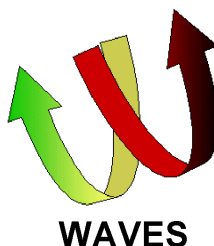


**WASSERVERFÜGBARKEIT SOWIE ÖKOLOGISCHE, KLIMATISCHE UND
SOZIOÖKONOMISCHE WECHSELWIRKUNGEN IM SEMIARIDEN
NORDOSTEN BRASILIENS**



**Verbundprojekt WAVES
Statusbericht der ersten Hauptphase
Fachbereich Klimaanalyse**

Zuwendungsempfänger: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Projektleiter: Dr. habil. F.-W. Gerstengarbe

Förderkennzeichen: 01 LK 9712

Vorhabenbezeichnung: Analyse und Modellierung der raum-zeitlichen klimatischen Bedingungen im Nordosten Brasiliens

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.1997 - 31.07.2000

Berichtszeitraum: 01.08.1997 - 31.12.1999

Bearbeitung: Dr. F.-W. Gerstengarbe, Dr. P.C. Werner, Dr. H. Österle,
Dipl.-Phys. U. Böhm, Dipl.-Chem. M. Kücken,
Dipl.-Ing. D. Hauffe, Dr. U. Römer, U. Werner

Potsdam, den 31.1.2000
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
14412 Potsdam

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	1
Summary	2
1 Stand des Vorhabens.....	3
1.1 Gesamtziel des Vorhabens und Realisierung.....	3
1.2 Die wichtigsten Ergebnisse	4
1.2.1 Literaturrecherche.....	4
1.2.2 Datensammlung.....	4
1.2.3 Datenaufbereitung und -ergänzung.....	5
1.3 Klimaanalyse und Szenarien	6
1.3.1 Abschätzung der Entwicklung der großräumigen Zirkulationsmuster und deren Einfluss auf das Niederschlagsverhalten	6
1.3.2 Entwicklung eines Szenarienmodells und Berechnung von Zukunftsszenarien	6
1.3.3 Aufstellen einer beschreibenden Klimatologie sowohl für den Ist-Zustand als auch die zukünftige Entwicklung (Szenarien)	7
1.3.4 Untersuchung des Verhaltens von Regen- und Trockenzeiten unter Berücksichtigung der Extreme	7
1.4 Klimamodellierung	8
1.4.1 Einleitung	8
1.4.2 Parallelisierung eines regionalen Klimamodells.....	8
1.4.3 Erstellung einer Bedienoberfläche für die Arbeit mit einem Klimamodell	9
1.4.4 Anpassung des Modells an die spezifischen regionalen Bedingungen.....	9
1.4.5 Aufbau eines Validierungsalgorithmus	9
1.4.6 Durchführung erster Simulationsläufe für ausgewählte Situationen.....	10
1.4.7 Implementierung des regionalen Modells LM	11
2 Vergleich des Standes der Forschung mit der ursprünglichen Planung	12
2.1 Literaturrecherche.....	12
2.2 Datenaufbereitung	12
2.3 Klimaanalyse und Szenarien.....	13
2.4 Modellierung	14
3 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind	16
4 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten.....	16
5 Sonstiges	16
5.1 Zusammenarbeit mit den anderen Arbeitsgruppen.....	16
5.1.1 Zusammenarbeit mit brasilianischen Partnern	16
5.1.2 Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen	16
5.1.3 Relevanz für die praktische Anwendung	18
5.2 Übersicht über den Mitteleinsatz	18

6 Zusammenfassung und Ausblick	19
6.1 Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick.....	19
6.2 Weiterführende Aufgaben	19
7 Literaturverzeichnis	21
Anlage 1: Ergebnisse der Klimaanalyse	25
Anlage 2: Abbildungen.....	33

Zusammenfassung

Hauptziele in der 1. Hauptphase des Projektes waren der Aufbau einer Klimadatenbank für das Untersuchungsgebiet, die Erstellung einer aktuellen Klimatologie verbunden mit der Entwicklung eines Szenarienmodells zur Abschätzung der regionalen Klimaentwicklung innerhalb der nächsten 50 Jahre sowie die Anpassung eines regionalen dynamischen Klimamodells. Die Ziele wurden erfüllt.

Es steht ein Datenbanksystem (Oracle) zur Verfügung, in dem alle bisher gesammelten Daten erfaßt sind und damit in der 2. Hauptphase problemlos ergänzt werden können.

Die Szenarienrechnungen für den Zeitraum bis 2050 zeigen, dass im Untersuchungsgebiet deutliche Klimaänderungen im Vergleich zur aktuellen Klimatologie zu erwarten sind. Dies gilt insbesondere für das Niederschlagsverhalten. Für die weitere Arbeit ist vorgesehen, die aktuelle Klimatologie an das Jahr 2000 heranzuführen sowie diese und die Szenarienrechnungen bezüglich ihres Extremwertverhaltens genauer zu untersuchen.

Das regionale Klimamodell REMO des MPI für Meteorologie Hamburg wurde an das Untersuchungsgebiet angepaßt und mit speziell entwickelten Testalgorithmen validiert. Zusätzlich wurde das lokale Modell LM des Deutschen Wetterdienstes in die Untersuchungen einbezogen. Für die nächsten Arbeitsschritte ist die Auswahl der optimalen Modellvariante vorgesehen, mit der dann Zeitscheibenexperimente zur genaueren Beschreibung extremer Ereignisse durchgeführt werden sollen.

Alle Arbeiten wurden in engem Kontakt mit den anderen Projektteilnehmern sowie den brasilianischen Partnern durchgeführt und sollen auch zukünftig in bewährter Form weitergeführt und vertieft werden.

Summary

The main goals for the 1st main phase of the project were the construction of a data bank system for the investigation area, the preparing of an actual climatology in connection with the development of a regional climate scenario model for the estimation of the climate behaviour within the next 50 years and the adaptation of regional dynamic model. These aims were fulfilled.

A data bank system (Oracle) is available which includes all data collected up to now. The data bank system can be completed by additional data without any problems in the 2nd main phase.

The scenario calculations for the period up to 2050 show that within the investigation area significant climate changes can be expected in comparison to the present climate. This is valid in particular for the precipitation. It is planned to bring up the actual climate to the year 2000 and to investigate this period and the scenario calculations in respect of its extreme value behaviour.

The regional climate model REMO of the MPI for Meteorology Hamburg was adapted to investigation area and validated by a specially developed test algorithms. Additionally, the local model LM of the German Weather Service was included into the investigations. As a next working step the selection of the optimal model variant is scheduled. With this variant time slice experiments can be carried out for the more exact description of extreme events.

All activities were carried out in close contact with the other sub-projects and the Brazilian partners. In future all co-operations will be carried on and extended in the successful way.

1 Stand des Vorhabens

1.1 Gesamtziel des Vorhabens und Realisierung

Die klimatologischen Untersuchungen in diesem Projekt orientierten sich an den Anforderungen der anderen Projektteilnehmer. Entsprechend deren Vorgaben wurde geklärt, welche Datenbasis erforderlich war und auf welche zurückgegriffen werden konnte. Danach folgten Maßnahmen zur Datenbereitstellung.

Die vorliegenden Daten wurden mit statistischen Methoden hinsichtlich ihrer Qualität und Verwendbarkeit geprüft und gegebenenfalls ergänzt.

Nach der Qualitätsprüfung wurden die Daten einer komplexen Klimaanalyse unterzogen. Unter Hinzuziehung von GCM-Daten für den Fall des CO₂-Anstieges wurde die Möglichkeit einer empirischen Abschätzung klimatischer Veränderungen im Untersuchungsgebiet eröffnet.

Um noch differenziertere Aussagen zum Klimageschehen zu bekommen war es notwendig, mit der Entwicklung eines regionalen Klimamodells zu beginnen. Dazu wurden zwei vorhandene Modellvarianten den regionalen Gegebenheiten angepasst. Die Arbeiten sind aufgrund des erheblichen Aufwandes, der hierzu notwendig ist, noch nicht abgeschlossen.

Um trotzdem eine vergleichende qualitative Abschätzung der Klimaänderungen möglich zu machen und um eine Alternative zu den Modellszenarien zu entwickeln, wurde parallel dazu eine statistische Methodik zur Erstellung von Szenarien entwickelt, die auf der Verwendung von Beobachtungsdaten sowie generalisierten Aussagen der GCM zur Klimaentwicklung beruhen.

Sowohl für die Klimamodellierung als auch die statistische Szenarienbildung bestand die Aufgabe, ihr jeweiliges Modell in einer angepassten Form bzw. deren Ergebnisse der integrierten Modellierung zur Verfügung zu stellen.

Deshalb wurde das Vorhaben abgeschlossen mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Klimamodul, das im Rahmen der integrierten Modellierung eingesetzt werden kann.

Insgesamt waren folgende Schwerpunktaufgaben zu lösen:

1. Literaturrecherche
2. Datensammlung, -aufbereitung und -ergänzung
3. Aufstellen einer beschreibenden Klimatologie sowohl für den Ist-Zustand als auch die zukünftige Entwicklung (Szenarien)
4. Abschätzung der Entwicklung der großräumigen Zirkulationsmuster und deren Einfluß auf das Niederschlagsverhalten
5. Entwicklung eines Szenarienmodells und Berechnung von Zukunftsszenarien
6. Anpassung eines regionalen Klimamodells an das Untersuchungsgebiet und erste Simulationsläufe
7. Erarbeitung von Validierungsalgorithmen zur Modellprüfung
8. Untersuchung des Verhaltens von Regen- und Trockenzeiten unter Berücksichtigung extremer Ereignisse.

Eine detaillierte Aufstellung des Arbeitsplanes für die zu lösenden Aufgaben ist dem Forschungsantrag zu entnehmen. Im folgenden werden in einer Übersicht die wichtigsten Ergebnisse dargestellt.

1.2 Die wichtigsten Ergebnisse

1.2.1 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche wurde kontinuierlich über den gesamten Projektzeitraum durchgeführt, so dass am Ende der 1. Hauptphase des Projektes eine gute Übersicht zu den das Klima betreffenden Fragestellungen vorliegt.

1.2.2 Datensammlung

Einleitend muss man sagen, dass die Datenverfügbarkeit in dieser Region als schlecht einzuschätzen ist. Trotz der Empfehlungen der WMO gibt es keine computergeführten Datenbanken mit meteorologischen Beobachtungsdaten sowohl auf nationalem als auch regionalem Niveau. Die Qualität der Beobachtungen und die Regelmäßigkeit der Datenübertragung durch das "Global Telekommunikation System" entspricht ebenfalls nicht den geforderten Standards. Außerdem werden die Daten durch verschiedene Institutionen erfasst und verwaltet, was den Zugriff weiter erschwert. Aus diesen Gründen wurden die meteorologischen Daten aus allen erreichbaren Quellen erworben, geprüft und gegebenenfalls aufbereitet. Dabei handelt es sich um Daten aus

- dem Weltdatenzentrum Washington (A)
- dem Weltdatenzentrum Obninsk (B)
- dem nationalen meteorologischen und hydrologischen Dienst Brasiliens
- den vom PIK installierten automatischen meteorologischen Referenzstationen

Zusätzlich wurden Daten über private Kontakte erworben.

Am Ende des Projektzeitraumes stehen folgende Datensätze zur Verfügung:

- Daten der automatischen meteorologischen Stationen des PIK

Die automatischen meteorologischen Stationen befinden sich in:

Taua	6° 00' 22" S;	40° 25' 53" W;	400 m
Picos	7° 01' 00" S;	41° 37' 05" W;	220 m
Projeto Piloto	8° 26' 53" S;	43° 52' 03" W;	250 m

Die Daten werden überprüft und als *stündliche und tägliche Werte* archiviert. Sie stehen allen Projektteilnehmern nach Bedarf zur Verfügung.

- Referenzdatensatz für das Untersuchungsgebiet

Zur Verfügung gestellt wurden 89 Stationen für den Zeitraum 1921 - 1980 mit täglichen Werten für die meteorologischen Größen Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung.

Die Daten wurden zum Teil mit Hilfe statistischer Verfahren ergänzt und dienen als Referenzdatensatz für alle Untersuchungen sowie zur Erstellung des Basis- und Zukunftsszenariums auf einem 0.5° x 0.5°-Gitter.

Für Zusatzuntersuchungen wurde ein Datensatz mit täglichen Niederschlagswerten für den Zeitraum 1962 - 1971 und insgesamt 170 Stationen bereitgestellt.

Außerdem wurde im Rahmen des Aufbaus eines PIK-Datenbanksystems die Daten der synop-

tisch meldenden Stationen für Südamerika gesammelt. Diese Daten wurden für die Klimamodellsimulationen sowie Untersuchungen zur großräumigen Zirkulation benötigt. Insgesamt gibt es 99 Stationen in Brasilien und 284 in Südamerika für den Zeitraum 1979 - 1998. Die Datenbasis wird jährlich erweitert.

- Re-Analysen aus dem ECMWF-Archiv

Die Re-Analysen (*The ECMWF Re-Analysis (ERA) Project, 1996*) sind aus dem DKRZ in Hamburg mit einer speziellen Routine übernommen, bearbeitet und abgespeichert worden.

Gebiet: 2.25° - 11.25° S; 44.0° - 36.00° W;
Auflösung: 1° x 1°;
Zeitraum: 1979 - 1993.

Die Daten bilden die Grundlage für die Simulation und Validierung des regionalen Klimamodells.

- Meteorologische Daten auf Monatswertbasis

Vier Datensätze wurden zur Verfügung gestellt:

- NCDC-Datensatz
- Niederschlagsdaten aus dem Nordosten Brasiliens (SUDENE)
- Datensatz Monthly Climate Reports
- Datensatz der Climate Research Unit der University of East Anglia

Der Datensatz enthält monatliche Mittelwerte für ein Gitter mit einer Auflösung von 0.5° x 0.5° über den Kontinenten.

1.2.3 Datenaufbereitung und -ergänzung

Zur Erstellung des Basisszenariums wurde in einem ersten Schritt die optimale Anzahl an Stationen bezogen auf räumliche und zeitliche Präsenz ausgewählt. Optimal bedeutet dabei die größtmögliche Anzahl mit möglichst langem Beobachtungszeitraum und geringfügigen Ausfällen auszuwählen. Im Ergebnis dieser Recherchen konnten für den Zeitraum 1921 - 1980 89 Stationen auf Tageswertbasis für die meteorologische Größe Niederschlag bereitgestellt werden. Da nicht an allen Stationen die Temperatur als Messgröße zur Verfügung stand, wurde sie über ein spezielles Interpolationsprogramm für diese Stationen aus dem vorhandenen Datenmaterial ergänzt.

Aufgrund des geringen Datenumfangs bei der relative Luftfeuchte und Globalstrahlung wurden zusätzlich statistische Verfahren wie Regression, Analogverfahren und Mustererkennung zur Ergänzung herangezogen. Trotzdem muss abschließend festgestellt werden, dass die so ergänzten Größen nur bedingt den gestellten Genauigkeitsanforderungen genügen. Weitere meteorologische Größen konnten aufgrund fehlender Messungen nicht bereitgestellt werden.

Letztlich standen somit 6 meteorologische Größen (Lufttemperatur - Tagesmaximum, -mittel, -minimum, Tagessumme des Niederschlags, Tagesmittel der relativen Luftfeuchte, Tagessumme der Globalstrahlung) an 89 meteorologischen Stationen (Lage s. Abbildung 1) für den Zeitraum 1921 - 1980 als Basisszenarium zur Verfügung.

Zusätzlich wurden diese Größen auf einem Gitter von 0.5° x 0.5° Auflösung (Lage s. a. Abbildung 1) bereitgestellt.

1.3 Klimaanalyse und Szenarien

1.3.1 Abschätzung der Entwicklung der großräumigen Zirkulationsmuster und deren Einfluss auf das Niederschlagsverhalten

1.3.1.1 Einleitung

Die vorliegenden Untersuchungen befassen sich mit den Niederschlagsänderungen im Zeitraum 2001 bis 2050 bei Einsatz des Szenariums A (CO₂-Verdopplung) des ECHAM-T42-Modells. Die Untersuchungsregion reicht von 45° W und 2° S bis 33.75° W und 11.25° S. Das entspricht 20 Gitterpunkten.

1.3.1.2 Daten und Evaluierungsmethoden für die Niederschlagstrends

Die Untersuchung basiert auf der Analyse des Kontrolllaufs sowie dem Szenarium-A-Lauf des ECHAM-4 T42 (Roeckner et al., 1996). Verwendet werden die Monatssummen des Niederschlags für den Zeitraum 2001 bis 2050 an den genannten Gitterpunkten der Untersuchungsregion.

Die Modellstruktur des ECHAM-4, das umfasst sowohl den dynamischen als auch numerischen Teil, ist in großen Teilen identisch mit der des ECHAM-3 (Roeckner, 1992). Das Modell basiert auf den primitiven Bewegungsgleichungen. Die prognostische Variable wird durch sphärische Harmonische, mit der Begrenzung bei der Wellenzahl 42 (T42) repräsentiert. Diese werden in ein Gauß'sches Koordinatensystem mit einer Auflösung von ca. 2.8° x 2.8° transformiert.

Die vorliegende Untersuchung basiert auf dem 240-Jahre-Kontrolllauf (1860 - 2099) und dem 240-Jahre-Szenarium-A-Lauf, zum einen mit beobachteten Änderungen der Treibhausgasemissionen von 1860 bis 1990 und zum anderen mit einem Anstieg der Konzentration von 1990 bis 2100 entsprechend dem Emissionsszenarium IS92a. Aus diesen Szenarienläufen wurde jeweils der Zeitraum 2001 - 2050 verwendet.

Statistisch ausgewertet wurden die Trends der Zeitreihen der Gitterpunkte im Untersuchungsgebiet. Verwendet wurden zur Bewertung der Trends ein Regressionsmodell (Kleinstquadratschätzung) einschließlich des t-Tests sowie der nicht-parametrische Mann-Kendall-Test (Kendall, 1970; Mann, 1945; Österle, Glauer, Denhard 1999). Weil die linearen Trends in jedem Fall einen Teil der beobachteten Klimavariablen darstellen, wird zusätzlich das Trend-Rausch-Verhältnis (T/R = Trend dividiert durch Standardabweichung) angegeben. Bei der Analyse sollte die Frage beantwortet werden, ob es signifikante Änderungen im Niederschlagsverhalten zwischen Kontrolllauf und Szenarium A-Lauf gibt und wie groß die Differenzen an jedem Gitterpunkt in der Untersuchungsregion für jeden Monat innerhalb des Untersuchungszeitraums sind? Die Ergebnisse sind einschließlich einer Interpretation in Anlage 1 dargestellt.

1.3.2 Entwicklung eines Szenarienmodells und Berechnung von Zukunftsszenarien

Um zu einer Abschätzung über die wahrscheinlichste zu erwartende Klimaentwicklung in einer Region zu kommen, werden in der Regel Szenarien aufgestellt. Szenarien repräsentieren immer "wenn -> dann"-Abläufe. Das heißt, dass unter vorgegebenen Bedingungen bestimmte Entwicklungen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind. In der Klimaforschung verfolgt man solche Szenarienuntersuchungen unter Verwendung verschiedener Ansätze, wie zum Beispiel den Klimamodellansatz oder auch den Weg über statistische Zusammenhänge. Der Klimamodellansatz wird in Kapitel 1.4 näher erläutert. Zur Versorgung der am Projekt beteiligten Forschungsbereiche mit Szenarienergebnissen zur Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung wurde ein Szenarienmodell auf statistischer Basis entwickelt.

Die Idee dieses Szenarienmodells besteht in der Kopplung von Informationen der großräumigen Klimaentwicklung berechnet auf der Basis von GCM-Simulationen mit langjährigen Beobachtungsdaten der Untersuchungsregion. Dazu wurde ein statistisches Modell entwickelt, das in der Lage ist, die zeitliche, räumliche und physikalische Konsistenz der eingesetzten meteorologischen Parameter zu gewährleisten (*Werner, Gerstengarbe, 1997*). Das Kernstück dieses Modells bildet in Abhängigkeit von der meteorologischen Leitgröße entweder ein erweiterter Cluster-Analyse-Algorithmus (*Gerstengarbe, Werner, 1997*) oder ein speziell angepasstes Analogverfahren. Für das Forschungsprojekt wurde ein Zukunftsszenarium erstellt. Dazu ging man davon aus, dass sich bis 2050 der derzeit zu beobachtende CO₂-Anstieg kontinuierlich fortsetzt. Auf der Grundlage der Modellsimulationen des MPI Hamburg wurde das zukünftige Niederschlagsverhalten in der Untersuchungsregion abgeschätzt. Die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse sind in Anlage 1 dokumentiert. Der Niederschlag als Leitgröße wurde gewählt, weil er für diese Region die wesentlichste meteorologische Größe darstellt, was gleichzeitig auch für die hydrologischen Fragestellungen innerhalb des Projektes gilt. Unter Verwendung des genannten Analogverfahrens sowie der aufbereiteten Daten wurde das Klimaszenarium für den Zeitraum 2001 bis 2050 berechnet auch für das 0.5° x 0.5°-Gitter zur Verfügung gestellt.

