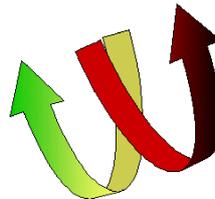


**WASSERVERFÜGBARKEIT SOWIE ÖKOLOGISCHE, KLIMATISCHE UND  
SOZIOÖKONOMISCHE WECHSELWIRKUNGEN IM SEMIARIDEN  
NORDOSTEN BRASILIENS**



**WAVES**

**Verbundprojekt WAVES  
Schlußbericht**

**Fachbereich Integrierte Modellierung**

Zuwendungsempfänger: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Projektleiter: Dr. M.S. Krol

Förderkennzeichen: 01 LK 9713

Vorhabenbezeichnung: Integrierte Modellierung der Wirkungskette von Klima, Wasserverfügbarkeit und Migrationsdynamik in Ceará und Piauí, unter besonderer Berücksichtigung von Rückkopplungen und räumlichen Variabilitäten und Szenarienanalysen.

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.1997 - 31.07.2001

Bearbeitung: Dr. M.S. Krol  
Dipl. Biophys. A. Jaeger  
Prof. Dr. A. Bronstert

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Vorhabens .....</b>	<b>2</b>
2.1 Einleitung und Fragestellung des Teilprojekts .....	2
2.2 Methodisches Vorgehen .....	2
2.3 Ergebnisse .....	4
2.3.1 Aufbau des integrierten Modells <b>SIM (Semi-arid Integrated Model)</b> .....	4
2.3.2 Modelle aus den anderen Fachbereichen und eigene Modellierung .....	9
2.3.3 Parametrisierungen und Datenbearbeitung .....	10
2.3.4 Anwendungen .....	11
2.3.5 Untersuchungen zu Skalierungsproblemen .....	16
2.3.6 Erstellung von integrierten Szenarien .....	18
2.4 Diskussion .....	19
2.5 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern .....	22
2.5.1 Workshops der deutschen Projektseite .....	22
2.5.2 Bilaterale Projektaktivitäten .....	22
2.6 Bibliographie.....	22
2.6.1 Eigene Publikationen.....	22
2.6.2 Zitierte Literatur .....	23
<b>3 Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung     und Ausblick .....</b>	<b>24</b>
<b>4 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind.....</b>	<b>25</b>
<b>5 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten .....</b>	<b>25</b>

## 1 Zusammenfassung

Das wichtigste Ergebnis des Fachbereichs Integrierte Modellierung ist das Modell **SIM** (**Semi-arid Integrated Model**). Es beschreibt dynamisch, systematisch und quantitativ die Wirkungskette von globalem Wandel, Wasserverfügbarkeit, Landwirtschaft und sozialen Vorgängen (hier insbesondere Migration) in den brasilianischen Bundesstaaten Ceará und Piauí.

Das Modell stellte eine konsistente Verknüpfung der Arbeiten der einzelnen Fachbereiche des WAVES-Projekts, die sich mit Prozeßbeschreibungen an der Makro- bzw. Mesoskala beschäftigen, dar. Verschiedene Module beschreiben das Klima, die wasserbezogenen Prozesse, die Landwirtschaft und die soziologischen und ökonomischen Themen. Die räumliche Auflösung ist das Munizip (insgesamt 332 Munizipien in Ceará und Piauí), die zeitliche Auflösung reicht von einem Tag bis zu einem Jahr, entsprechend der beschriebenen Prozesse. Es wurden Skalierungsfragen bearbeitet und Validierungs- sowie Sensitivitätsstudien durchgeführt.

Eine weitere Integrationsebene im WAVES-Projekt ist die Entwicklung von umfassend definierten, plausiblen, konsistenten und integrierten Szenarien der langfristigen Regionalentwicklung zur Analyse der Möglichkeiten von nachhaltigen Entwicklungen für die Nutzung von Boden und Wasser in Ceará und Piauí. In gemeinschaftlichen Arbeiten aller Projektgruppen wurden zwei Referenzszenarien erstellt, die verschiedene Bilder der möglichen zukünftigen Entwicklungen repräsentieren. Die Referenz- und Klimaänderungsszenarien konnten mit dem integrierten Modell SIM quantifiziert und damit die Folgen des globalen Wandels und der regionalen Politik in den Szenarien mit Hilfe von Indikatoren dargestellt werden.

### Summary

The main result of the discipline "Integrated Modelling" is the model **SIM** (**Semi-arid Integrated Model**). It gives a systematic and interdisciplinary description and quantification of the causal chain of global change, water availability, agriculture and social processes (specifically migration) in the Brazilian federal states of Ceará and Piauí.

