezifischen Wasserspeicherkapazität ($WS/(1-VSG)$) ist ebenfalls erkennbar. Die Bedeutung der Rauigkeitslänge (z_0) ist untergeordnet und aufgrund ihrer Kopplung an die anderen Parametern nicht eindeutig (s.o.). Die übrigen Parameter lassen kaum einen Einfluß erkennen.

Insgesamt offenbart die SVD-Analyse eine deutliche Separation zwischen der Bedeutung des Anfangs-Wassergehalts und der Randbedingungen. Dabei übt der Anfangs-Wassergehalt einen deutlich stärkeren Einfluss aus als die Randbedingungen. Schlüsselt man das Ensemble nach dem initialen Wassergehalt auf, so zeigt sich, dass die Sensitivität des Niederschlags für die Vegetation vor allem bei Wassergehalten zwischen dem Welkepunkt und der Feldkapazität beträchtlich ist. Neben der Vegetation kommt den Bodenspeichereigenschaften insbesondere bei trockenen Situationen eine kritische Bedeutung für die Niederschlagsbildung zu.

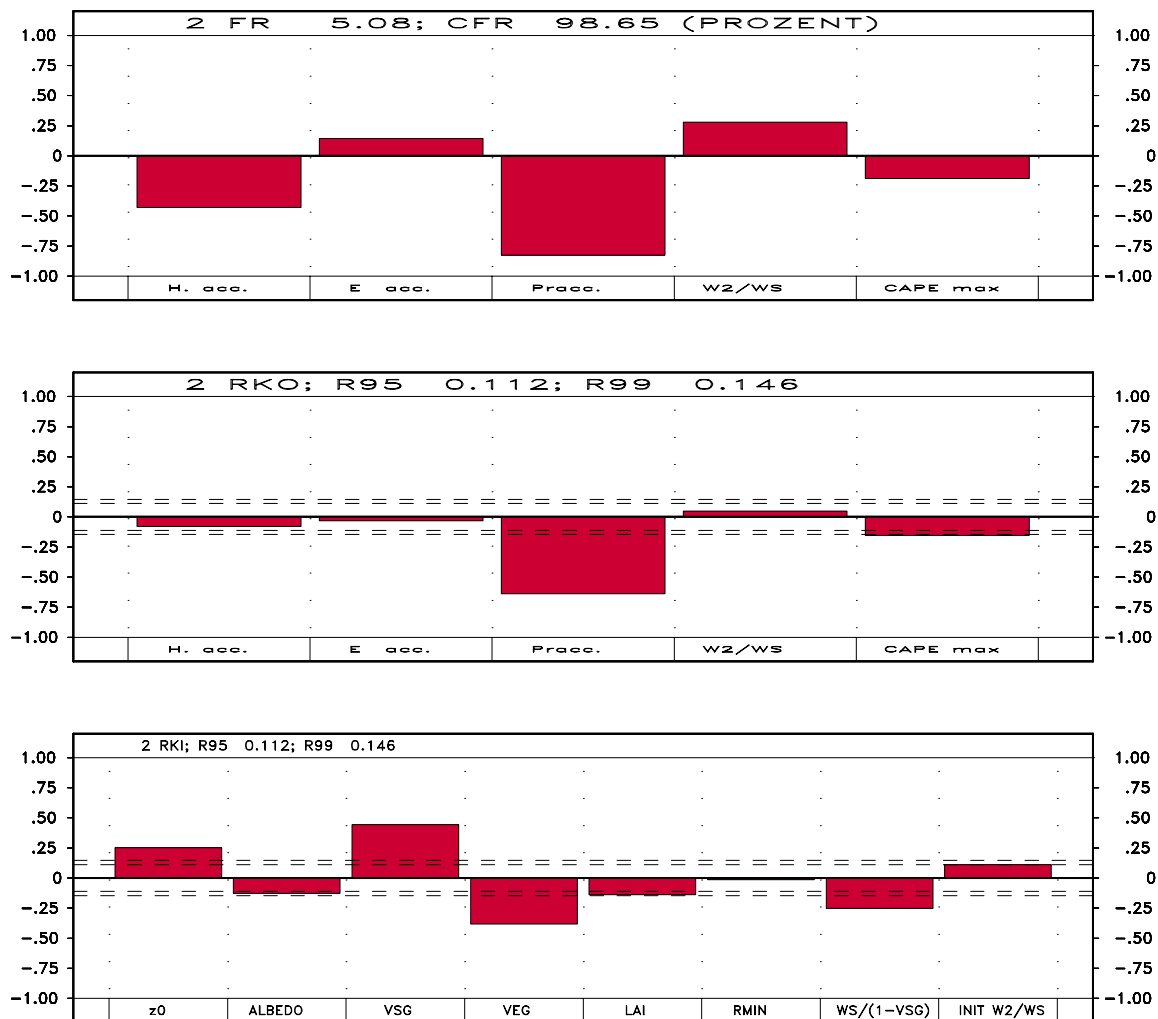


Abb. A1-9: Wie Abb. A1-8 für den zweiten Singulärvektor der Zielgrößen.

Trockene Situationen erweisen sich somit nicht nur für das zu erwartende Niederschlagsaufkommen, sondern auch für seine Modellierung als kritisch, da Fehler in der Modellwiedergabe der (meist nicht flächendeckend bekannten) Bodeneigenschaften sich besonders stark auf die Simulation auswirken können.

Die Ergebnisse betonen somit die hohe Anforderung an die genaue Kenntnis der Bodeneigenschaften aus Beobachtungen sowie entsprechend angepasste Parameterisierungsmethoden, um den speziellen Projektzielen gerecht werden zu können

Gegenwärtige und anstehende Arbeitsschritte