1.3.3 Aufstellen einer beschreibenden Klimatologie sowohl für den Ist-Zustand als auch die zukünftige Entwicklung (Szenarien)

Für das Aufstellen einer beschreibenden Klimatologie wurde ein Geographisches Informationssystem (GIS) verwendet. Damit konnten für die Basisklimatologie Karten der räumlichen Struktur der mittleren Verhältnisse für alle vorhandenen klimatologischen Größen erstellt werden (s. Anlage 1). In gleicher Weise verfahren wurde mit den im Zukunftsszenarium erstellten klimatologischen Größen, außerdem wurde zur Sichtbarmachung der Unterschiede zwischen Basis- und Zukunftsszenarium Differenzkarten erstellt (s. Anlage 1). Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit sich die Klimatypen (auf der Basis der Köppen'schen Klimadefinition) in der Region räumlich zwischen Basisszenarium und Zukunftsszenarium verschoben haben. Dazu wurden die Monatsmittel der Lufttemperatur sowie die Monatssummen des Niederschlags eingesetzt. In Anlage 1 sind die Klimatypen des Basisszenariums, die des Zukunftsszenariums und die Änderungen dargestellt. Eine Übersicht über das gesamte Änderungsverhalten wurde tabellarisch zusammengefasst.

1.3.4 Untersuchung des Verhaltens von Regen- und Trockenzeiten unter Berücksichtigung der Extreme

Eine genaue Kenntnis der zeitlichen und räumlichen Variationen von Beginn, Ende und Länge der Regen- bzw. Trockenzeit ist von großer Bedeutung für die Abschätzung der zu erwartenden Folgen von Klimaänderungen. Um hier zu konkreten Aussagen zu kommen, wurde die sequentielle Version des Mann-Kendall-Tests so erweitert, dass Anfang und Ende dieser quasi-periodischen Erscheinungen statistisch gesichert berechnet werden können (*Gerstengarbe, Werner, 1999*). Damit war es erstmals möglich, die raum-zeitliche Entwicklung dieser Ereignisse darzustellen (s. Anlage 1). Außerdem wurde eine erste Analyse der Extreme vorgenommen, bei der neben den statistischen Standardgrößen auch die Größe des natürlichen Extremwertbereichs (*Gerstengarbe, Werner, 1989*) in die Auswertung einbezogen wurde. Die Ergebnisse sind in Anlage 1 zusammengestellt.

1.4 Klimamodellierung

1.4.1 Einleitung

Zur Regionalisierung großskaliger Klimazustände mit dynamischen Modellen wurde im Rahmen des WAVES-Projektes die zuerst Ende der 80-er Jahre von *Dickinson et al. (1989)* und *Giorgi (1990)* eingesetzte "Nesting"-Technik verwendet. Um den numerischen Aufwand in vertretbaren Grenzen zu halten, wurde bislang von einer Rückkopplung der regionalen Prozesse auf die globale Skala abgesehen und die weit verbreitete "One way"-Nestung benutzt.

Da nur begrenzte Ressourcen an Personal und Rechnerkapazität zur Verfügung standen, wurde sich darauf konzentriert, wichtige Teilaspekte zu bearbeiten und einer Lösung zuzuführen.

1.4.2 Parallelisierung eines regionalen Klimamodells

Das REMO (REgionales Klima-MOdel) ist ein meso-• -Gitterpunktmodell und wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie und dem Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg entwickelt und dem PIK zur Nutzung und Weiterentwicklung zur Verfügung gestellt. Da am PIK ein Parallelrechner des Typs SP2 zur Verfügung stand, bot es sich an, das REMO zu parallelisieren. Für diese Parallelisierung waren folgende Probleme zu lösen:

- Organisation eines parallelen Eingabe/Ausgabe-Algorithmus
- Entwicklung einer effektiven parallelen Implementierung für den expliziten Eulerschen Zeitschritt, die semi-impliziten Korrekturen und für die physikalische Parametrisierung
- Vermeidung von Ungleichgewichten in der Prozessorlastverteilung (load balancing)

Zur Absicherung einer portablen, parallelen Programmversion wurden das Message Passing Interface (MPI) als Parallelisierungsplattform und FORTRAN 90 als Programmiersprache verwendet.

Der Parallelisierungsansatz basiert auf einer 2D Gebietszerlegung. Prinzipiell kann jede Subregion als Region mit eigenem Modelllauf betrachtet werden. Jeder Prozessor organisiert seine eigenen Datenstrukturen und initialisiert seine Programmstrukturen mit den für die Modellregion spezifischen Modellgrößen.

Nur die E/A-Organisation erfolgte von diesem Prinzip abweichend. Auf Grund der besonderen Datenstruktur der verwendeten Modelleingabedateien (GRIB-Code) erfolgte die Bearbeitung dieser Dateien nicht datenparallel sondern codeparallel.

Entscheidend für die Effizienz eines parallelen Programms ist die Vermeidung von Ungleichgewichten in der Prozessorauslastung. Der langsamste Prozessor bestimmt immer die Abarbeitungsgeschwindigkeit des Modells.

Für die Parallelisierung wurde ein statischer Ansatz verwendet. Das Modellgebiet wird am Anfang auf die Prozessoren aufgeteilt und danach nicht mehr verändert. Dieser Ansatz ist zwar nicht geeignet, dynamische Ungleichgewichte zu behandeln, andererseits aber kann so ein erhöhter Programmieraufwand und ein erhöhter Verwaltungsaufwand durch das Programm vermieden werden.

Als Ergebnis der parallelen Implementierung der Regionalmodells REMO zeigte sich, dass mit den hier verwendeten Methoden und Parallelisierungstechniken eine leistungsfähige Programmversion auf dem Parallelrechner IBM RS6000/SP erstellt werden konnte (*Kücken, 1996*).

1.4.3 Erstellung einer Bedienoberfläche für die Arbeit mit einem Klimamodell

Für die Verwaltung eines Klimamodells und die Auswertung der erzeugten Modellergebnisse ist ein erheblicher Arbeitsumfang erforderlich. Um diese Arbeiten zu automatisieren oder wenigstens benutzerfreundlich zu gestalten, wurde eine graphische Bedienoberfläche auf der Basis des Window-Standards Motif und unter Einbeziehung Der Benutzer ist somit in seiner Arbeit weitgehend unabhängig von speziellen Kenntnissen einer Programmsyntax oder der konkreten Hardware-Basis und kann sich auf die inhaltlichen Komponenten der Modellarbeit konzentrieren.

1.4.4 Anpassung des Modells an die spezifischen regionalen Bedingungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefasst, die bei der Bearbeitung der Aufgabenschwerpunkte

- "Testung modifizierter Niederschlagsparametrisierungen"
- "Testung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Parametrisierungen" und
- "Testung unterschiedlicher Randwertversorgungen für das REMO"

des Projektantrages im Berichtszeitraum erzielt werden konnten.

Zur Abschätzung der einzelnen Fehlerbeiträge wurden Simulationsläufe für einen bekannten Zeitraum in folgenden Schritten generiert und gegenüber Realdaten validiert:

1. Antrieb des RCM mit Analysedaten
-> Ermittlung des Fehleranteils durch das Regionalmodell selbst,
2. Antrieb des RCM mit Daten eines globalen Modell der atmosphärischen Zirkulation (AGCM)
-> Ermittlung des Fehlerbeitrages der treibenden und getriebenen Komponente.

Im Resultat der Vorprojektphase waren insbesondere bei meteorologischen Elementen mit Bedeutung für die Niederschlagsbildung z. T. deutliche Abweichungen zwischen Modellergebnissen und beobachteten bzw. analysierten Daten nachgewiesen worden. Es wurden daher im Berichtszeitraum umfangreiche Sensitivitätsexperimente mit REMO ausgeführt, um diese Probleme besser fixieren zu können, die Ursachen hierfür einzugrenzen und Lösungsvarianten zu testen. Auf der Basis monatlicher und jährlicher Simulationen wurden zwei Experimente durchgeführt.

1. REMO mit der Parametrisierung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für kleinskalige Prozesse und Antrieb durch die AGCM's ECHAM3/ECHAM4 für Dezember des Modell-Jahres 14 bzw. 13 (entspricht 1982).
2. REMO mit DWD-Physik und Antrieb durch die AGCM's ECHAM3/ECHAM4 für Dezember des Modell-Jahres 14/13 bis Dezember des Modell-Jahres 15/14 (entspricht

Damit wurde die ursprüngliche Aufgabenstellung erheblich erweitert. Durch diese Untersuchungen konnte das Verhalten des Regionalmodells bis zum Ende der Hauptprojektphase letztlich soweit verbessert werden, dass z. B. auf einer monatlichen bis saisonalen Zeitebene realistische Resultate erzielt (siehe Abbildung 2) und Teilerfolge im Langzeitverhalten verzeichnet werden konnten (Abbildung 3).

1.4.5 Aufbau eines Validierungsalgorithmus

Es wurde ein 3-stufiges Verfahren entwickelt, das einen Bogen von der Bewertung eines Modells unter rein physikalischen Aspekten bis hin zur Beurteilung der Wiedergabe extremer Situationen in der interessierenden Untersuchungsregion aus der Sicht der Klimawirkungsforschung

spannt:

1. Validierung einzelner meteorologischer Elemente im herkömmlichen Sinn, um die generelle Einsetzbarkeit beurteilen zu können; jedoch mit objektiven statistischen Methoden, die ohne Beschränkung der Allgemeinheit einsetzbar sind und Aussagen über Verteilungsunterschiede, Korrelationen und die Signifikanz der erzielten Resultate erlauben.
2. Überprüfung der Sensitivität einfacher Modelle der Klimawirkungsforschung auf Kombinationen von verschiedenen Klimavariablen aus Simulationsläufen zum heutigen Klima am Beispiel des Biome-Modells nach *Prentice et al. (1992)* für potentielle natürliche Vegetationstypen.
3. Regionale Validierung unter dem Aspekt der Wiedergabe von extremen Ereignissen als Kombinationen mehrerer meteorologischer Elemente und deren Extreme unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Sowohl unter Nutzung bereits existierender Verfahren, als auch durch die Entwicklung neuer Methoden wurde ein Algorithmus erarbeitet, der gemäß Abbildung 4 im Kern eine multivariate Methode zur Strukturerkennung enthält (*Böhm 1999a, Böhm 1999b*). Mit diesem Verfahren ist es möglich, neben einer umfassenden Beurteilung von Einzelaspekten die Leistungsfähigkeit des betrachteten Modells insgesamt anhand nur weniger summarischer Qualitätskennziffern zu bewerten.

Ein erster Prototyp dieses Validierungsverfahrens wurde zuerst zur Identifizierung von durch Trockenheit gefährdeten Regionen in Nordost-Brasilien eingesetzt, um die prinzipielle Anwendbarkeit der Methodik zu demonstrieren (Abbildung 5).

Dabei konnte gezeigt werden, dass in den meisten Fällen eine realistische Bewertung der ermittelten Differenzen möglich war und gleichzeitig eine hohe Sensitivität im Bezug auf den Einfluss einzelner Parameter vorliegt. Die eingeführten Qualitätsmaße ermöglichten die Erfassung räumlicher Strukturunterschiede unter verschiedenen Gesichtspunkten und ließen gut interpretierbare Relativ-Vergleiche zwischen den überprüften Modellergebnissen zu.

1.4.6 Durchführung erster Simulationsläufe für ausgewählte Situationen

Für die ersten Modellsimulationen wurde das Jahr 1983 ausgewählt, welches durch das Auftreten extremer Trockenheit in Nordost-Brasilien in Verbindung mit einem ausgeprägten El-Niño-Ereignis charakterisiert war. Obwohl ähnliche Situationen auch in jüngeren Jahren (1991/92, 1997/98) zu verzeichnen waren, wurde die erstgenannte Periode bevorzugt, da für diesen Zeitraum verhältnismäßig umfangreiches Datenmaterial zur Validierung vorliegt.

Es wurden 2 Produktionsläufe mit REMO 1.0 und DWD-Physik für die 13 Monate Dezember 1982 bis Dezember 1983 mit einer Rand- und Anfangswertversorgung durch ECMWF-Re-Analysen sowie Daten des Globalmodells ECHAM4 durchgeführt. Den Projektpartnern steht somit ein flächendeckendes Archiv meteorologischer Elemente für diese Periode mit einer räumlichen Auflösung von 0.5° im geographischen System (ca. 50 x 50 km) in 6-stündigen Intervallen für ganz Nordost-Brasilien zur Verfügung. Bei der Nutzung dieses Datenmaterials ist allerdings die bislang im Modell noch nachweisbare Tendenz zu berücksichtigen, bei Langzeitsimulationen den extremen Charakter der beobachteten Trockenheit überzubewerten.

Ein Vergleich der Resultate dieser beiden Simulationsläufe untereinander sowie mit Beobachtungen und Analysen dieses Zeitraumes erbrachte folgende Ergebnisse:

- Der Jahresgang des Niederschlages wird durch das Modell gut wiedergegeben (siehe Abbildung 6).
- Es konnte gemäß Abbildung 7 der Nachweis erbracht werden, dass auch bei Antriebs des

Regionalmodells mit einem GCM und Kopplung an einen realen Zeitraum lediglich durch beobachtete Meeresoberflächentemperaturen die Variabilität des Niederschlags realistisch wiedergegeben werden kann.

- Selbst bei einem verhältnismäßig großen Modellgebiet von ca. 9600 x 6000 km² war bedingt durch den dominanten Einfluss der großskaligen Zirkulation eine gute Kopplung zwischen treibenden und getriebenen Modell gegeben.

1.4.7 Implementierung des regionalen Modells LM

- Mit dem Modell REMO wurden Modellrechnungen für das Gebiet Nordost-Brasilien auf einem 50 km Gitter durchgeführt. REMO ist ein hydrostatisches Modell. Um zu prüfen, ob eine nicht-hydrostatische Modellvariante im Klimamode zu signifikanten Verbesserungen führt, wurde zusätzlich das Modell LM des Deutschen Wetterdienstes, das für die numerische Wettervorhersage entwickelt wurde, eingesetzt.

Dieses Modell arbeitet bereits voll parallel und besitzt mit seiner Programmstruktur und der Ausführung in der Programmiersprache FORTRAN 90 eine sehr moderne, zukunftssträchtige Konzeption. Die Einführung dieses Regionalmodells hat folgende inhaltliche Schwerpunkte:

- Erweiterung des Vorhersagezeitraumes auf klimarelevante Simulationszeiten
- Beurteilung von Modellszenarien hinsichtlich ihrer Erhaltungseigenschaften bezüglich bestimmter vorgegebener Ausgangsszenarien
- Beurteilung der Regionalisierungsgüte bei immer kleiner werdenden Gitterabständen
- Ausnutzung der nicht-hydrostatischen Eigenschaften vor allem für hohe Auflösungen des Modellgebietes.

Als Modelldaten für erste Testrechnungen im Untersuchungsgebiet wurden die Re-Analysen des ECMWF verwendet. Der vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellte Programmcode wurde für eine Erhöhung der zu modellierenden Zeitskala verändert. Zusätzlich wurden für Simulationen mit einem hohen Zeitbedarf Wiederanlauf Routinen entwickelt.

2 Vergleich des Standes der Forschung mit der ursprünglichen Planung

2.1 Literaturrecherche

Geplant:

Kontinuierliche Fortführung der in der Pilotprojektphase begonnenen Literaturrecherche

Erreicht:

Es wurden regelmäßig Recherchen in den aktuellen Fachzeitschriften durchgeführt. Außerdem wurden durch die Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes sowie des PIK themenbezogene Auftragsrecherchen durchgeführt. Wichtige Publikationen zur Projektproblematik wurden angeschafft und stehen in der Bibliothek des PIK zur Ausleihe zur Verfügung.

2.2 Datenaufbereitung

Geplant:

- Sammlung langjähriger Datenreihen auf Tageswertbasis
- Bereitstellung der Daten der vom PIK betriebenen Wetterstationen
- Datenbereitstellung zur Versorgung der regionalen Klimamodelle (GCM-Daten, Analysen, Orographie, Landnutzung, Wasser etc.)
- Prüfung der Daten auf Homogenität und Vollständigkeit
- Datenergänzung

Erreicht:

- Aufstellung eines Basisdatensatzes
- Die PIK-Stationsdaten wurden bearbeitet und an die anderen Fachbereiche weitergegeben.
- Für die regionalen Klimamodelle wurden ECMWF-Analysen als Anfangs- und Randwerte angekauft und bereitgestellt .
- Alle verfügbaren Daten wurden auf Homogenität und Vollständigkeit geprüft.
- Soweit notwendig, wurden Datenreihen mit Lücken mit Hilfe statistischer Verfahren ergänzt

Nicht erreicht:

- Vervollständigung der Beobachtungsreihen durch den Zeitraum 1981 - 1995 bzw. weitere meteorologische Parameter (Daten wurden nicht, wie vereinbart, durch den Kooperationspartner FUNCEME bereitgestellt.)

Zusätzlich:

- Bereitstellung des Datensatzes der University of East Anglia, Norwich

2.3 Klimaanalyse und Szenarien

Geplant:

- Statistische Beschreibung der mittleren Verhältnisse
- Ausgliederung von Gebieten mit einheitlicher Klimacharakteristik
- Statistische Beschreibung der extremen Verhältnisse
- Untersuchung zu speziellen zeitlichen und räumlichen Charakteristika ausgewählter Parameter (z. B. Anfang/Ende der Trockenzeit)
- Untersuchung der steuernden Zirkulationsmechanismen
- Statistische Analyse monatlicher Klimadaten
- Bewertung kleinregionaler Klimabedingungen

Erreicht:

- Erstellung von Klimakarten für einzelne Elemente
- Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass der Niederschlag die klima-relevante Größe darstellt. Damit kann die Karte der Niederschlagsverteilung zur räumlichen Charakterisierung des Klimas herangezogen werden.
- Die Ergebnisse zur Analyse extremer Ereignisse (bezogen auf den Niederschlag) sind in Anlage 1 zusammengefasst.
- Die Untersuchungsmethoden sind in den in den Anlagen dokumentierten Veröffentlichungen dargestellt.
- Auf der Basis von monatlichen Klimadaten wurden zeitliche Verschiebungen der Klimazonen im Nordosten Brasiliens untersucht. Die Untersuchungsmethode und die Ergebnisse sind in Anlage 1 dargestellt.
- Die Bewertung der kleinregionalen Klimabedingungen ist implizit in den Klimakarten (s. oben), die auf dem 0.5° x 0.5°-Gitter basieren, enthalten. Eine räumlich feinere Auflösung war aufgrund der vorhandenen Datenbasis (nur 89 Stationen) für den längeren Zeitraum 1921 - 1980 nicht möglich. Eine detailliertere Darstellung für den Niederschlag, der aber nur ein 10jähriger Zeitraum (1962 - 1971) zugrunde liegt, wurde bereits im Pilotprojekt erarbeitet.

Geplant:

- Konzept zur Erstellung von Klimaszenarien
- Entwicklung einer ersten anwendbaren Modellvariante und Probeläufe
- Bereitstellung der endgültigen Modellvariante
- Berechnung relevanter Klimaszenarien für die Untersuchungsregion auf der Basis der entwickelten statistischen Methodik.
- Bereitstellung eines hypothetischen Szenariums zur Darstellung des Klimas im integrierten Modell
- Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Hydrologie zur Darstellung der Klima-Hydrologie-Interaktion im integrierten Modell

Erreicht:

- Es wurde ein allgemeingültiges Konzept zur Erstellung von Klimaszenarien erarbeitet

- Es wurden Modellvarianten mit der Temperatur bzw. dem Niederschlag als Leitgröße getestet. Dabei erwies sich der Niederschlag als die wesentlichste klimarelevante Größe.
- Die endgültige Modellvariante wurde auf der Basis des Niederschlags sowie des Analogverfahrens aufgestellt.
- Neben dem Basisszenarium wurde ein Zukunftsszenarium erstellt, dem die "Business as usual"-Variante der CO₂-Zunahme für das globale ECHAM4-Modell zugrunde liegt.
- Das Zukunftsszenarium wurde dem Fachbereich Integrierte Modellierung entsprechend deren Anforderungen zur Verfügung gestellt.