The model is a successful and consistent linkage of disciplinary contributions in WAVES, working at the macro- / mesoscale. Different modular contributions describe climate, water related processes, agriculture and sociological and economic themes. The spatial resolution is the municipio (332 municipios in Ceará and Piauí), time resolution ranges from one day to one year, depending on the process described. Scaling issues were addressed and studies of validation and sensitivity performed.

Further integrative activity in WAVES is the development of consistent integrated scenarios for analysing a possible sustainable use of soil and water resources in Ceará and Piauí. In a joint action of all project partners, two reference scenarios were developed, covering different themes of possible future developments. The reference scenarios and climate change scenarios were quantified using the integrated model SIM, simulating the impacts of global change and regional policy and generating indicators of scenario implications.

## 2 Stand des Vorhabens

### 2.1 Einleitung und Fragestellung des Teilprojekts

Die Wasserverfügbarkeit stellt in den semiariden Regionen der Erde einen entscheidenden Faktor der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung dar. Unter Aspekten der globalen Änderungen kommt hinzu, daß auch vergleichsweise geringe Änderungen des Klimas eine deutliche Verschlechterung der Wasserverfügbarkeit bedeuten können und somit aufgrund der schon heute auftretenden Wasserknappheit erhebliche Auswirkung auf die natürlichen Potentiale und die gesellschaftlichen Bedingungen haben können.

Die Analyse dieses Zusammenhanges ist eine Vorbedingung zum Aufzeigen nachhaltiger Entwicklungspfade und stellt eine ausgesprochen multidisziplinäre Aufgabe dar. Für eine Problemanalyse und die Evaluierung möglicher Steuerungen ist eine problemorientierte Integration des vorhandenen Wissens erforderlich. Dabei berücksichtigt die Integration die wesentlichen Elemente der Kausalkette inklusive der Rückkopplungen.

Die Hauptziele dieses Teilprojekts sind die Formalisierung der Erkenntnisse der wichtigsten Prozesse und Zusammenhänge in einem integrierten Modell sowie die Analyse der gemeinsam vom Projekt erstellten integrierten Szenarien. Das integrierte Modell beschreibt dynamisch, quantitativ und geographisch explizit die Wirkungskette *globaler Wandel - Wasserverfügbarkeit - Lebensqualität - Migration* in den brasilianischen Bundesstaaten Ceará und Piauí. Das Modell beinhaltet Teilmodule der einzelnen Fachbereiche und kann verschiedene externe Randbedingungen berücksichtigen. Die erstellten Szenarien repräsentieren verschiedene Bilder der möglichen zukünftigen Entwicklungen.

In einer der wichtigsten globalen Studien über den Einfluß von Klimavariabilität auf die Landwirtschaft in tropischen semiariden Gebieten wird im Kapitel über den Nordosten Brasiliens geschlossen: „*there is evidently a lack of integrated climate – economy – society studies in Brazil. Given the magnitude of climatic impacts on the Brazilian economy and society, especially in Northeastern Brazil, research is recommended (..) that will lead to policies that increase resilience to drought*“ (Magalhães et al., 1988). Die Einschätzung von Auswirkungen möglicher politischer Eingriffe sowie die Analyse der Sensitivität auf globale Änderungsprozesse in Form von Szenarienstudien bilden prinzipielle Anwendungen der integrierten Studien.

### 2.2 Methodisches Vorgehen

Es wurde einer Modellierungs- und Integrationsstrategie gefolgt, die der anderer integrativer Studien im Global Change Bereich ähnelt, wie z. B. der des IMAGE Projektes (Alcamo, 1994). Ausgangspunkt der dynamischen integrierten Modellierung ist die Systemanalyse des Problems. Das Hauptergebnis der Vorphase war eine detaillierte Konzipierung des integrierten Modells. Dieses Konzept entstand aus einer systemtheoretischen Problemanalyse und enthält eine vorläufige Auflistung der dynamischen Prozesse, die im integrierten Modell beschrieben werden müssen; also derjenigen, die wichtig für die Problemstellung sind. Unterschieden werden dabei Prozesse, welche sich wechselseitig beeinflussen (interne Prozesse) bzw. Prozesse, die ebenfalls großen Einfluß auf das Systemverhalten haben, aber vom System selber kaum beeinflusst

werden (externe Prozesse). In Abbildung 1 ist die zugehörige Systemstruktur auf einer umfassenderen Ebene dargestellt.

Das Modellkonzept zeigt die zwei zentralen Schwerpunkte Wasser und Migration sowie die wichtigsten hypothetischen Zusammenhänge zwischen den beiden, die hauptsächlich über die Landwirtschaft verbunden sind.