Die aus der Ensemble-Studie gewonnenen Erkenntnisse werden zur Anpassung und Verbesserung der Parameterisierungen in FOOT3DK genutzt. Verbesserungen werden insbesondere vom Einsatz eines Zweistrom-Schemas zur Parameterisierung der langwelligen Strahlung erwartet. Mit den geänderten Parameterisierungen wird die Ensemblestudie wiederholt. Dadurch wird auch eine Überprüfung der Sensitivität der Ergebnisse in Bezug auf die jeweilige Parameterisierungsform möglich. Die Untersuchungen werden zukünftig auf die zweidimensionale Wiedergabe der Landoberfläche bei eindimensionalem atmosphärischen Antrieb und neue Oberflächenkombinationen erweitert.

Als technische Hauptaufgabe wird derzeit die Ankopplung von FOOT3DK an das LM realisiert. Hierzu werden zunächst Ergebnisfelder von LM-Simulationen benötigt, die von MIUB projiziert werden. Während für Benin noch keine LM-Simulationen verfügbar sind, wurde der Koppeler LM — FOOT3DK anhand von LM-Läufen in Marokko bereits in einer experimentalen Version realisiert und befindet sich gegenwärtig in der Testphase (näheres hierzu vgl. Berichtsteil B1).

Vernetzung

Im ersten Projektjahr bestand die Vernetzung in Richtung der Teilprojekte A2-4 insbesondere in der Bereitstellung qualitätsgeprüfter und dokumentierter meteorologischer Datensätze und in der Einrichtung internetbasierter Möglichkeiten zur Echtzeitbeobachtung von Wetter und Witterung in Bénin. Auf der anderen Seite wurden in mehreren Treffen mit den Kollegen von A3 die für die mesoskalige meteorologische Modellierung notwendigen Qualitätsansprüche an die in A3 zu erstellenden Vegetations- und Landnutzungsdaten als untere Modellrandbedingungen definiert. Hier zeigten sich vorhandene globalen Datensätze als zu undifferenziert im Hinblick auf die kleinräumige und jahreszeitliche Variabilität.