Nicht weitergeführt:

- Auf die weitere Verwendung hypothetischer Szenarien (+ - 10 % Niederschlagsänderung) wurde nach Erstellung des realistischen Zukunftsszenariums verzichtet.

2.4 Modellierung

Geplant:

- Modellvalidierung im regionalen Skalenbereich
- Testung modifizierter Niederschlagsparametrisierungen
- Testung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Parametrisierungsansätze auf die Modellresultate in der regionalen Skala.
- Testung unterschiedlicher Randwertversorgungen für das REMO
- Durchführung verschiedener Modellläufe im Rahmen von Szenarienentwicklung und Kopplungsproblematik
- Jahressimulationen mit GCM-Antrieb zur Untersuchung der interannuellen Variabilität

Erreicht:

- Anwendung eines mehrstufigen Verfahrens zur Validierung von Modellresultaten im regionalen Skalenbereich und diagnostische Bewertung verschiedener Simulationsexperimente.
- Der Einfluss modifizierter Autokonversions- und Nukleationsraten auf die Bildung von skali-gem Niederschlag konnte bereits bis zum Ende der Vorprojektphase untersucht werden und ergab nur eine geringe Sensitivität der Modellresultate auf diese Kenngrößen.
- Beim Vergleich der Parametrisierungen kleinskaliger atmosphärischer Prozesse aus ECHAM4 und dem Europa-Modell des DWD erbrachte der Wetterdienst-Ansatz die besten Resultate für die Untersuchungsregion von WAVES.
- Die Verwendung von Resultaten des neuen GCM's ECHAM4 anstatt von ECHAM3 erbrachte erhebliche Verbesserungen im dynamischen Modellverhalten.
- Die Nestung des Regionalmodells in ein GCM, dass seinerseits nur über beobachtete Mee-resoberflächentemperaturen an einen realen Zeitraum gekoppelt ist, lieferte ähnliche Zirkula-tionsmuster wie die Re-Analysen des ECMWF für die betreffende Periode und eine ver-gleichbare Niederschlagsvariabilität in Nordost-Brasilien.
- Modellsimulationen auf längeren Zeitskalen wurden bis zu etwa einem Jahr durchgeführt.

Nicht erreicht:

- Aufgrund der notwendigen Erweiterung der Sensitivitäts- und Validierungsexperimente wurde auf die Simulation regionaler Klimaszenarien verzichtet.

- Aus den gleichen Gründen und insbesondere, da im Verlauf der Untersuchungen unterhalb einer Zeitskala von mehreren Jahren bereits Differenzen zwischen Modell und Beobachtungen bei der Beschreibung des aktuellen Klimas sichtbar wurden, erschien eine Ausweitung der Simulationsexperimente auf den Skalenbereich der interannuellen Variabilität noch nicht erfolgversprechend.

Zusätzlich:

- REMO-Parallelisierung
- Implementierung des nicht-hydrostatischen lokalen Modells LM des DWD
- Erstellung einer Bedienoberfläche für die Arbeit mit einem Regionalmodell
- Entwicklung eines regional orientierten Diagnoseverfahrens zur Untersuchung der Wiedergabe von Extremsituationen in den Resultaten verschiedener Klimamodelle
- Untersuchung der Sensitivität von REMO auf die Berücksichtigung der Rückwirkung von Niederschlagswasser auf die adiabatischen Modellteile
- Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Prognose-Zeitschritte und zeitlich versetzter Startzeitpunkte auf das Stabilitätsverhalten des Regionalmodells
- Untersuchungen zum Einfluss modifizierter Bodenparameter auf das Niederschlagsverhalten von REMO
- Entwicklung von Software für die Verwendung von ECMWF-Re-Analysen zur Rand- und Anfangswertversorgung von REMO und LM

3 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind

Für das Projekt von besonderer Bedeutung hinsichtlich der Klimamodellentwicklung waren zum einen die Entwicklungsarbeiten zum Regionalmodell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg sowie des lokalen Modells LM des Deutschen Wetterdienstes. Außerdem sind die Ergebnisse zur Modelladaptation und Validierung, die durch Kollegen des Instituts für Physik der Universität Potsdam erarbeitet wurden, in das Projekt eingegangen.

4 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten

Erfindungen wurden nicht gemacht und Schutzrechte nicht in Anspruch genommen.

5 Sonstiges

5.1 Zusammenarbeit mit den anderen Arbeitsgruppen

5.1.1 Zusammenarbeit mit brasilianischen Partnern

Die Zusammenarbeit mit den brasilianischen Partnern war im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung festgelegt. Diese Vereinbarung ist mit dem direkten Partner des PIK der FUNCEME abgeschlossen worden. Die darin geplanten Aktivitäten konnten nur zum Teil erfüllt werden.

Erfüllt:

- Gemeinsame Erstellung zweier Forschungsanträge mit der FUNCEME als verantwortlichem Koordinator
- Gemeinsames Auftreten bei den zwei in Fortaleza durchgeführten Workshops
- Zusammenarbeit mit Dr. M. Krol als ständigem Vertreter des PIK in Fortaleza

Nicht erfüllt:

- Bereitstellung klimatologischer Daten für den Zeitraum 1981 - 1998 durch die FUNCEME
- Gastaufenthalt von Herrn Jackson zur Erlangung der Promotion am PIK

5.1.2 Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen

Da es sich bei diesem Vorhaben um ein Verbundprojekt mit stark integrativem Charakter handelte, musste eine Reihe von Leistungen erbracht werden, die jeweils direkt von den anderen Partnern benötigt wurden. In diesem Zusammenhang waren folgende Aufgaben in Zusammenarbeit mit den anderen Fachbereichen zu erfüllen:

Fachbereich Hydrologie

Geplant:

- Bereitstellung eines Wasserbilanzmodells einschließlich der lateralen Abflusskomponenten für das Untersuchungsgebiet zur Ankopplung an das REMO
- Detaillierung der hydrologischen Prozesse zur Testung der Leistungsfähigkeit des REMO

bezüglich der Wiedergabe des bodennahen Wasserkreislaufes

Erfüllt:

- Vom Fachbereich Hydrologie wurde ein Wasserbilanzmodell zur Verfügung gestellt, das für die Ankopplung an das regionale Klimamodell vorgesehen ist. Da sich zur Zeit noch zwei Klimamodelle in der Testphase befinden, konnte noch nicht entschieden werden, an welches das hydrologische Modell angekoppelt werden soll. Die Ankopplung ist für die 2. Hauptphase vorgesehen.
- Die gleiche Aussage gilt für die Detaillierung der hydrologischen Prozesse. Hier ist eine Einbeziehung der vorliegenden Ergebnisse in die regionale Klimamodellierung erst für die 2. Hauptphase vorgesehen.

Fachbereich Agrarökosysteme

Geplant:

- Angaben zu Schwellenwerten, Andauern etc. pflanzenphysiologisch relevanter klimatologischer Parameter zur Umsetzung extremwertstatistischer Analyse- und Modelluntersuchungen sowie zur Szenarienbildung
- Bereitstellung von Bodenfeuchtedaten für das REMO in Abhängigkeit von den Bodentypen und der Landnutzung mit Flächenbezug (Bodentiefe bis 1 m, zeitliche Auflösung 12 h - 1 Monat, für ausgewählte Punkte und Municipien und den Zeitraum einer Vegetationsperiode bzw. eines Jahres)

Erfüllt:

- Für ausgewählte Pflanzentypen wurden physiologisch relevante Klimaparameter bereitgestellt, die im Rahmen der Klimamodellvalidierung eingesetzt werden konnten.

Beim derzeitigen Stand der Entwicklung des regionalen Klimamodells war die Bereitstellung von Bodenfeuchtedaten nicht notwendig. Sie werden erst in der 2. Hauptphase benötigt.

Fachbereich Landschaftsökologie

Geplant:

- Einbeziehung der meteorologischen Informationen (aus Beobachtungen, Analysen, Modellrechnungen und Szenarienbildungen) in das geographische Informationssystem (GIS) zur Darstellung dieser Informationen und zur Verschneidung dieser mit anderen Parametern
- Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Vegetationsindex, langweiliger Ausstrahlung und Niederschlag mit dem Ziel, flächendeckende Aussagen zum Niederschlagsverhalten im Fall fehlender Beobachtungsdaten zu machen

Erfüllt:

- Für den Fachbereich wurde eine zeitliche Typisierung des Klimageschehens durchgeführt und Daten für charakteristische Jahre dieser Typen zur Verfügung gestellt. Diese Typen finden Eingang als Datengrundlage in die Entwicklung des GIS-gestützten Modellsystems MOSDEL (s. a. Abschlußbericht Landschaftsökologie).

Nicht erfüllt:

- Die in der Vorprojektphase begonnenen Untersuchungen zur Beschreibung des Zusammenhangs Vegetationsindex - Niederschlag in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Ange-

wandte Fernerkundung (GAF) konnten aufgrund der Mittelkürzung nicht wie geplant über einen Werkvertrag weitergeführt werden.

Zusätzlich über Auftragsvergabe:

- Durch das meteorologische Institut der Universität Bonn wurde im Rahmen eines Werkvertrages eine Untersuchung der steuernden Zirkulationsmechanismen (Verlagerung der atlantischen Hochdruckgebiete sowie der ITCZ) durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war es abzuschätzen, inwieweit sich das großräumige Klimaregime über dem Untersuchungsgebiet unter sich ändernden klimatischen Randbedingungen im Zeitraum 2001 bis 2050 verhalten wird. Diese Untersuchungen wurden planmäßig abgeschlossen, so dass die Ergebnisse in die Szenarienberechnungen einbezogen werden konnten.

5.1.3 Relevanz für die praktische Anwendung

Die erstellten Klimaszenarien liefern die Datengrundlage zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen in allen beteiligten Fachgebieten. Damit ist es möglich, im Rahmen der integrierten Modellierung alle notwendigen Informationen zur Erstellung einer realistischen Planungsgrundlage bereitzustellen. Mit der Erarbeitung neuer statistischer Verfahren sowie des Einsatzes eines regionalen Klimamodells in den Tropen wurde zum Teil wissenschaftliches Neuland betreten. Die daraus gewonnen Erkenntnisse sind auch für andere Forschungsbereiche von Relevanz und werden bereits praktisch umgesetzt. Außerdem wurde das gesamte Forschungskonzept so umgesetzt, dass nun eine Nutzung der Verfahren und Modelle auch in anderen Regionen der Erde ohne umfassende Neuentwicklungen möglich ist.

5.2 Übersicht über den Mitteleinsatz

Eine Übersicht über den Mitteleinsatz kann erst am Ende des Projektes nach Rechnungslegung beim Projektträger erfolgen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick

Folgende wichtige Ergebnisse wurden erzielt:

- Aufbau einer klimatologischen Datenbank
- Entwicklung neuer statistischer Verfahren zur Mustererkennung und zur Beschreibung quasi-periodischer Vorgänge
- Entwicklung eines Klimaszenarienmodells auf statistischer Basis unter Einbeziehung von großräumigen Informationen zu Klimaänderungen und regionalen Beobachtungsdaten
- Bereitstellung eines Klimaszenariums 2001 - 2050 unter der Annahme "business as usual"
- Erstellung eines Validierungsschemas für dynamische regionale Klimamodelle
- Anpassung und Testung der regionalen Klimamodelle REMO und LM

6.2 Weiterführende Aufgaben

In der WAVES-Phase 1 wurde eine Datengrundlage geschaffen, auf der in der 2. Phase aufgebaut werden kann. Dazu gehören die Sammlung sowie Zusammenstellung des Materials, die Prüfung der Datenreihen auf ihre Qualität sowie deren Aufbereitung für die Analyse des Klimas im Nordosten Brasiliens als auch für die Randwertversorgung und Validierung eines regionalen Klimamodells. Geplant ist die Vervollständigung der Datengrundlage durch Aktualisierung des Untersuchungszeitraumes. Dadurch können aktuelle Klimaentwicklungen erfasst werden sowie die Szenarienrechnungen für die einzelnen Teilprojekte auf eine klimatologisch fundiertere Basis gestellt werden.

Im Rahmen der Klimaanalyse wird der Schwerpunkt auf die Untersuchung extremer Ereignisse (Dürreperioden, Starkniederschläge) gelegt. Insbesondere soll dabei der Zusammenhang mit El-Niño-Ereignissen betrachtet werden. Außerdem soll unter Einbeziehung der Zukunftsszenarien abgeschätzt werden, wie sich die extremen Ereignisse in ihrem zeitlichen Auftreten bis 2050 verändern werden.

Für die Modellierung stehen zwei regionale Klimamodelle zur Verfügung. Hierbei handelt es sich zum einen um das vom Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg entwickelte Modell REMO, das bereits in der 1. Projektphase an das Untersuchungsgebiet angepasst und aus rechen-technischen Gründen parallelisiert wurde. Zum anderen steht das lokale Modell (LM) des Deutschen Wetterdienstes in einer parallelisierten Variante zur Verfügung. Dieses Modell ist nicht-hydrostatisch und erlaubt eine räumliche Auflösung bis zu ca. 7 km x 7 km. Rechen-technisch ist diese Modellvariante bereits an das Untersuchungsgebiet angepasst. Die Anpassung der Parametrisierungen ist für die 2. Phase vorgesehen einschließlich der Durchführung von Zeitscheibenexperimenten. Ein Modellvergleich soll eine Aussage darüber liefern, welches der beiden Modelle letztlich die für dieses Gebiet exaktesten Ergebnisse liefert.

Damit können für die anderen Projektbereiche Aussagen zu folgenden Schwerpunkten gemacht werden:

- zur räumlichen und zeitlichen Struktur verschiedener meteorologischer und hydrologisch relevanter Parameter auf der Basis beobachteter und modellierter Werte (z. B. Niederschlag, Temperatur, Feuchte),

- zur Verbesserung der Beschreibung der zukünftigen Klimaentwicklung unter Verwendung des in der 1. Phase entwickelten Szenarienmodells,
- zur räumlichen und zeitlichen Entwicklung extremer Ereignisse,
- zur Berechnung von Zeitscheibenexperimenten mit den regionalen Klimamodellen

7 Literaturverzeichnis

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, A., O'Connell, P.E., Rassmussen, J., 1986: An introduction to SHE, 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, **87**, 61-77.
- Al-Khashab, W.H., 1958: The water budget of the Tigris and Euphrates basin. Univ. of Chicago, Dept. of Geography, Res. Pap. 54.
- Becker, A., Pfützner, B., 1987: EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling. *Acta Hydrophysica*, **31**(3/4), 125-141.
- Bergström, S., 1992: HBV-Model: It's structure and applications. SMHI-Report RH, 4, Norköping, Schweden.
- Böhm, U., Podzun, R., Jacob, D., 1997: Surface Water Balance Estimation for a Semi-Arid Region using a Regional Climate Model and Comparison of Water Balance Components with Global Circulation Model Output and Analysis Data.
- Böhm, U., 1999a: Eine Methode zur Validierung von Klimamodellen für die Klimawirkungsforschung hinsichtlich der Wiedergabe extremer Ereignisse. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften an der Freien Universität Berlin.
- Böhm, U., 1999b: A method to assess a regional climate model's performance in reproducing extreme conditions. Abstracts of the Conference on "Detection and Modeling of Regional Climate Change", 9-12 June 1999, Trieste, Italy.
- Bronstert, A., 1994: Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Mitt. des Inst. für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Nr. 46, Universität Karlsruhe, 192 Seiten.
- Christensen, J.H., v. Meijgaard, E., 1992: On the Construction of a Regional Atmospheric Climate Model. Danish Meteorological Institute, Technical Report 92-14.
- Christensen, J.H., Machenhauer, B., Jones, R.G., Schär, C., Ruti, P.M., Castro, M., Visconti, G., 1997: Validation of present-day regional climate simulations over Europe. LAM simulations with observed boundary conditions. *Climate Dynamics*, **13**, 489-506.
- Cohen, S.J., 1986: Impacts of CO₂-induced climatic change on water resources in the Great Lakes basin. *Climatic Change*, **8** (2), 135-154.
- Cress, A., Majewski, D., Podzun, R., Renner, V., 1992: Klimasimulationen mit einem regionalen Vorhersagemodell für Europa. *Ann. Met.*, **27**, 256-257.
- Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989: A regional climate model for the western United States. *Clim. Change*, **15**, 383-422.
- Enke, W., 1991: Ein zweistufiges Verfahren zur Untersetzung von large scale Klimamodell Outputs in regionale und lokale Wettererscheinungen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Arbeitsbericht.
- Gerstengarbe, F.-W., Löser, B., 1985: Untersuchungen zur Homogenität von Datenreihen. F/E-Bericht des Meteor. Dienstes der DDR.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1987: Einige Anmerkungen zur Extremwertproblematik. *Z. Meteorol.*, **(37)**, 5.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1988: A methode for the statistical definition of extreme value regions and their application to meteorological time series. *Z. Meteorol.*, **(38)**, 4.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1990: Statistical description of the behaviour of the extreme values of meteorological time series in climatic change in the historical and the instrumental periods. Ed. by R. Brázdil, Brno.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1991: The time structure of extreme summers in Central Europe between 1901 and 1980. *Meteorol. Zeitschrift*, N.F. **1**, 285-289.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1991: Some critical remarks on the use of extreme value statistics in climatology. *Theor. and Appl. Climatology* **(44)**.

- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. 1992: Does an internal time structure of extreme summers in Europe exists? *Meteorologische Zeitschrift*, N.F. **2**, 13-20.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1993: Extreme klimatologische Ereignisse an der Station Potsdam und an ausgewählten Stationen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 186, Offenbach a. M.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1993: Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 113, Offenbach a.M.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1993: The selection of extreme events. Conference Abstracts, Conference on extreme value theory and its applications. May 2-7, 1993, Gaithersburg, Md., USA.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1994: Klimatologische Untersuchungen des Sommers 1992 in Deutschland. In: PIK Report No. 2, Vol. 1, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1995: Two methods to describe the statistical quality of cluster analysis patterns. Proceedings, 6th Int. Meeting on Statistical Climatology, 19-23 June, 1995, Galway, Irland, 139-142.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1996: A new method for the application of progressive analysis. WAVES - Statusbericht, BMBF/PT-USF, Bonn.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 1997: A Method to Estimate the Statistical Confidence of Cluster Separation. *Theor. and Appl. Climatology*, Vol. 57, No. 1-2, 103-110.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., Fraedrich, K., 1999: Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: some problems and their solution. *Intern. J. of Climatology*, in press.
- Giorgi, F., 1990: On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Clim.*, **3**, 941-963.
- Gleick, P.H., 1986: Methods for Evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, **88**, 97-117.
- Hargraeves, G.H., 1973: Monthly precipitation probabilities for Northeast Brazil. Cususwash. 423 p.
- Hargraeves, G.H., 1974: Climatic zoning for agricultural production in Northeast Brazil. Utah State University. 6p.
- Hastenrath, S., Wu, M.C., Chu, P.S., 1984: Towards the monitoring and prediction of Northeast Brazil droughts. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **110**, 411-425.
- Hastenrath, S., 1991: Climate dynamics of the tropics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- IPCC, 1996: Climate Change 1995. The science of climate change. Working group I, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 1996: Climate Change 1995. IPCC Working Group I Summary for Policymakers. Cambridge University Press.
- Jacob, D., Claussen, M., Majewski, D., Podzun, R., Rockel, B., 1995: REMO - a model for climate research and weather forecast. Research activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, WMO/JCSU/IOC Report.
- Kendall, M.G., 1970: Rank Correlation Methods. Griffin, London.
- Kousky, V.E., 1980: Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 488-498.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.-I., Becker, A., 1996: Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds. PIK-Report, 18, 32 Seiten.
- Kücken, M., Schättler, U., 1996: REMO - Implementation of a parallel Version of a regional climate model. Seventh ECMWF Workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology, Reading, UK.
- Kücken, M., Schättler, U., 1997: Implementation of a parallel version of a regional climate model. PIK-Report No. 29, Potsdam, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

- Kücken, M., Hauffe, D., 1997: Implementierung und Parallelisierung der vom Max-Planck-Institut Hamburg und vom Deutschen Klimarechenzentrum Hamburg entwickelten CRAY-Version des regionalen Klimamodells REMO auf dem Parallelrechnersystem IBM RS/6000 SP des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. Arbeitsbericht, Potsdam, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
- Lasch, P., Lindner, M., Ebert, B., Flechsig, M., Gerstengarbe, F.-W., Suckow, F., Werner, P.C., 1999: Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal state of Brandenburg, Germany. *Environmental Modeling and Assessment*, in press.
- Machenhauer, B., Windelband, M., Botzet, M., Christensen, J.H., Déqué, M., Jones, R.G., Ruti, P.M., Visconti, G., 1998: Validation and Analysis of Regional Present-Day Climate and Climate Change Simulations over Europe. MPI-Report No. 275. Hamburg, October 1998.
- Majewski, D., 1991: The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models, 2, 147-191.
- Mann, H.B., 1945: Nonparametric test against trend. *Econometrica*, **13**, 245-259.
- Markham, C.G., 1974: Apparent periodicities in rainfall at Fortaleza, Ceará, Brazil. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 179-179.
- Menendez, C.G., 1999: Simulation of South America wintertime climate with a nesting system. Abstracts of the Conference on "Detection and Modeling of Regional Climate Change", 9-12 June 1999, Trieste, Italy.
- New, M.G., Hulme, M., 1997: Development of observed monthly surface climate dataset over global land areas for 1901-1995. *Physics of Climate Conference*, Royal Meteorological Society, London, 29-30 October, 1997.
- Nobre, P., Moura, C.A., 1985: Planetary scale circulation anomalies associated with droughts over Northeast Brazil. *Trop. Ocean Atmos. Newsletter*, 13-15, March.
- Österle, H., Glauer, J., Denhard, M., 1999: Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. PIK-Report, No. 49. 107 pp.
- Parry, M.L., Carter, T.R., Konjin, N.T. (ed.), 1988: The Impact of Climatic Variations on Agriculture. Vol. 2, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers.
- Pereira, H.C., 1973: Land use and water resources in temperate and tropical climates. Cambridge Univ. Press.
- Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A., Solomon, A.M., 1992: A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, **19**, 117-134.
- Ribot, J.C., Magalhaes, A.R., Panagides, S.S. (eds.), 1996: Climate variability, climate change and social vulnerability in the semi-arid tropics. University Press, Cambridge.
- Roecker, E., et al. 1992: Simulation of the present-day climate with the ECHAM modell: Impact of model physics and resolution. Report No. 93. MPI für Meteorologie.
- Roecker, E., et al. 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model Description and Simulation of present-day climate. Report No. 218. MPI für Meteorologie.
- Root, T.L., Schneider, S.H., 1995: Ecology and climate: Research strategies and implications. *Science*, **269**, 334-341.
- Salio, P., Nicolini, M., Saulo, C., McGregor, J.L., Katzfey, J.J., 1999: Surface Air Temperature and Precipitation Climate Simulations over South America with a Nested Regional Model. Abstracts of the Conference on "Detection and Modeling of Regional Climate Change", 9-12 June 1999, Trieste, Italy.
- Sarmiento, F.J., 1996: Methoden für die Ermittlung des Wasserdargebotes als Beitrag zur regionalen Wasserwirtschaftsplanung im Nordosten Brasiliens. Dissertation am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, 154 Seiten.

- Tanajura, C.A.S., 1996: Modeling and Analysis of the South American Summer Climate. PhD Thesis, Faculty of the Graduate School of The University of Maryland.
- The ECMWF Re-Analysis (ERA) Project, 1996. *METEOROLOGICAL, ECMWF Newsletter Number 73*, Autumn 1996. 7-17.
- Thornthwaite, C.W., 1948: An approach towards an rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**, 55-94.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1957: Instructions and tables for computing potential evaporation and the water balance. Drexel Inst. of Technology, Publ. in Climatology, Lab. of Climatology, Vol. X, No. 3, 311 Seiten.
- WBGU, 1993: Welt im Wandel: Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Jahresgutachten, Bonn, Economica Verlag.
- WBGU, 1995: Welt im Wandel - Wege zur Lösung globaler Umweltprobleme. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Jahresgutachten 1995, Springer Verl., Berlin.
- Werner, P.C., v. Storch, H., 1993: Interannual variability of Central European mean temperature in January/February and its relation to the large-scale circulation. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 101.
- Werner, P.C., Böhm, U., Gerstengarbe, F.-W., 1994: Methods and problems of validation of results of different climate model types at a regional scale. In: Contemporary Climatology, 580-583, Hrsg.: R. Brazdil, Brno.

Anlagen:

Anlage 1: Ergebnisse der Klimaanalyse

Anlage 2: Abbildungen

Anlage 1: Ergebnisse der Klimaanalyse

In dieser Anlage werden die wichtigsten Ergebnisse zur Klimaanalyse vorgestellt.

1. Abschätzung der Entwicklung der großräumigen Zirkulationsmuster

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse für jeden Kalendermonat differieren. In Tabelle 1 sind die Signifikanzschwellen des Mann-Kendall-Tests für lineare Trends in den Differenzen des Szenarios A minus Kontrolllauf für jeden Monat und jeden Gitterpunkt angegeben. Dabei repräsentiert jedes Matricelement einen einzelnen Gitterpunkt. Eine schematische Verteilung der untersuchten Gitterpunkte ist in Tabelle 2 angegeben.

Tab. 1: Schematische Verteilung der untersuchten Gitterpunkte

$(-45^{\circ}, -2.8^{\circ})$	$(-42.2^{\circ}, -2.8^{\circ})$	$(-39.4^{\circ}, -2.8^{\circ})$	$(-36.6^{\circ}, -2.8^{\circ})$	$(-33.8^{\circ}, -2.8^{\circ})$
$(-45^{\circ}, -5.6^{\circ})$	$(-42.2^{\circ}, -5.6^{\circ})$	$(-39.4^{\circ}, -5.6^{\circ})$	$(-36.6^{\circ}, -5.6^{\circ})$	$(-33.8^{\circ}, -5.6^{\circ})$
$(-45^{\circ}, -8.4^{\circ})$	$(-42.2^{\circ}, -8.4^{\circ})$	$(-39.4^{\circ}, -8.4^{\circ})$	$(-36.6^{\circ}, -8.4^{\circ})$	$(-33.8^{\circ}, -8.4^{\circ})$
$(-45^{\circ}, -11.2^{\circ})$	$(-42.2^{\circ}, -11.2^{\circ})$	$(-39.4^{\circ}, -11.2^{\circ})$	$(-36.6^{\circ}, -11.2^{\circ})$	$(-33.8^{\circ}, -11.2^{\circ})$

Tab. 2: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für jeden Monat und jeden Gitterpunkt

Januar				
.	.	.	.	.
.	.	X	.	.
.	.	.	.	.
.	X	.	.	.

Februar				
.	.	.	.	.
.	.	.	.	X
X	X	X	X	X
.	.	.	X	X

März				
.	.	X	X	X
.	.	X	X	X
.	.	.	X	.
.	.	.	.	.

April				
X	X	X	X	.
X	X	.	X	X
X	X	X	X	X
X	X	X	X	X

Mai				
.	.	.	.	X
.	.	.	.	.
X	.	.	.	.
X	X	X	.	.

Juni				
.	.	.	.	.
X	X	X	X	X
X	X	X	X	.
X	X	X	.	.

Juli				
X	.	X	X	X
X	X	X	.	.
X	X	X	.	.
X	X	X	.	.

August				
.	.	.	.	.
X	X	X	X	X
X	X	X	X	.
X	X	X	X	X

September				
X	X	.	.	.
X	X	X	X	X
X	X	X	X	.
X	X	X	.	.

Oktober				
.	.	.	.	X
.	.	X	X	.
X	X	.	.	X
.	X	.	.	.

November				
X	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	X	X

Dezember				
.	X	X	X	X
.	.	X	X	X
.	X	X	X	X
X	.	.	.	X

mit x = 10 %, x = 5 %, X = 1 % und X = .1 %.

Es gibt signifikante Unterschiede zwischen den "trockenen" Monaten (Juni bis Oktober) und den anderen Monaten. In den "feuchten" Monaten Dezember bis März gibt es nur einige wenige

Gitterpunkte, die signifikante Trends größer 10 % aufweisen. Die deutlichsten Änderungen im Niederschlagsverhalten treten in den Monaten Juni, Juli und August auf. Da diese Monate aber häufig keinen oder nur geringen Niederschlag aufweisen (er variiert zwischen 0 und 20 mm), sind schon kleine Änderungen mit einer hohen Signifikanz verbunden (s. Tabelle 3). Ein Beispiel (Gitterpunkt 39.4° W, 5.6° S) für die interannuellen Variationen des simulierten Niederschlags für den Zeitraum 2001 - 2050 ist in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. Im Allgemeinen gilt, dass der nach dem Mann-Kendall-Test signifikante Trend in den "trockenen" Monaten nicht wirklich existiert (s. a. Tabelle 2). Dagegen haben die "feuchten" Monate einen Trend, der wegen der sehr starken natürlichen Variabilität teilweise nicht gesichert werden kann (s. a. Tabelle 1), deshalb ist auch das Trend-Rausch-Verhältnis häufig niedrig.

	Januar				
Kontrolllauf	207.2	247.2	233.4	234.2	262.7
Differenz	6.1	-21.1	-18.5	-14.6	-20.4
	221.2	251.8	239.8	222.9	271.4
	1.1	-8.9	-4.6	-8.9	-50.6
	237.9	220.2	195.4	192.0	208.9
	-11.6	-13.1	-15.3	-30.8	-66.0
	274.5	246.1	192.8	156.4	142.6
	-8.4	-16.6	-22.1	-30.2	-53.0

	Februar				
	196.6	221.9	228.0	242.8	259.7
	-12.6	-18.0	-12.5	-15.3	-19.2
	188.8	216.6	206.2	173.7	195.0
	9.2	4.0	1.3	-4.8	-33.4
	202.3	177.8	145.0	132.3	137.0
	3.0	-3.5	-10.3	-28.1	-49.8
	232.1	175.6	124.9	109.7	106.7
	-11.1	-10.6	-16.9	-36.7	-56.9

	März				
Kontrolllauf	206.8	201.2	210.1	226.7	241.0
Differenz	-10.6	-36.2	-34.2	-32.2	-36.3
	178.2	180.2	156.7	125.3	120.9
	8.4	8.7	6.9	2.0	-19.3
	179.9	135.1	98.3	78.5	73.1
	11.4	11.5	12.4	-6.2	-20.3
	194.0	134.4	96.1	70.9	53.8
	-8.5	1.1	-1.8	-7.2	-14.3

	April				
	152.8	125.3	130.4	145.6	144.6
	-51.2	-58.1	-52.7	-59.3	-57.3
	148.8	142.2	104.8	66.1	59.5
	-34.1	-44.0	-38.3	-31.3	-30.8
	148.7	97.7	62.0	40.1	37.3
	-38.2	-29.3	-22.2	-17.3	-16.9
	103.4	61.8	47.6	45.6	42.9
	-25.5	-13.9	-13.2	-16.2	-21.3

	Mai				
Kontrolllauf	97.6	71.0	82.6	98.5	99.4
Differenz	-57.6	-51.0	-60.1	-70.8	-67.6
	119.2	95.8	53.7	28.9	48.6
	-53.5	-48.8	-34.6	-20.7	-35.5
	56.9	30.7	20.6	17.2	23.2
	-24.1	-15.6	-14.1	-12.9	-18.5
	20.5	8.0	8.3	20.5	29.2
	-5.3	-.7	-2.2	-11.1	-21.5

	Juni				
	57.4	41.7	59.1	92.5	110.0
	-30.8	-29.2	-47.7	-75.4	-83.7
	47.0	33.5	13.0	9.1	32.6
	-31.0	-22.4	-9.4	-7.5	-22.8
	7.8	4.9	2.7	2.6	7.2
	-6.0	-3.2	-1.5	-1.7	-5.4
	1.6	.9	1.2	8.9	11.9
	-1.4	-.7	-.5	-5.4	-7.9

	Juli					August				
Kontrolllauf	39.4	15.3	15.2	20.8	21.7	16.1	2.2	1.3	2.8	5.7
Differenz	-26.7	-12.3	-11.9	-12.6	-10.5	-11.6	-1.6	-.7	-.9	-2.0
	19.5	10.4	1.9	2.0	10.1	6.5	3.1	.4	.1	5.0
	-17.2	-8.8	-1.4	-1.8	-3.3	-5.5	-2.8	-.4	-.1	.9
	3.6	2.1	.9	1.7	3.1	5.8	1.8	.3	.6	1.6
	-2.9	-1.7	-.9	-1.6	-2.7	-4.4	-1.8	-.3	-.6	-1.5
	1.5	.7	.6	7.0	8.5	1.7	1.0	.8	4.5	5.0
	-1.2	-.6	-.6	-4.9	-6.0	-.1	-.8	-.4	-3.5	-3.6

	September					Oktober				
Kontrolllauf	3.2	2.4	2.1	2.4	2.8	5.5	6.1	4.2	3.7	2.5
Differenz	-2.2	.2	.7	1.6	.6	-3.9	1.4	1.8	2.4	2.5
	18.1	8.5	1.7	.0	5.5	33.3	19.0	7.5	1.0	7.0
	-17.7	-8.4	-1.7	.0	4.9	-26.3	-15.5	-6.9	-.9	5.0
	47.0	19.2	9.2	2.8	1.0	127.6	59.6	23.8	5.8	.6
	-39.5	-17.6	-9.1	-2.8	-.8	-77.4	-35.9	-16.0	-5.3	-.3
	52.8	34.9	24.1	16.0	4.7	144.6	103.7	71.3	29.3	7.3
	-29.2	-21.4	-15.6	-12.8	-3.0	-25.3	-24.5	-16.8	-9.7	-4.9

	November					Dezember				
Kontrolllauf	96.0	57.7	47.6	44.9	45.5	270.7	259.2	252.5	263.8	290.3
Differenz	-57.3	-36.8	-29.8	-28.0	-29.7	-50.5	-74.1	-71.7	-92.3	-113.8
	136.2	99.4	50.5	24.3	19.4	259.0	244.1	225.0	207.0	196.4
	-67.7	-59.8	-34.3	-16.6	-8.9	-24.0	-33.8	-60.7	-75.4	-92.7
	241.8	151.2	76.1	29.0	12.0	267.1	218.5	178.2	143.5	114.5
	-51.8	-48.4	-39.8	-15.9	-7.0	35.3	3.6	-35.7	-45.7	-49.2
	217.4	164.6	112.9	54.0	19.9	291.7	242.6	180.0	124.2	76.1
	-1.3	-12.5	-24.0	-23.9	-12.4	24.1	5.6	-17.0	-25.4	-18.5

Tab. 3: Mittlere Monatssumme des Niederschlags (mm) für den Zeitraum 2001 - 2050 für den Kontrolllauf und die Differenz Szenarium A - Kontrolllauf an jedem Gitterpunkt

Damit können die wichtigsten Ergebnisse wie folgt zusammengefasst werden:

- Es gibt nur schwache Änderungen im Niederschlagsverhalten in den Trockenperioden.
- In der Regenzeit nimmt - im Gegensatz zum Kontrolllauf - der Niederschlag im Szenarium A-Lauf an den meisten Gitterpunkten und in den meisten Monaten ab.
- Es existieren deutliche Unterschiede zwischen Szenarium A-Lauf und Kontrolllauf hinsichtlich des Niederschlagsverhaltens.
- Wegen der hohen natürlichen Variabilität ist eine statistische Sicherung der teilweise-deutlichen Trends nur bedingt möglich.

2. Szenarien

Der Nordosten Brasiliens stellt eine semi-aride Region dar, für die die wesentliche klimatologische Größe der Niederschlag ist. Das heißt, dass schon geringe Änderungen dieser Größe zu klimatischen Wirkungen führen können, die die Wasserverfügbarkeit und damit die Vegetation, die Wasser- und Landwirtschaft, die Industrie und somit die Gesellschaft als Ganzes erheblich beeinflussen.

Klimatisch läßt sich der derzeitige Zustand der Region wie folgt charakterisieren:

Das Untersuchungsgebiet ist gekennzeichnet durch ein Kernpassatwechselklima mit sommerlicher maritimer Randpassatwitterung. Wesentlichstes Charakteristikum dieses Klimas ist eine ausgedehnte niederschlagsarme Winterperiode. Die Gebirgs- und Küstenregionen weisen durch die angrenzenden Randklimate eine modifizierte Klimacharakteristik auf. Der Jahreszyklus von Regen- und Trockenzeit wird gesteuert durch die großräumige Zirkulation. In Abbildung 10 ist dieser Zyklus schematisch dargestellt. Man erkennt, dass die zwei Jahreszeiten von der Lage der innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) bestimmt werden, die sich wiederum nach der Lage des nordatlantischen bzw. südatlantischen Hochdruckgebietes richtet. Die Lage der Hochdruckgebiete ist von der jeweils herrschenden Meeresoberflächentemperatur (SST) abhängig. Verschiebt sich aufgrund dieser Zusammenhänge zum Beispiel die ITCZ in einem Jahr nicht weit genug nach Süden, kommt es zu einer Abschwächung der Regenzeit, die in eine Dürre münden kann. (s. z.B. *Hastenrath, 1991*)

Ein weiteres Phänomen, das die klimatischen Bedingungen in diesem Gebiet nachhaltig beeinflusst, sind die El-Nino-Ereignisse, die bisher in den meisten Fällen zu verstärkten Dürreperioden, in Einzelfällen aber auch zu einer Verstärkung der Regenzeit geführt haben (*Parry et al., 1988*).

Die räumliche Struktur der Niederschlagsverteilung ist in Abbildung 11 dargestellt und weist folgende wichtige Merkmale auf:

- Der Niederschlag nimmt von der Küste zum Landesinneren hin deutlich ab.
- Im Westen der Region werden höhere Niederschläge als im Osten beobachtet.
- In den Gebirgsregionen und insbesondere auf deren Luvseiten ist der Niederschlag in der Regel höher als in den anderen Gebieten. Die Höchstwerte liegen zwischen 1900 mm und 2000 mm (Serra da Ibiapaba).
- Ein ausgeprägtes niederschlagsarmes Gebiet (500 mm - 600 mm) erstreckt sich südlich der Serra do Machado bis zum Nordwestrand der Chapada do Araripe (Fokusgebiet Tauá).

Die mittlere zeitliche Verteilung des Niederschlags für die durch eine Regen- und eine Trockenzeit gekennzeichnete Region ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Struktur der räumlichen Verteilung des Niederschlags in den einzelnen Monaten entspricht während der Regenzeit (Dezember - Mai) der Jahresniederschlagsverteilung. In der Trockenzeit lösen sich diese Strukturen fast vollständig auf, so dass im September selbst in den Gebirgsregionen nur noch Niederschlagssummen von 10 mm - 20 mm gemessen werden. Eine weitere Besonderheit in der zeitlichen Entwicklung der Niederschlagsverteilung ist das zu beobachtende deutlich frühere Einsetzen der Niederschläge nach der Trockenzeit im mittleren und westlichen Teil von Piauí im Vergleich zu den übrigen Gebieten. Das betrifft insbesondere die Monate Oktober und November, für die in dem betreffenden Gebiet Monatssummen bis zu 80 mm bzw. 180 mm gemessen werden, im Gegensatz zum Beispiel zur Küstenregion mit Werten um 10 mm.

Am Beispiel der Temperatur soll noch kurz dargestellt werden, dass die Variationsbreite der anderen zur Verfügung stehenden meteorologischen Parameter in Raum und Zeit wesentlich

geringer ausfällt als die des Niederschlags. Aus der räumlichen Verteilung der mittleren Temperaturverhältnisse (Abbildung 13) ist zu ersehen, dass innerhalb von Piauí und Ceará unter Einbeziehung der Bergregionen Schwankungsbreiten von maximal 7 K auftreten. Ähnlich verhält es sich mit dem Jahresgang der Temperatur (s. als Beispiel Abbildung 14), der eine Amplitude < 3 K im Mittel nicht überschreitet. Bemerkenswert ist noch, dass während der Regenzeit die interdiurne Veränderlichkeit erheblich größer ist als während der Trockenzeit.

Die durch die Fachbereiche zu Beginn des Projektes festgelegten Referenzgebiete liegen in einer Linie, die von Gilbués im Süden Piauís über Projeto Piloto und Picos bis nach Tauá im Südwesten von Ceará reicht. Die Jahressummen des Niederschlags nehmen entlang dieser gedachten Linie von ca. 900 mm (Gilbués) auf etwa 600 mm im Gebiet von Tauá ab (s. a. Tabelle 4). Desweiteren kann man aus der Tabelle entnehmen, dass es eine Verschiebung des Beginns/Endes von Regen- und Trockenzeit gibt. Die Regenzeit setzt in Gilbués zuerst und in Tauá zuletzt ein. In gleicher Richtung nimmt die Länge der Trockenzeit zu. Obwohl Tauá die Station mit der geringsten Jahressumme des Niederschlags ist, weist sie die höchste Monatssumme (März) auf, das heißt, dass vom klimatologischen Standpunkt aus auf eine ungünstige hydrologische Situation zu schließen ist.