Auf der internen Internet-Seite des Teilprojektes A1 (<http://www.uni-kolen.de/globaler-wandel/impetus/>) werden eine Vielzahl von Karten u. Daten angeboten. Datengrundlage bilden die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) operationell alle 3 Stunden abgerufenen Boden- und Höhenwettermeldungen aus Nordafrika, die ebenfalls vom DWD und durch eine Vereinbarung

mit dem beninischen Wetterdienst (DMN) bezogenen Monatsmittelwerte sowie die Daten der französischen Partner vom IRD. Die beiden erstgenannten Daten werden in Wetterkarten, Grafiken und Tabellen zur Verfügung gestellt und erlauben eine zeitnahe Verfolgung des Witterungs- und insbesondere des Niederschlagsgeschehens in Benin. Wegen ihrer räumlichen Dichte oder ihrer Länge wurden die französischen Daten, darunter tägliche Niederschlagsmengen und Niederschlagsintensitäten auf Minutenbasis, besonders häufig nachgefragt. Sie wurden nach einer Datenprüfung nebst ihrer Dokumentation auf die o.g. Internetseite gestellt. Auf Anfrage wurden Monatssummen aus Regensammlerdaten auf einem 0.5 x 0.5° Gitter und für den Zeitraum 1901-1998 dem Teilprojekt A4 zur Verfügung gestellt (Quelle der Daten: Climate Research Unit). Schließlich findet sich auf der Internet-Seite eine Liste aller vom beninischen Wetterdienst erhobenen Messdaten sowie der Messvorschriften. Diese Daten können bei Bedarf über die Kooperation mit der DMN verfügbar gemacht werden.

Literatur

- Bolton, D., 1981: Generation and propagation of African squall lines. Ph.D. thesis, Imperial College, London, 265pp.
- de Ridder, K., 1998: The impact of vegetation cover on Sahelian drought persistence. *Bound. Lay Met.*, 88, 307-321
- Diedhiou, A., S. Janicot, A. Viltard, P. de Felice und H. Laurent, 1999: Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and tropical Atlantic: results from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalyses. *Clim. Dyn.*, 15, 795-822.
- Duvel, J.P., 1990: Convection over tropical Africa and the Atlantic Ocean during northern summer. Part II: Modulation by easterly waves. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1855-1868.
- Hagemann, S., Botzet, M., Dümenil, L. und Machenhauer, B., 1999: Derivation of global GCM boundary conditions from 1 km land use satellite data. MPI Report No. 289, Max-Planck Institute for Meteorology, Hamburg.
- Noilhan, J.; Planton, S., 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.
- Omotosho, J. 'Bayo, 1985: The separate contributions of squall lines, thunderstorms and the monsoon to the total rainfall in Nigeria. *J. Climatol.*, 5, 543-552.
- Paeth, H.; Hense, A.; Glowienka-Hense, R.; Voss, R. und U. Cubasch, 1999: The North Atlantic Oscillation as an indicator for greenhouse-gas induced regional climate change. *Clim. Dyn.*, 15, 953-960.
- Paeth, H.; Hense, A. und R. Hagenbrock, 2000: Comments on "Twentieth-century trends of Arctic precipitation from observational data and a climate model simulation". *J. Climate* (submitted).
- Payne, S.W., und M.M. McGarry, 1977: The relationship of satellite inferred convective activity to easterly waves over West Africa and the adjacent ocean during phase III of GATE. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 413-420.
- Reed, R.J., und D.C. Norquist, E.E. Recker, 1977: The structure and properties of African wave disturbances as observed during phase III of GATE. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 317-333.
- Rodwell, M.J.; Rowell, D.P. und C.K. Folland, 1999: Oceanic forcing of the winter-time North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, 398, 320-323.
- Rowell, D.P., und J.R. Milford, 1993: On the Generation of African Squall Lines, *J. Climate*, 6, 1181-93.
- Shinoda, M., T. Okatani, und M. Saloum, 1999: Diurnal Variations of Rainfall over Niger in the West African Sahel: A comparison between wet and drought years. *Int. J. Climatol.*, 19, 81-94.
- Webb, R.S., C.E. Rosenzweig, E. R. Levine, 1991: A global data set of soil particle size properties. NASA Technical Memorandum 4286.
- Wessel, P., und W. H. F. Smith, 1991: Free software helps map and display data, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, vol. 72 (41), pp. 441, 445-446.
- Wessel, P., und W. H. F. Smith, 1998: New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, vol. 79 (47), pp. 579.