Gebiet	Monat												Jahr
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Gilbués	150	150	120	90	10	10	0	0	10	60	160	150	910
Projeto Pil.	150	170	150	110	20	10	0	0	0	60	130	120	920
Picos	130	150	170	120	30	10	0	0	0	20	50	90	770
Tauá	50	100	200	140	60	20	10	0	0	0	10	30	620

Tab. 4: Mittlere Monatssummen des Niederschlags für die Referenzgebiete, Bezugszeitraum 1962 - 1971 (aus 10 mm gerundete Werte)

Das Untersuchungsgebiet weist eine sehr hohe mittlere natürliche Variabilität des Niederschlags auf. Aus Abbildung 15 ist zu erkennen, dass das Flächenmittel des Niederschlags für die Untersuchungsregion zwischen 400 mm (1915) und 1500 mm (1985) schwankt. Diese Variabilität wird begleitet zum einen von starken Schwankungen in der Länge von Regen- und Trockenzeiten sowie tendenziellen Entwicklungen über längere Zeiträume. Abbildung 16 gibt ein charakteristisches Beispiel dafür. Deutlich erkennbar sind die großen Schwankungen in der Dauer der Trockenzeit (zwischen ca. 50 und 270 Tagen) und der Trend hin zu einem späteren Beginn und damit einer Verkürzung der Trockenzeit.

Das heißt, dass allein schon die natürliche Variabilität eine hohe Belastung für die Gesellschaft darstellt. Deshalb ist die Frage, ob und wie sich diese Variabilität in Zukunft verändert, von herausragender Bedeutung. Diese Problemstellung bildete den Ausgangspunkt zur Formulierung der für das Teilprojekt Klimaanalyse/-modellierung zu lösenden Aufgaben. Im Kern bestand die Aufgabe in der Entwicklung eines regionalen Szenarienmodells, das in der Lage ist, plausible zukünftige klimatische Entwicklungen abzuschätzen und die daraus zeitlich und räumlich ableitbaren meteorologischen Größen den anderen Teilprojekten bereitzustellen.

Da die bisher vorhandenen Methoden zur Regionalisierung (regionales Klimamodell, statistisches "Downscaling"-Modell) zur Zeit noch keine befriedigenden Ergebnisse im Hinblick auf eine Datenbereitstellung über größere Zeiträume für Fragestellungen der Klimafolgenforschung liefern können, wurde ein neuer Weg beschritten. Entwickelt wurde auf statistischer Basis ein Modell, das großskalige Aussagen aus globalen Klimamodellen mit regionalen Beobachtungsdaten verknüpft. Eine genaue Beschreibung des Modellalgorithmus

sowie Testbeispiele sind Anlage 2 zu entnehmen.

Für die im Projekt durchgeführten Modellrechnungen wurde der Niederschlag als Leitgröße festgelegt. Damit war es notwendig, aus einem globalen Klimamodellauf die zukünftige Niederschlagsentwicklung für den Nordosten Brasiliens abzuschätzen. Vorgehen und Ergebnisse dieser Abschätzung sind in Kapitel 1.3.1 des Abschlußberichtes nachzulesen.

Damit konnte ein Klimaszenarium für den Zeitraum 2001 - 2050 berechnet werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren:

Niederschlag

In Abbildung 17 sind die mittleren Niederschlagsverhältnisse für den Zeitraum 2041 - 2050 dargestellt. Die letzten 10 Jahre des transienten Szenarienlaufs wurden gewählt, um die mittleren Verhältnisse am Ende des Berechnungszeitraumes bewerten zu können. Man erkennt, dass sich über die 50 Jahre die räumliche Struktur nur unwesentlich geändert hat (vgl. Abbildung 11). Anders sieht es aus, wenn man die Differenzenkarte 2041/50 - 1921/80 betrachtet (Abbildung 18). Wie schon aus den Ergebnissen zur Entwicklung der großräumigen Zirkulation zu erkennen war, ist für fast das gesamte Untersuchungsgebiet ein starker Rückgang der Jahressummen des Niederschlags zu beobachten. Die Spanne reicht dabei von 0 bis 400 mm. Die wenigen kleinen Gebiete mit einer schwachen Zunahme fallen dagegen kaum ins Gewicht. Das heißt, dass das gesamte Untersuchungsgebiet bei einem weiteren Anstieg der Treibhausgaskonzentration durch längere, intensivere Trockenzeiten negativ beeinflusst wird.

Temperatur, relative Luftfeuchte, Strahlung

In der Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21 sind die mittleren Jahreswerte für die Lufttemperatur, relative Feuchte und die Globalstrahlung in ihrer räumlichen Verteilung für den Zeitraum 2041 - 2050 dargestellt. Für alle drei Größen gilt, dass die Differenzen zum Ist-Klima vernachlässigbar gering sind. (Als Beispiel vergleiche Abbildung 13 und Abbildung 19). Da damit nachgewiesen ist, dass diese Elemente keine relevanten das Klima beeinflussenden Änderungen haben, wird auf eine weitere Untersuchung und Interpretation dieser Ergebnisse verzichtet.

Länge der Trockenzeit

Die räumliche Verteilung der Länge der Trockenzeit für den Analysezeitraum ist in Abbildung 15 dargestellt. Man erkennt eine deutliche räumliche Strukturierung, die zwischen 165 und 225 Tagen schwankt. Die folgende Abbildung 23 zeigt den mittleren Zustand für die letzten 10 Jahre des Szenarienzeitraumes. Unter Beibehaltung der räumlichen Strukturen verlängert sich in den meisten Gebieten der Staaten Piauí und Ceará die Trockenzeit (Abbildung 24). Die Größe dieser Änderungen schwankt zwischen 0 und 20 Tagen. Eine deutliche Verringerung der Trockenzeitperiode ist südlich von Ceará zu beobachten, einer Region, die nicht mehr in das Untersuchungsgebiet einbezogen ist. Es ist noch zu erwähnen, dass die Zunahme der Länge der Trockenzeit korrespondiert mit der gleichzeitigen Abnahme des Niederschlags in dieser Region.

Verlagerung der Klimagebiete

Entsprechend der Klimaklassifikation nach Köppen wurden mit einer modifizierten Variante von Guetter/Kutzbach (bessere Einbeziehung der Vegetation) die Klimatypen des Untersuchungsgebietes sowohl für den Analyse- als auch Szenarienzeitraum berechnet und daraus die jeweiligen Verlagerungen bestimmt. Abbildung 25 zeigt, dass es fünf Klimatypen in der Gesamtregion gibt: Af - tropisch, immerfeucht; Aw - tropisch, wechselfeucht, trockene Winter; As - tropisch, wechselfeucht, trockene Sommer; BS -Steppenklima; BW - Wüstenklima;

Cs - subtropisch, sommertrocken, die sich zum Zeitraum 2041-2050 entsprechend Abbildung 26 verlagern. Zwei wesentliche Klimaverschiebungen sind zu beobachten: Zum einen die Verschiebung von Aw nach BS (für das Gesamtgebiet $12.4 \% = 95347 \text{ km}^2$), zum anderen eine Verschiebung von BS nach BW (für das Gesamtgebiet $19.8 \% = 152533 \text{ km}^2$). Die erste Verschiebung ist für das Gebiet von Piauí und Ceará von Bedeutung, die zweite für die südliche Region. Betroffen ist auch das Referenzgebiet um Tauá (Ceará), in dem sich das Steppenklima zum Wüstenklima wandelt.

Extremwertverhalten

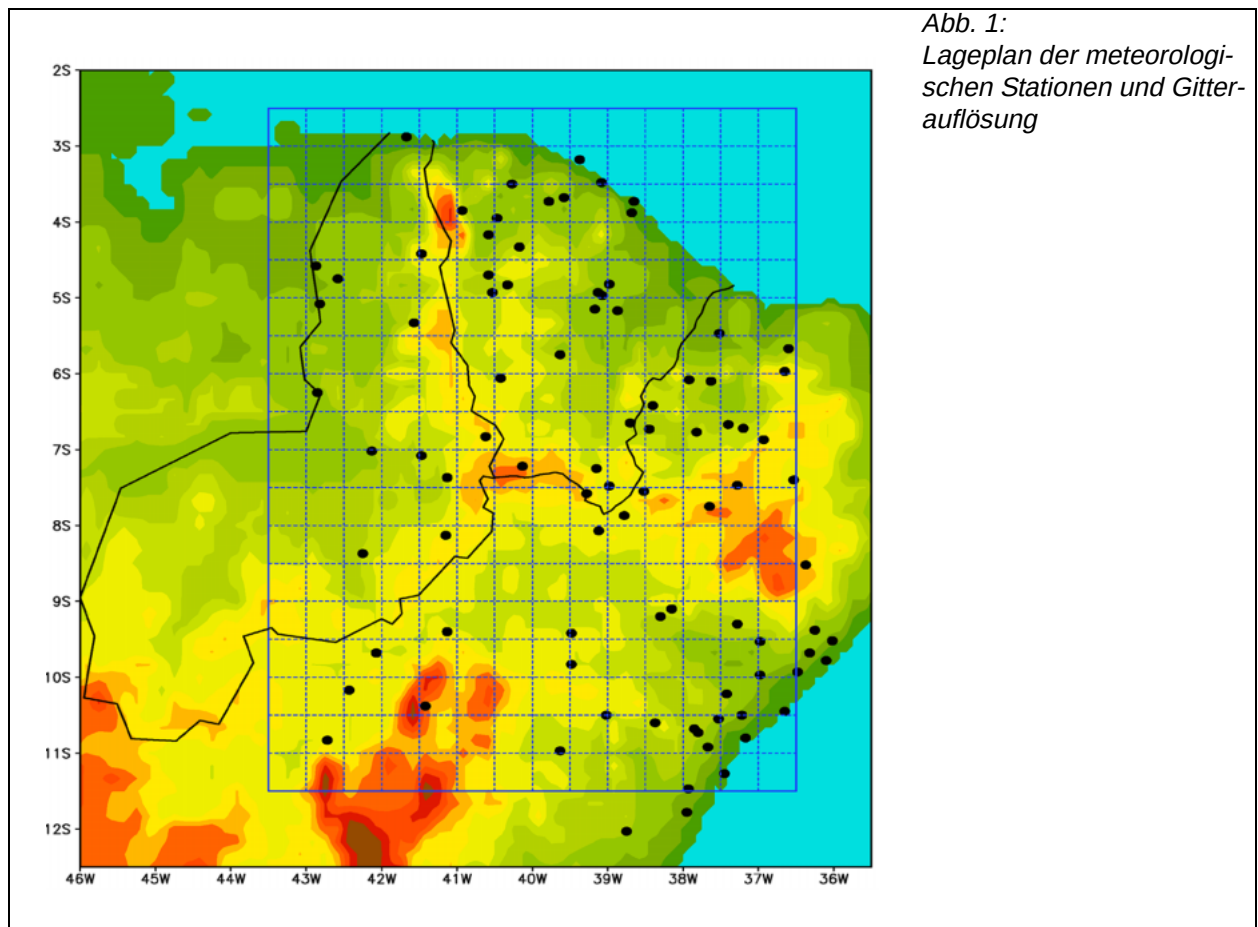
Zur Bewertung der Extreme wurde der natürliche Extremwertbereich NE (*Gerstengarbe, Werner, 1989*, Anlage 8) herangezogen, der ein Maß für die nicht zur Grundgesamtheit einer Stichprobe gehörenden Werte darstellt. Die Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Werte des NE für die Tagessummen des Niederschlags für die Zeiträume 1921/80 und 2001/50. Man erkennt, dass sich für den Zeitraum 2001/50 der natürlichen Extremwertbereich in den meisten Regionen zu deutlich kleineren Werten hin verschiebt. Dies korrespondiert mit der bereits in den Szenarienrechnungen nachgewiesenen Niederschlagsabnahme für diese Regionen. Das heißt, dass neben der Abnahme der Menge des Niederschlags auch ein Rückgang der Intensität zu erwarten ist.

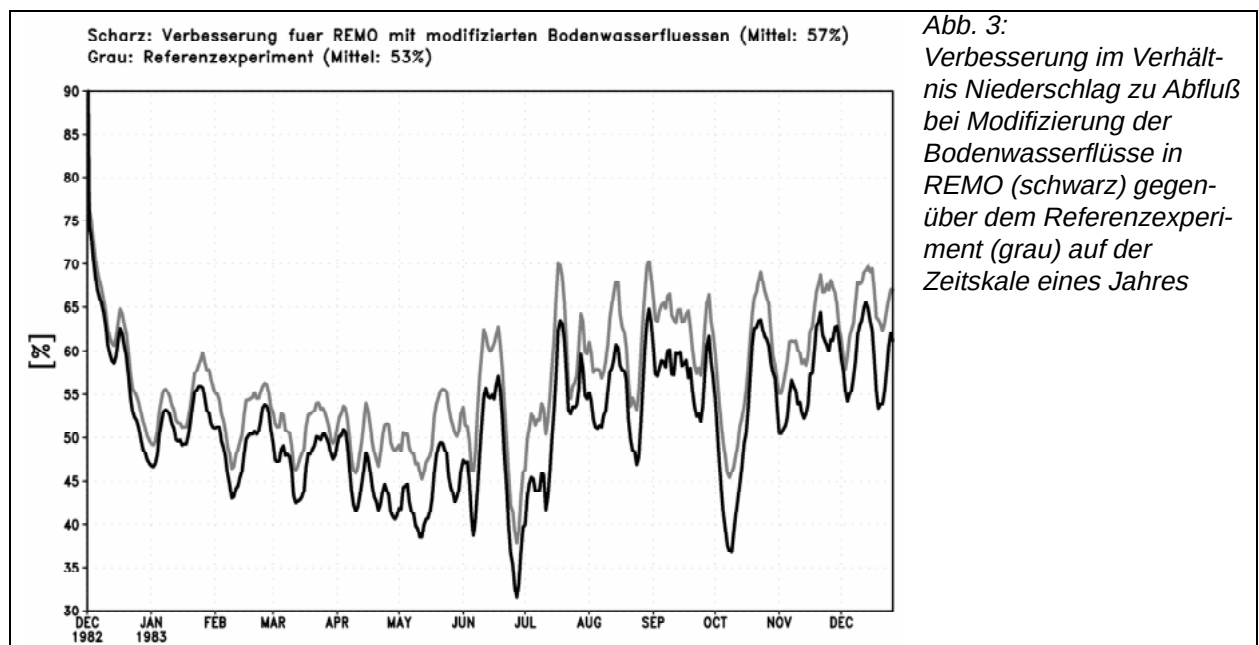
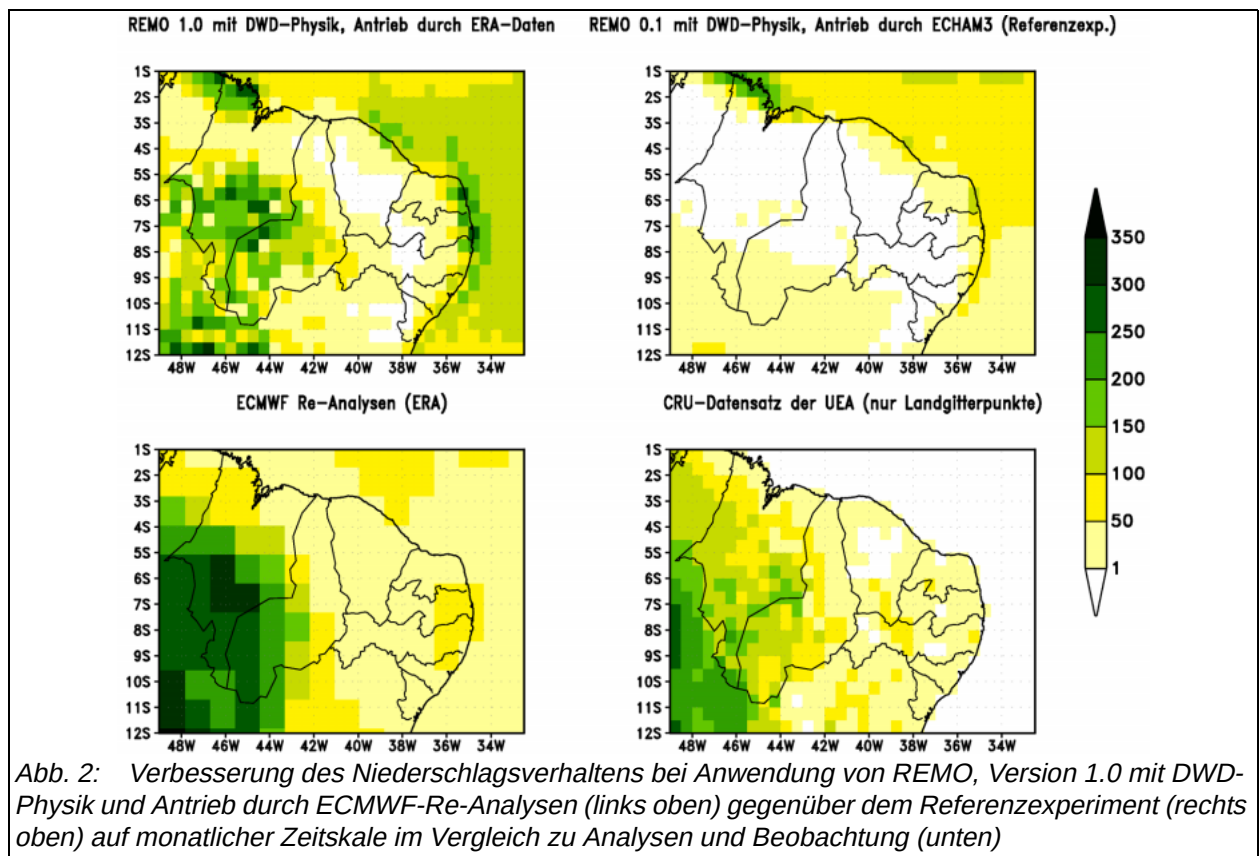
Bemerkenswert ist, dass bei der Untersuchung des NE für die Längen der Trockenzeiten der beiden Zeiträume keine großen Veränderungen zu beobachten sind (Abbildung 29 und Abbildung 30).

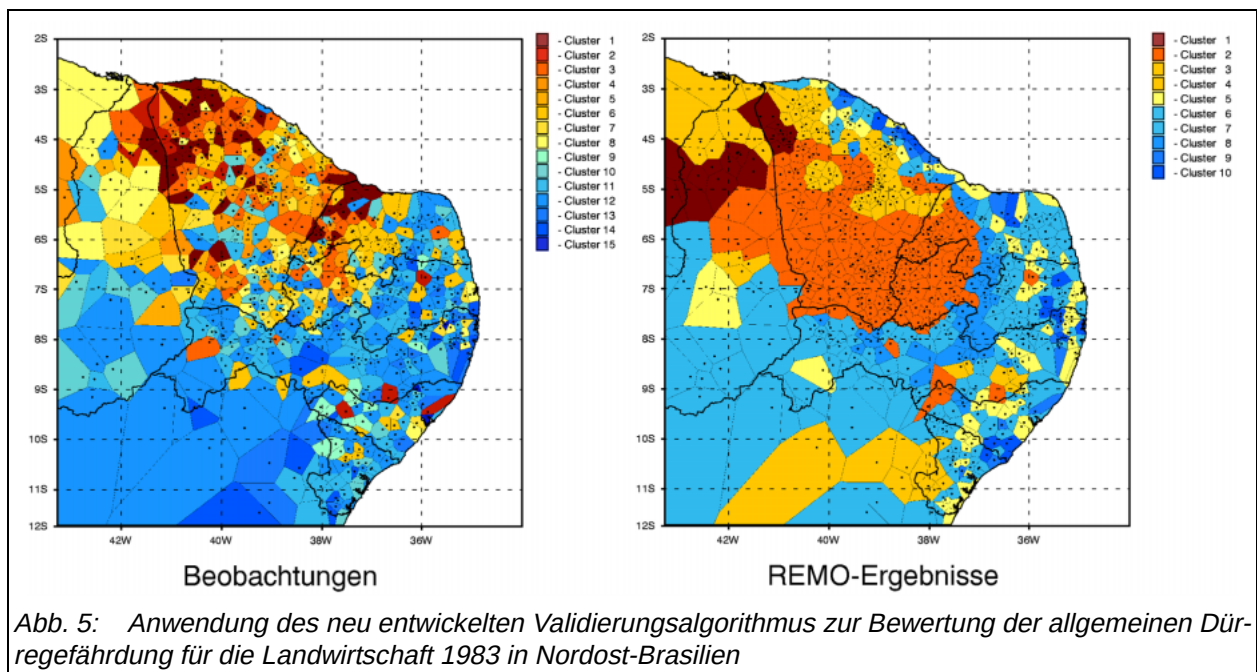
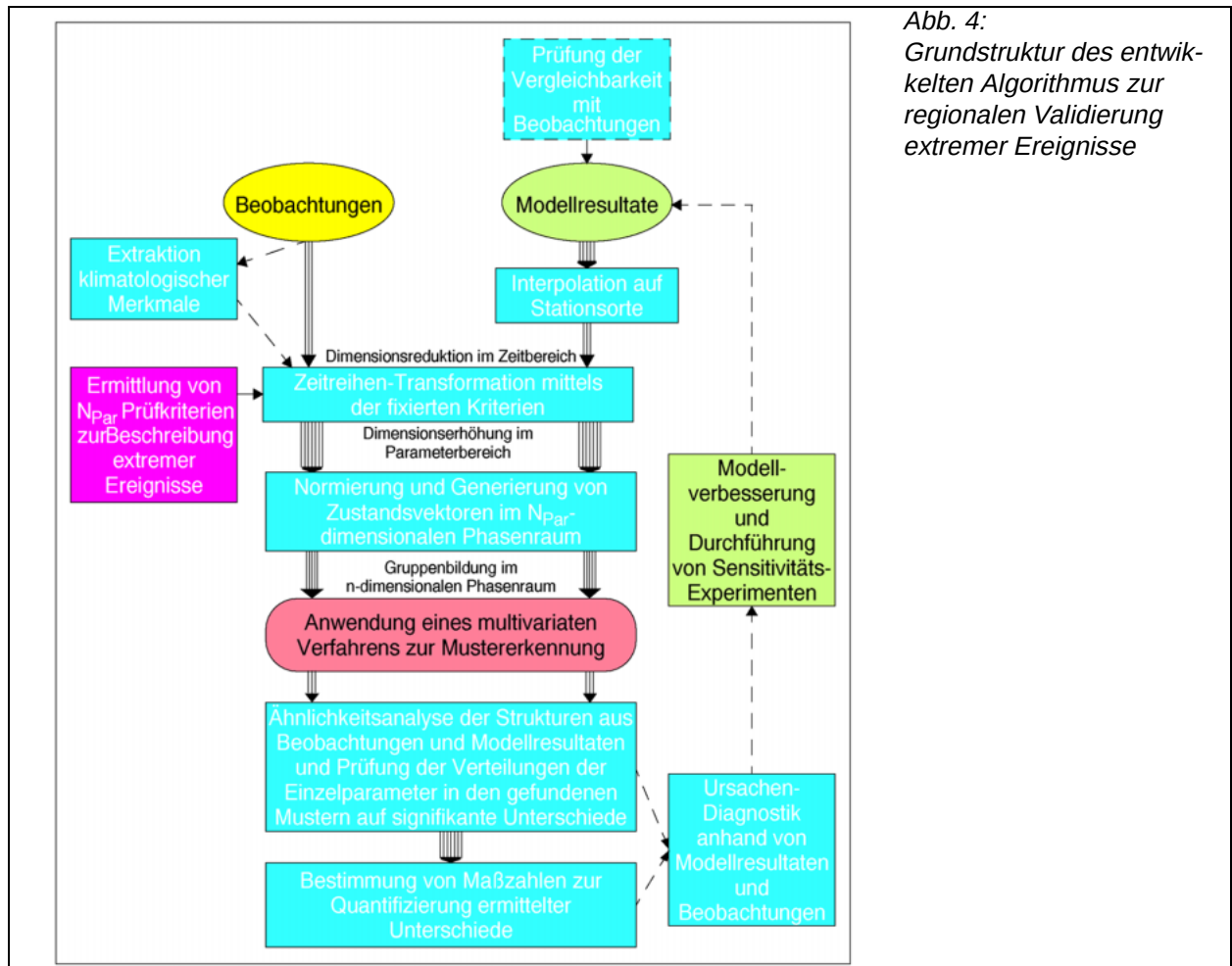
Als zusätzliches Beispiel für den Rückgang der Intensität sind in der Abbildung 31 und Abbildung 32 die jeweils 100 größten Tagessummen des Niederschlags für die Station Cedro dargestellt. Auch hier erkennt man, dass sowohl die Summen der Absolutwerte im Jahr für den zweiten Zeitraum geringer sind als bisher beobachtet und gleichzeitig in diesem Zeitraum die Häufigkeit der Extreme zum Ende hin abnimmt.

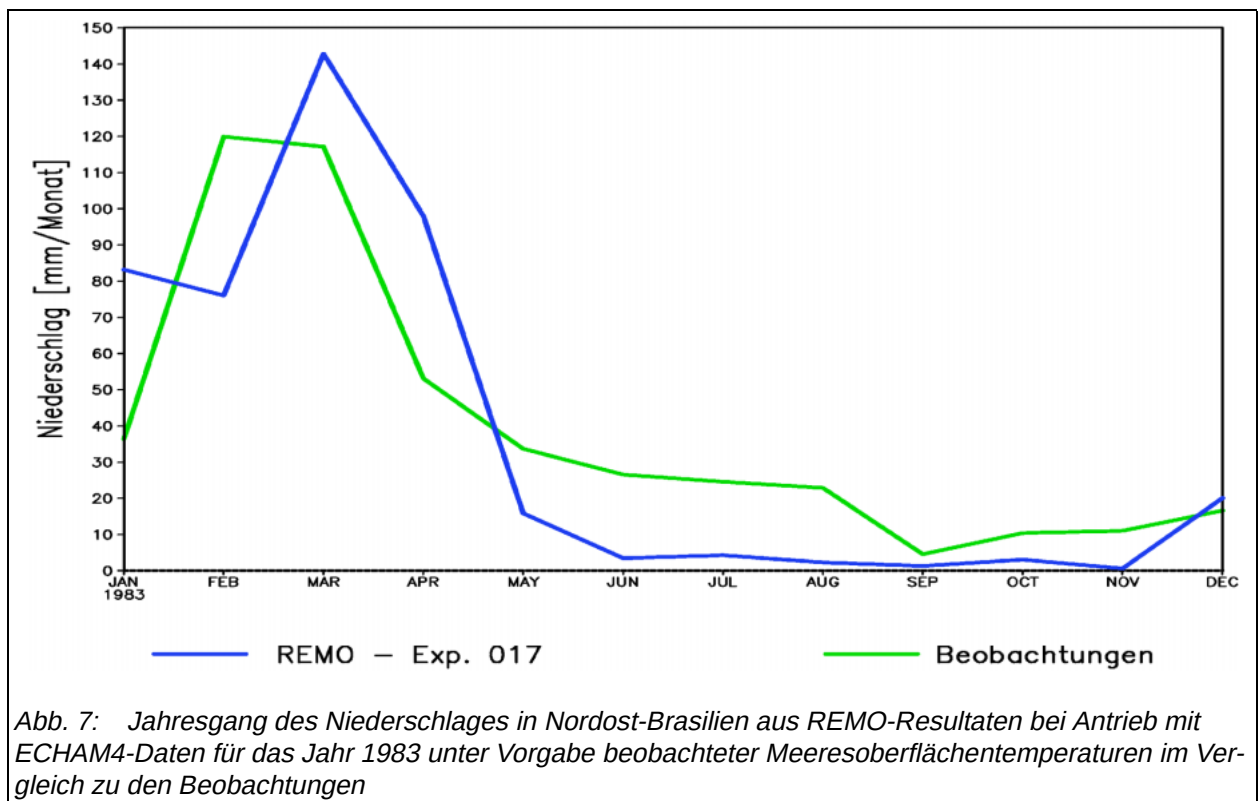
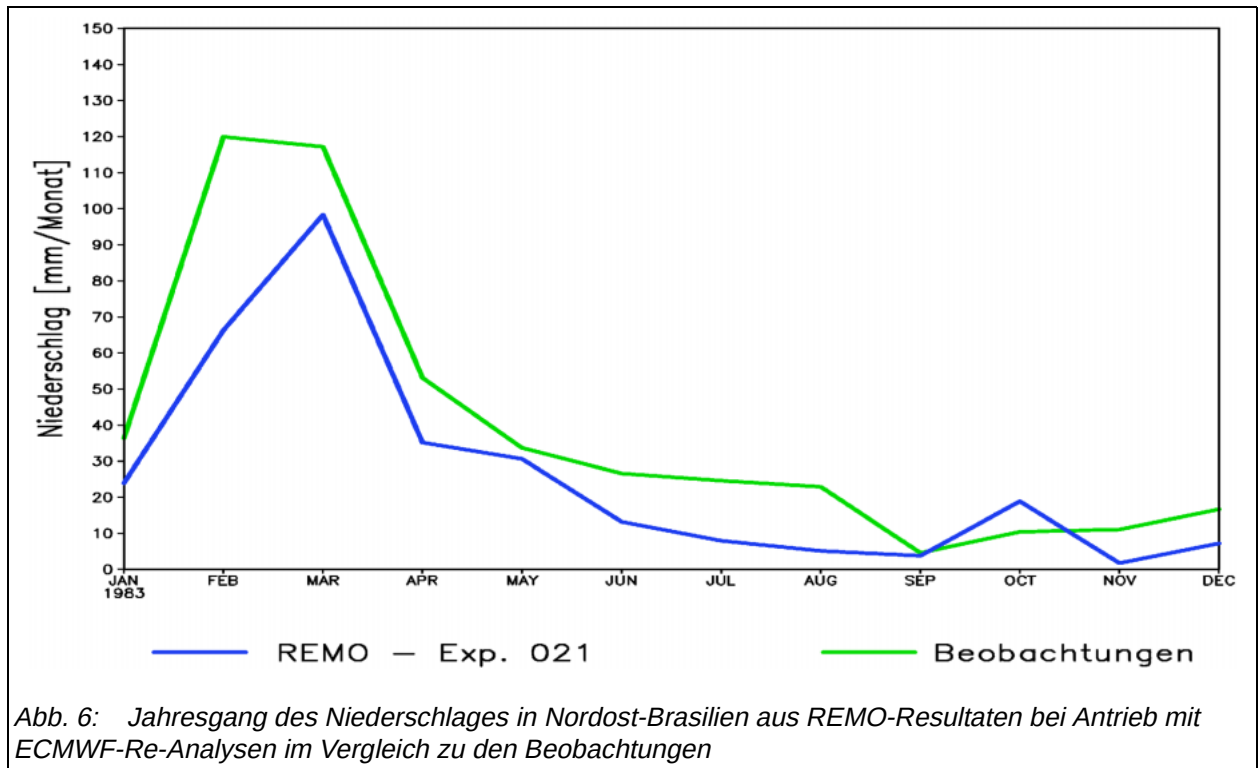
Damit ist nachgewiesen, dass die zu erwartenden Klimaänderungen einen Einfluß auf das Extremwertverhalten haben und aufgrund ihrer Bedeutung einer genaueren Untersuchung unterzogen werden müssen.

Anlage 2: Abbildungen









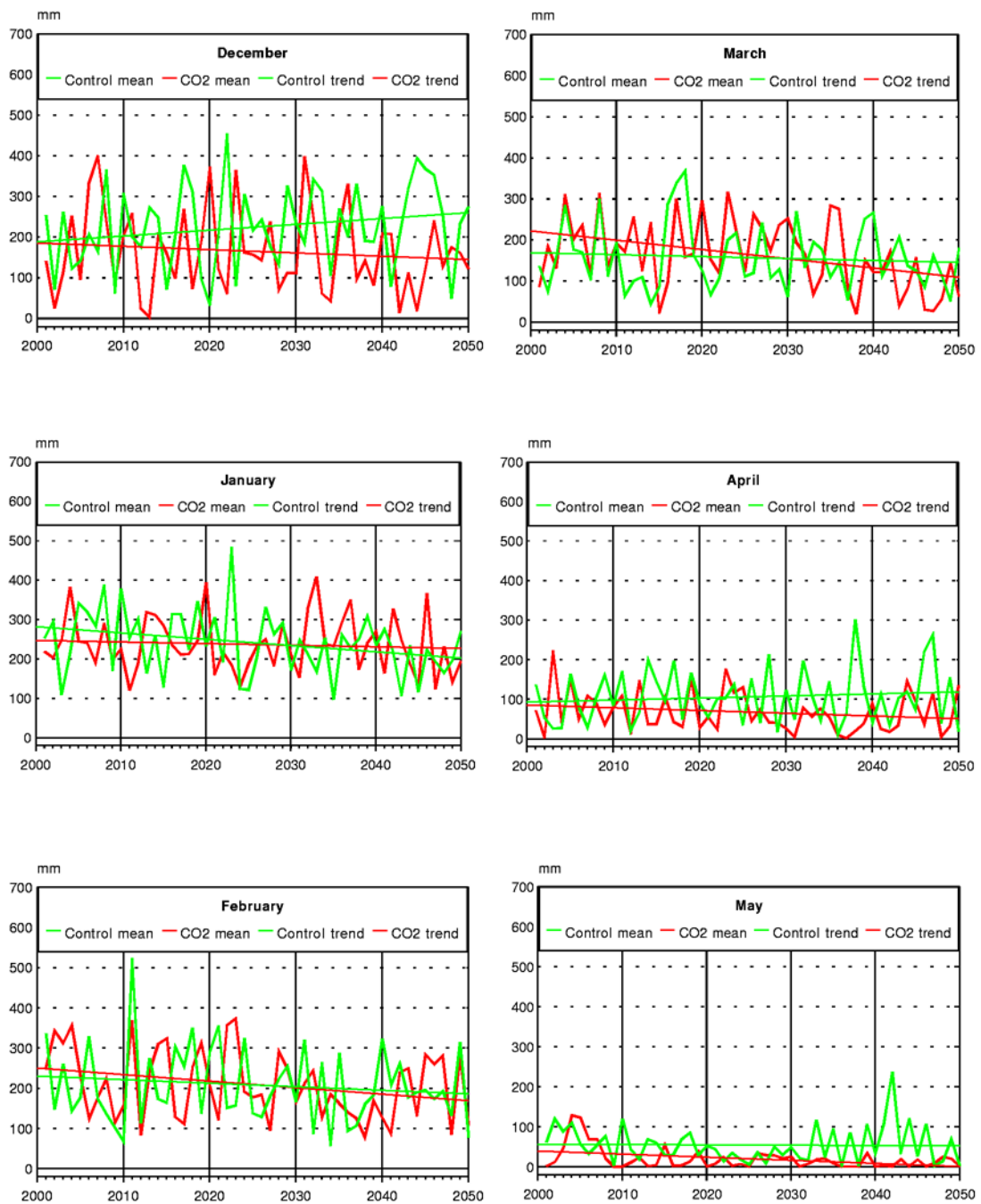


Abb. 8: Niederschlag für den Zeitraum 2001 - 2050 am Gitterpunkt 39.4° W 5.6° S für die Monate Dezember bis Mai

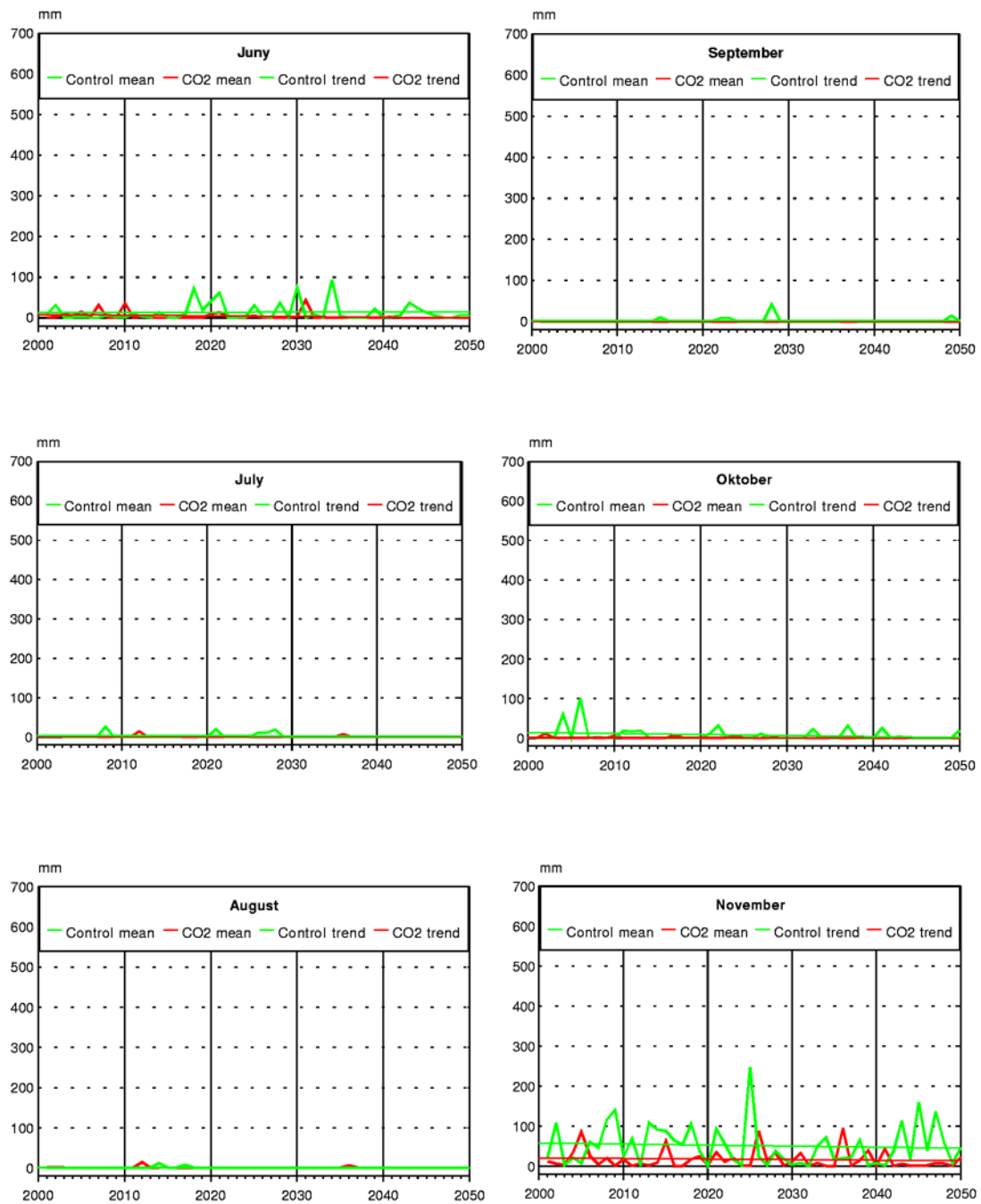


Abb. 9: Niederschlag für den Zeitraum 2001 - 2050 am Gitterpunkt 39.4° W 5.6° S für die Monate Juni bis November

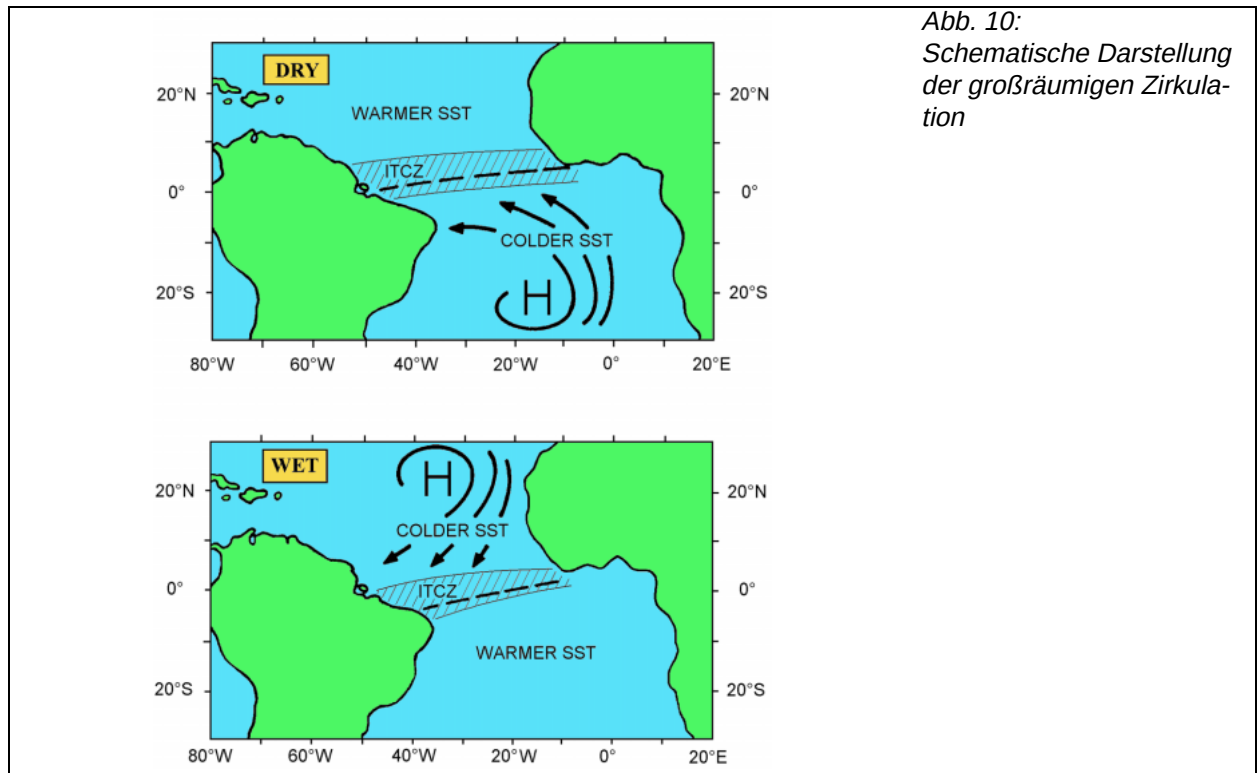


Abb. 10:
Schematische Darstellung
der großräumigen Zirkula-
tion

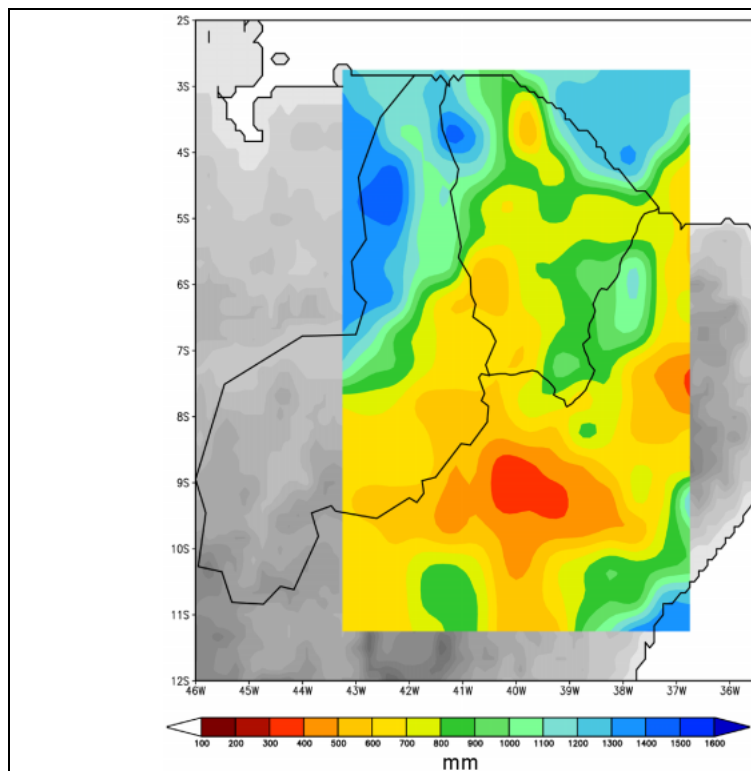


Abb. 11:
Räumliche Struktur der Nie-
derschlagsverteilung, Mittel
für den Zeitraum 1921 -
1980

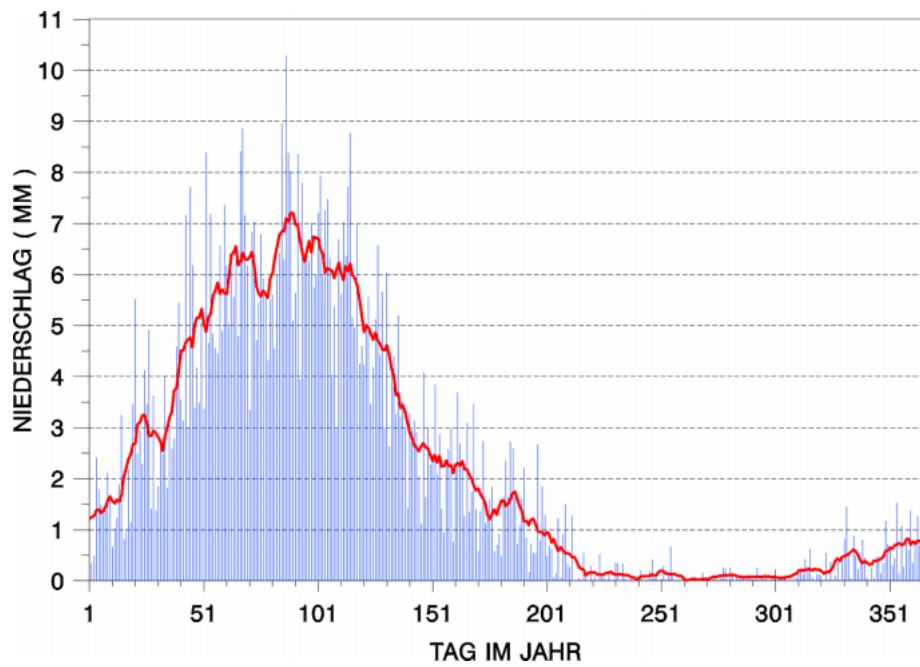


Abb. 12: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für die Station Cedro, 1921 - 1980

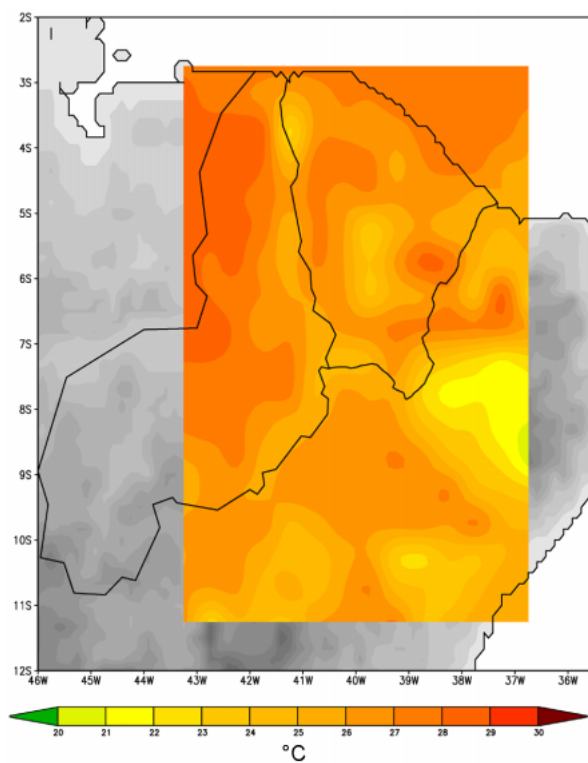


Abb. 13:
Räumliche Struktur der
Temperaturverteilung, Mittel
für den Zeitraum 1921 -
1980

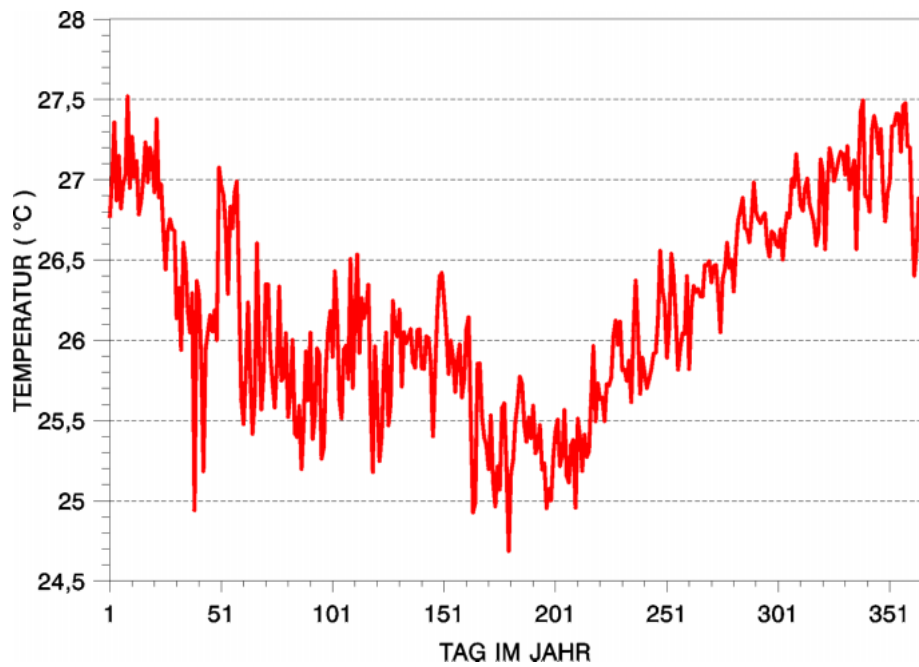


Abb. 14: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur für die Station Cedro, 1921 - 1980

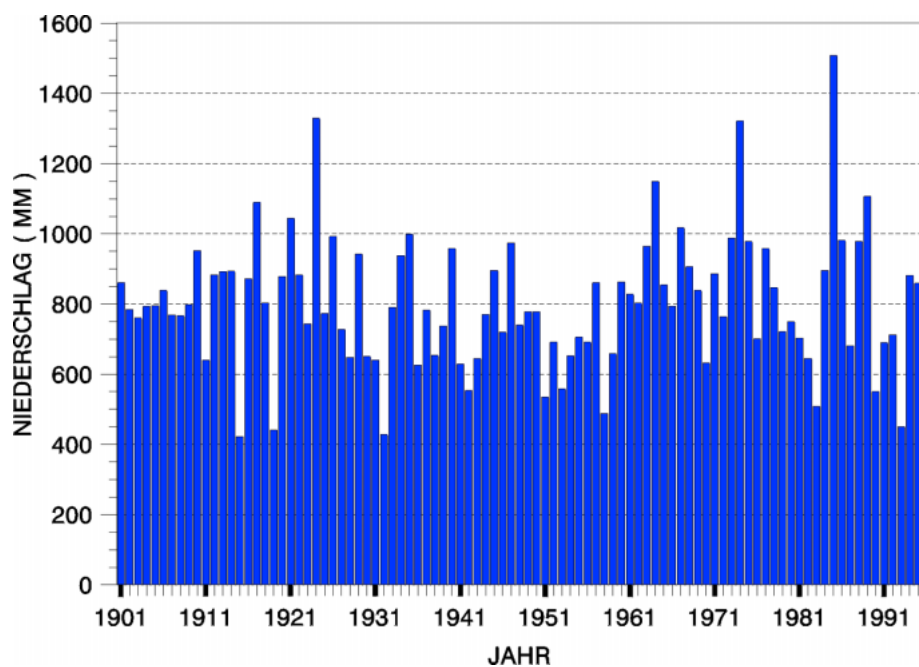


Abb. 15: Zeitlicher Verlauf des Flächenmittels des Niederschlags für die Untersuchungsregion, 1901 - 1995

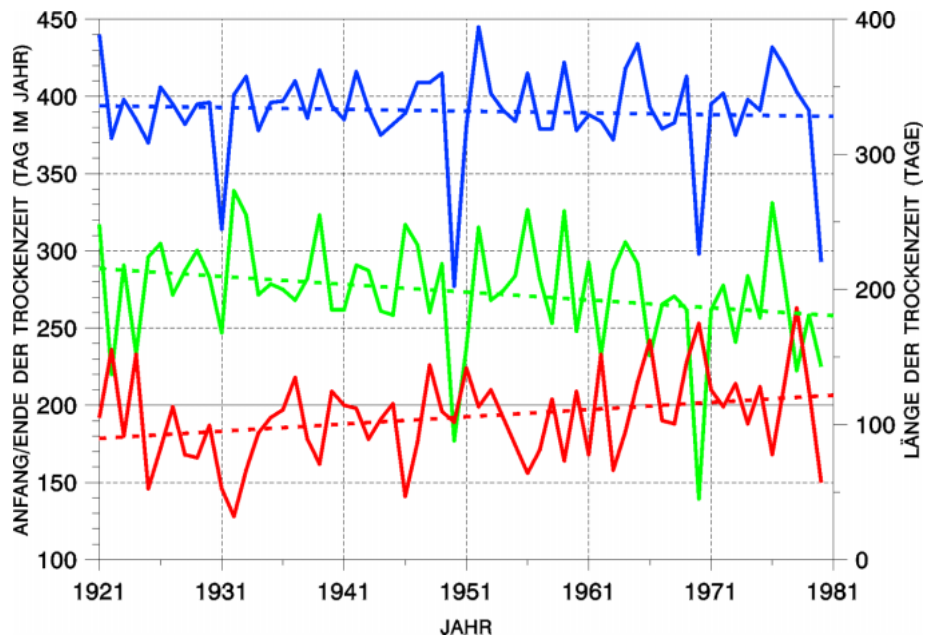


Abb. 16: Zeitlicher Verlauf von Anfang (rot), Ende (blau) und Länge (grün) der Trockenzeit für die Station Cedro, 1921 - 1980

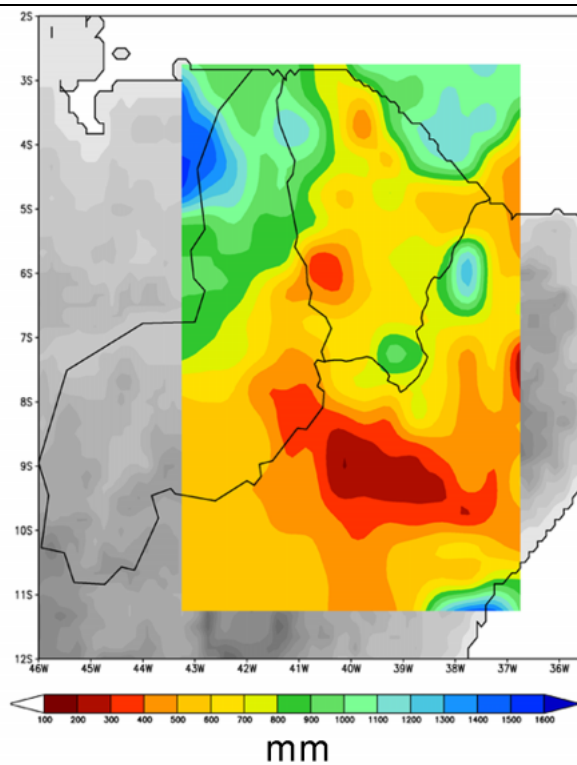
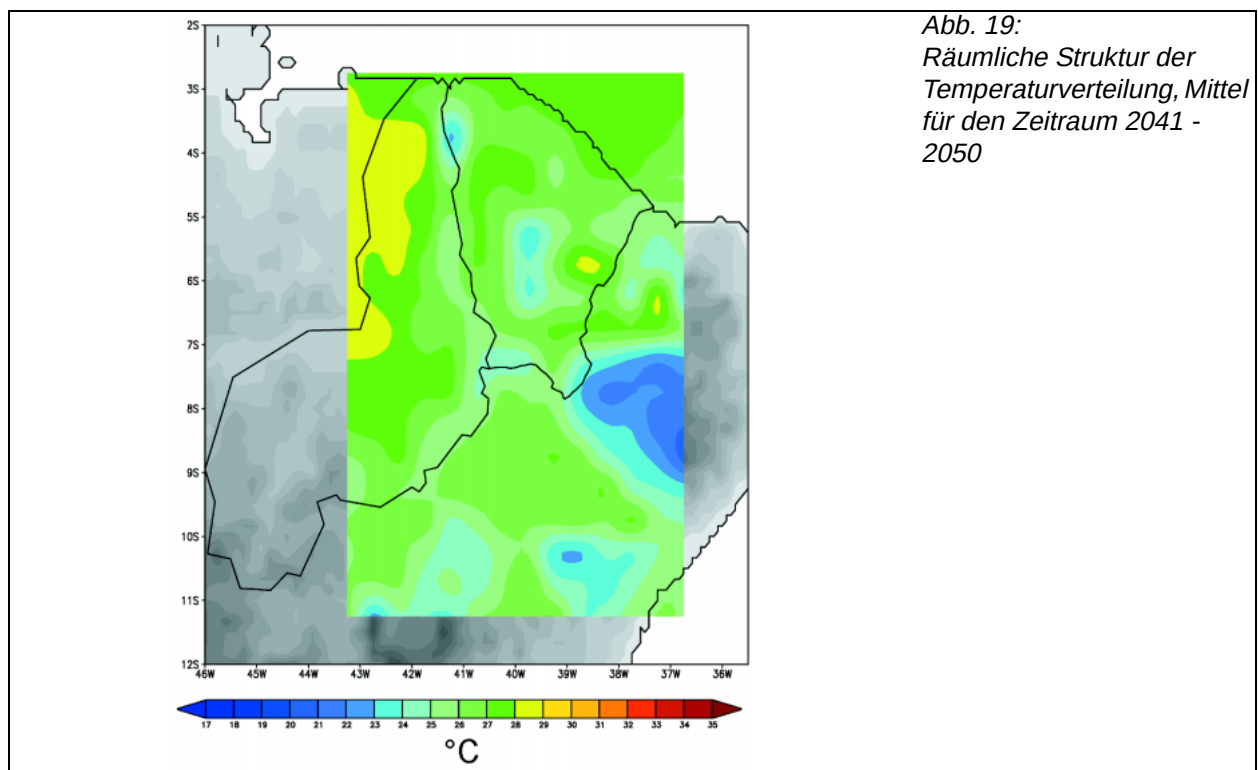
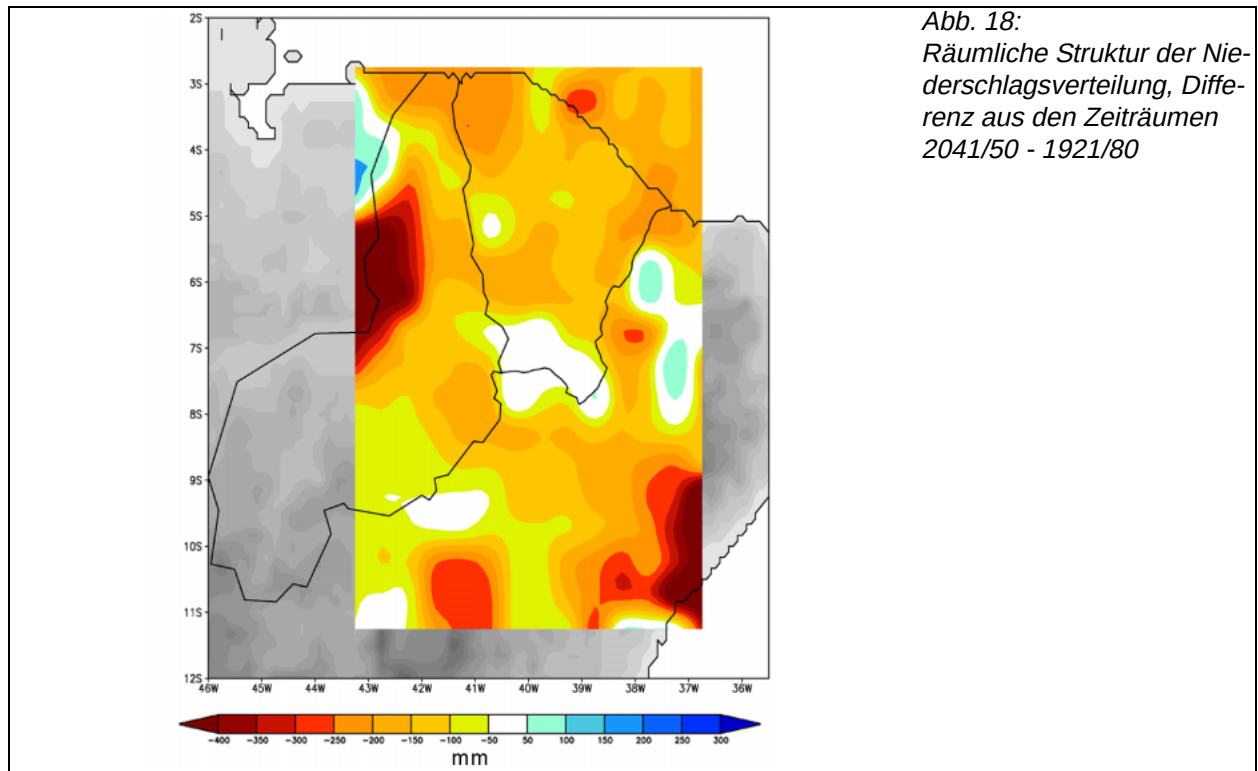
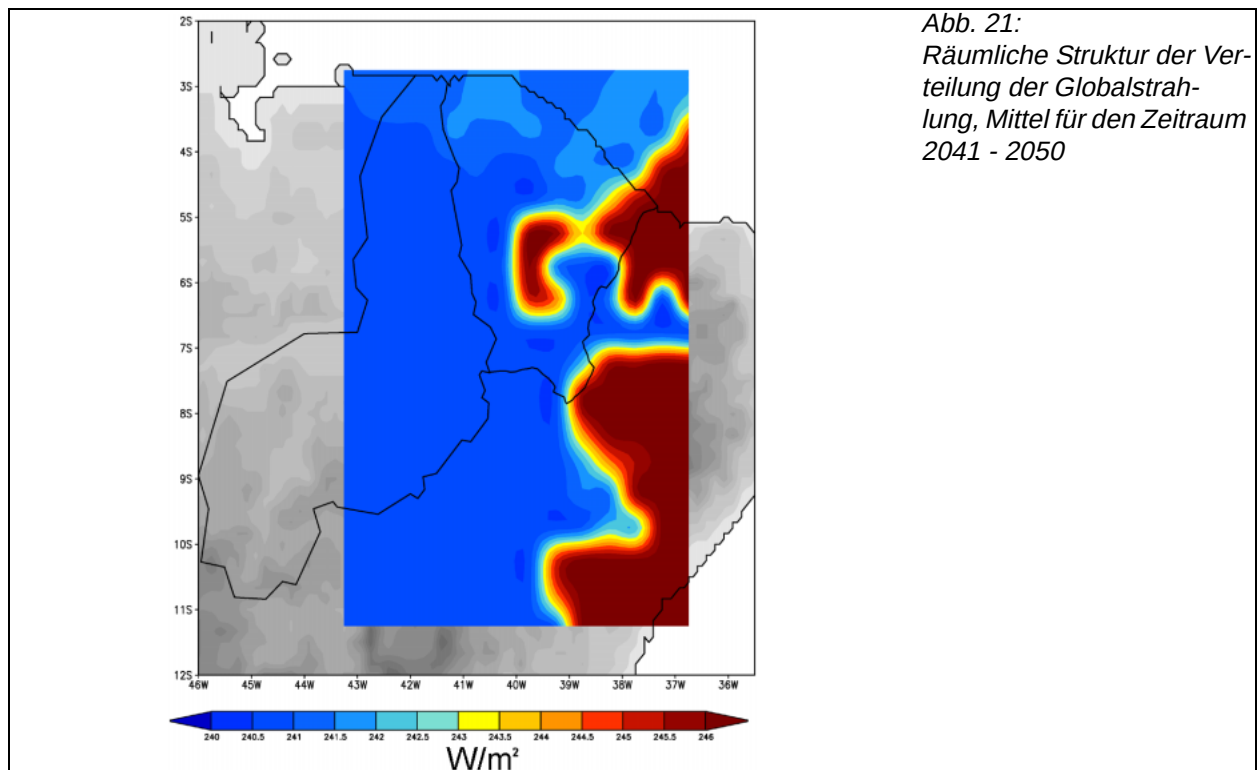
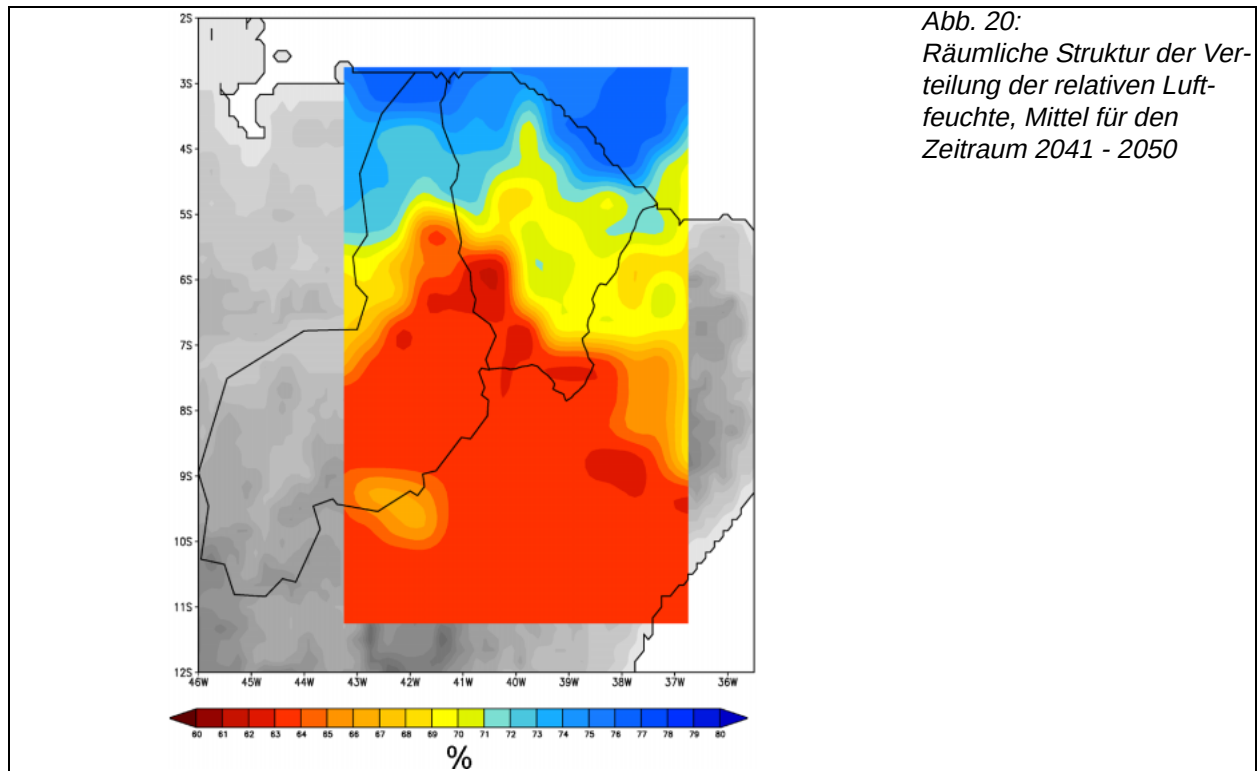


Abb. 17: Räumliche Struktur der Niederschlagsverteilung, Mittel für den Zeitraum 2041 - 2050





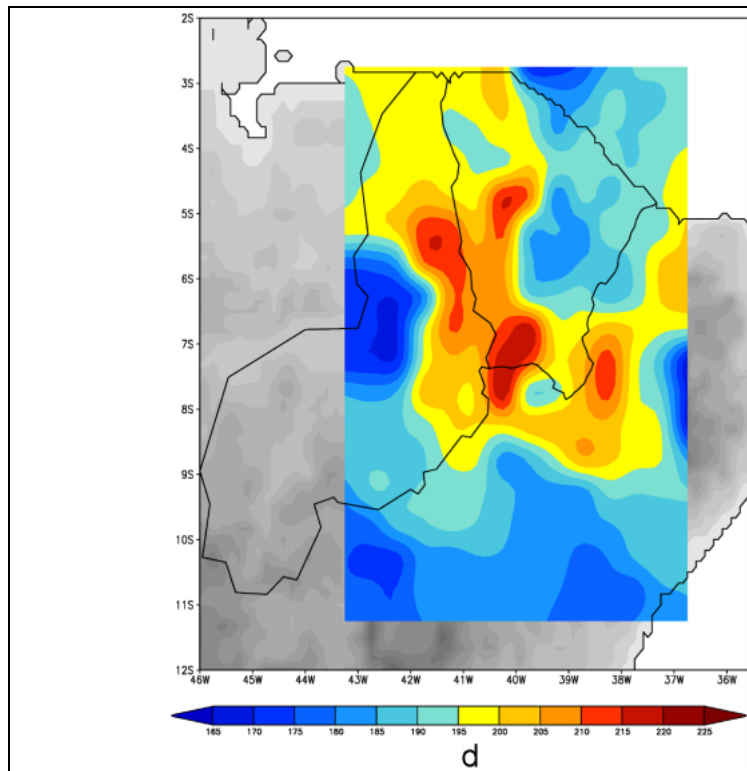


Abb. 22:
Räumliche Struktur der Ver-
teilung der Länge der Trok-
kenzeit, Mittel für den
Zeitraum 1921 - 1980

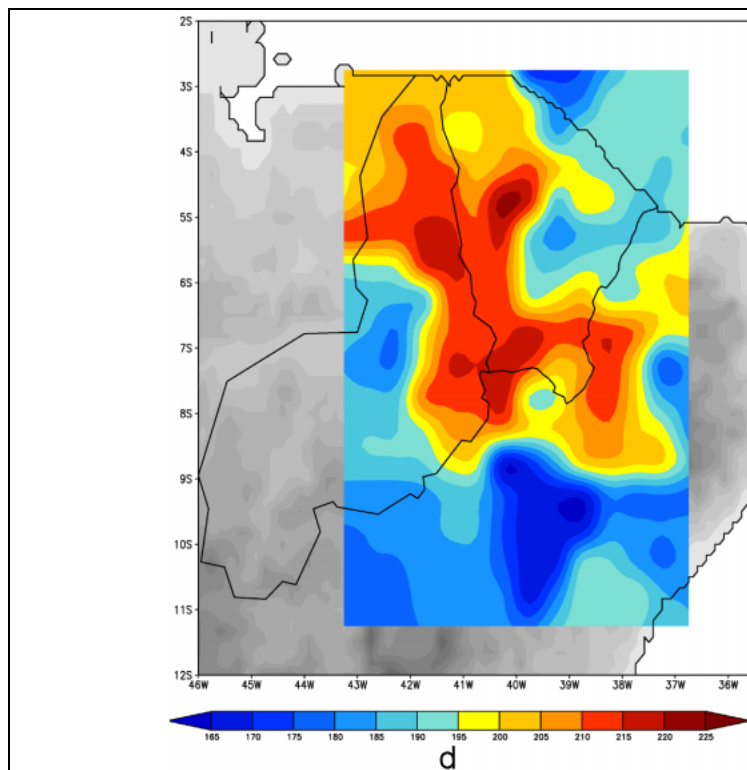
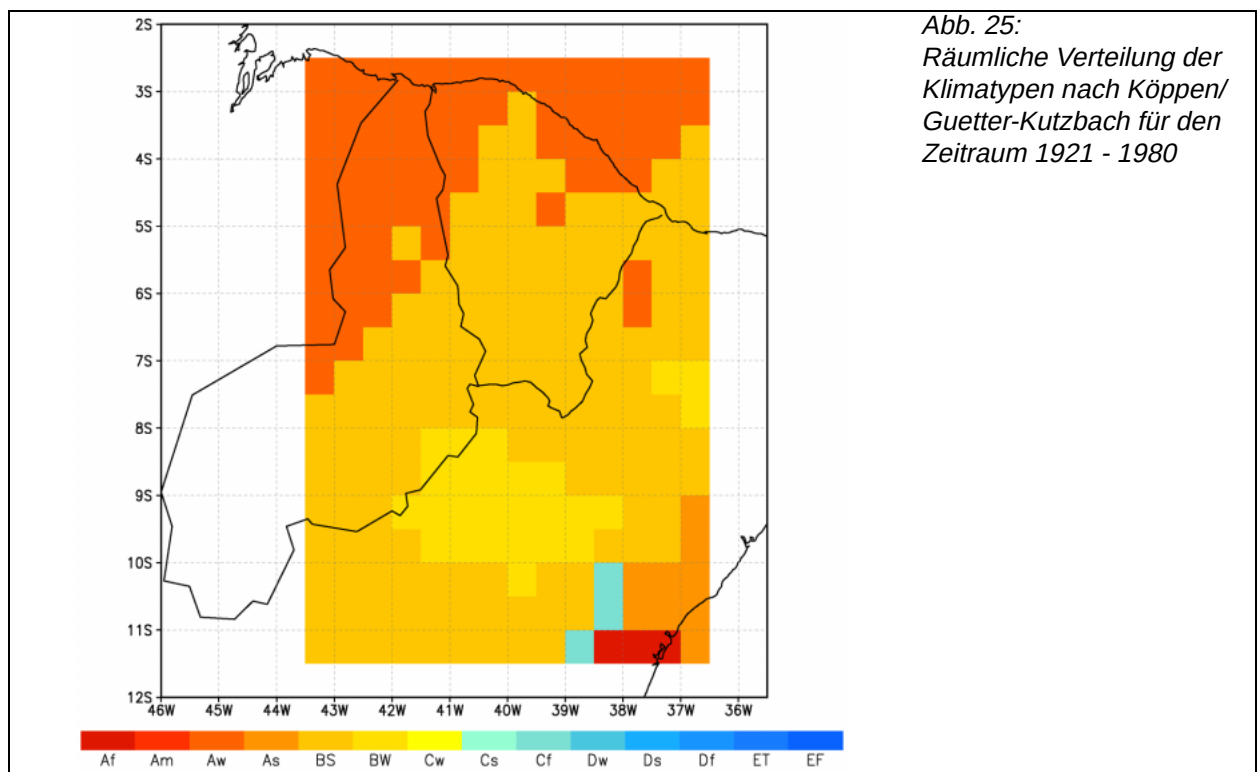
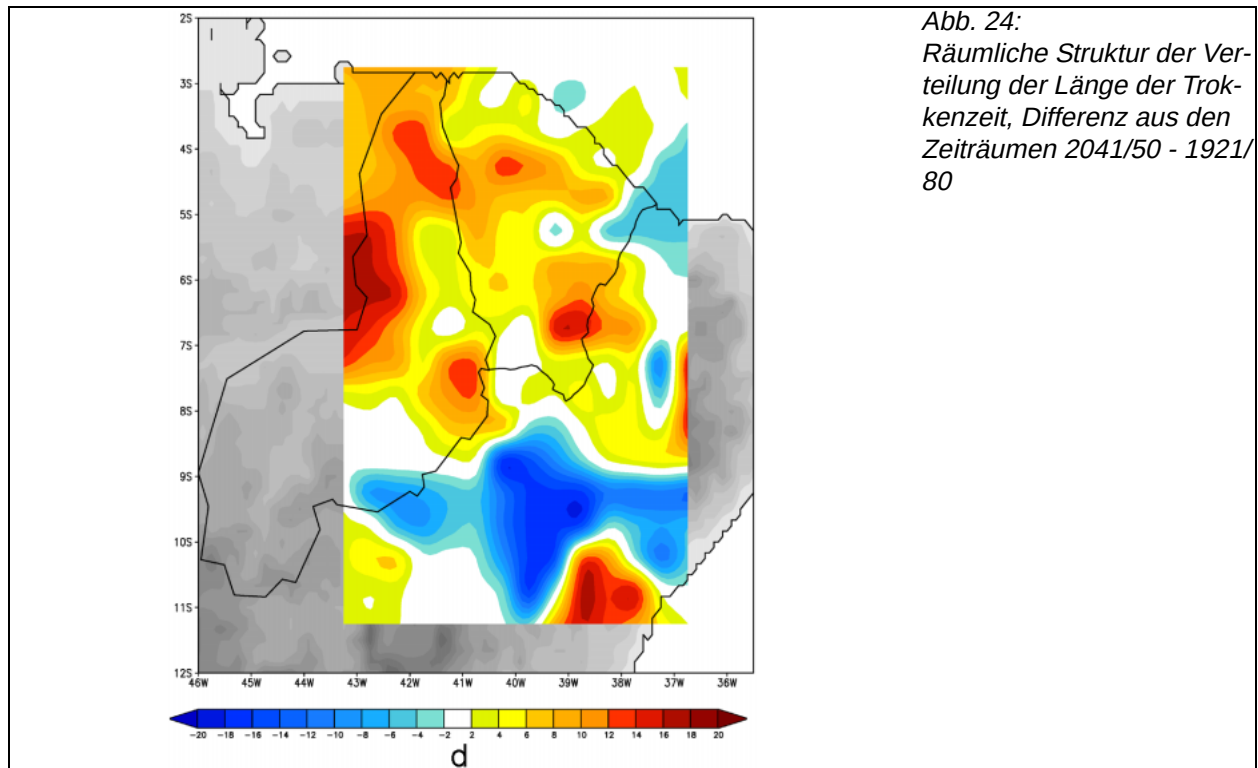


Abb. 23:
Räumliche Struktur der Ver-
teilung der Länge der Trok-
kenzeit, Mittel für den
Zeitraum 2041 - 2050



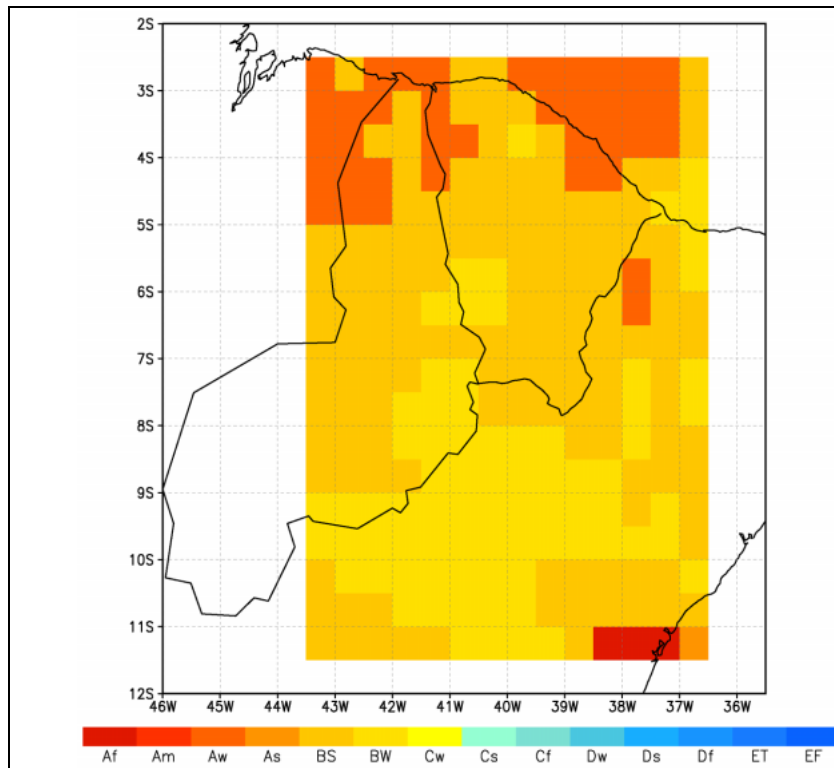


Abb. 26:
Räumliche Verteilung der
Klimatypen nach Köppen/
Guetter-Kutzbach für den
Zeitraum 2041 - 2050

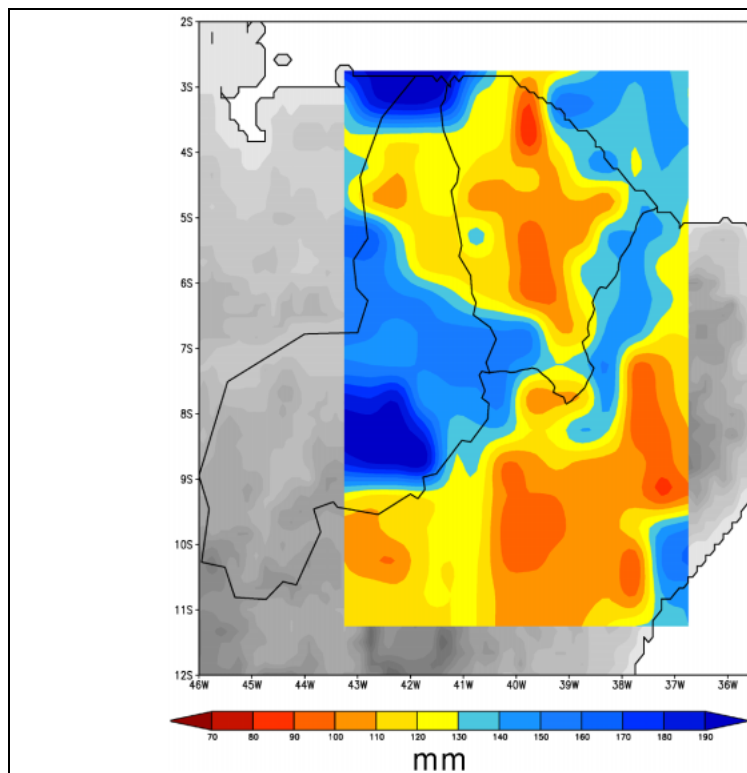


Abb. 27:
Räumliche Struktur des
natürlichen Extremwertbe-
reiches für die Tagessum-
men des Niederschlags,
Zeitraum 1921 - 1980