Der Schwerpunkt Wasser ist in drei Aspekte aufgeteilt: physisches Angebot, Management inklusive Infrastruktur und tatsächliche Nutzung. In Abhängigkeit von den Klimavariationen sowie von dem Wassermanagement ändert sich das Angebot an natürlich vorkommendem Wasser und somit verschiedene Aspekte der Wassernutzung.

Auf der anderen Seite steht die Migrationsdynamik im Mittelpunkt, die stark durch Lebensqualität gesteuert wird. Die Lebensqualität setzt sich aus Indikatoren endogener Größen wie z. B. der Versorgung mit Trinkwasser oder auch der Beschäftigungssituation der Bevölkerung sowie extern beschriebener Größen (z. B. Technologieentwicklung) zusammen. Einen zentralen Verbindungspunkt zwischen diesen bildet die Landwirtschaft, die einerseits den dominanten Sektor der Wassernutzung darstellt und somit stark von der Wasserspeicherung sowohl im Boden als auch in den Aqüden abhängig ist und andererseits die Versorgung mit Nahrung und das Einkommen der ländlichen Bevölkerung sicherstellen soll.

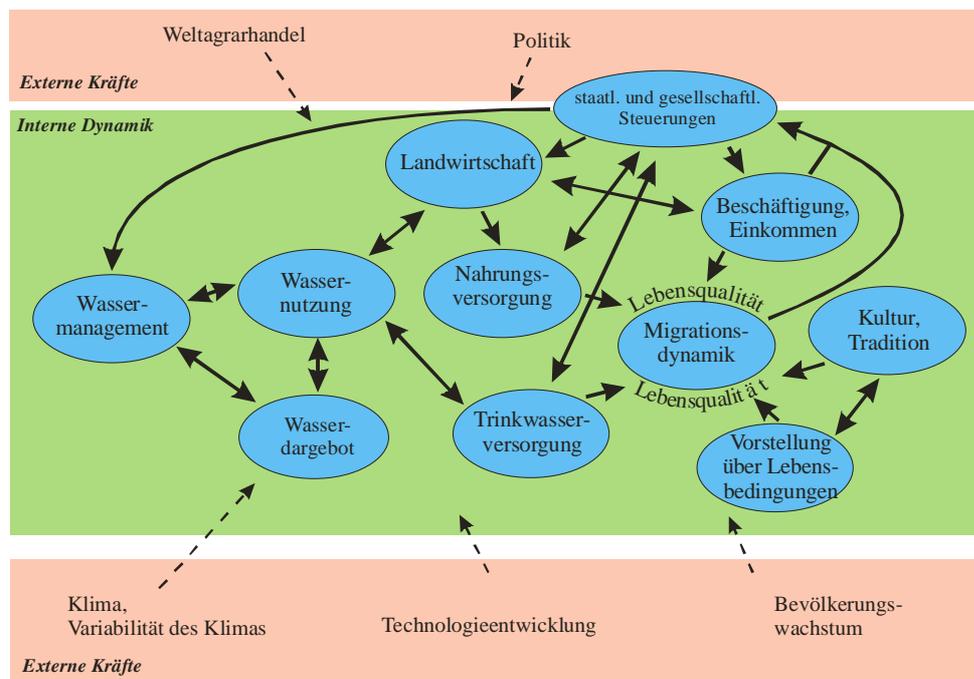


Abbildung 1: Systemanalyse der Zusammenhänge zwischen Wasserverfügbarkeit und sozialen Folgen.

Neben dieser Grobdarstellung wurden detailliertere Modellentwürfe vorbereitet, wobei die einzelnen Variablen sowie die wichtigsten abzubildenden Prozesse identifiziert wurden. Das Resultat waren eine Matrixdarstellung der Zusammenhänge und eine grafische Darstellung als ‚Spaghetti-Diagramm‘ (siehe Krol und Bronstert, 1997).

Zunächst wurde die Konzeptversion des Modells konkretisiert und eine Protoversion des integrierten Modells erstellt. Diese vorläufige Version enthält hypothetische Parametrisierungen der wichtigsten dynamischen Prozesse, die im Modell erfaßt werden müssen und bezieht sich auf die gesamte zu beschreibende Kausalkette und auf das gesamte Untersuchungsgebiet. Es

enthält aber keine räumliche Differenzierung. Mit dieser Protoversion konnte das oben beschriebene Modellkonzept getestet werden.

Im späteren Projektverlauf wurden die einfachen unvollständigen Prozeßbeschreibungen des Prototypmodells schrittweise durch detailliertere Teilmodule ersetzt, teilweise auch neue Module hinzugefügt. Diese Module konnten somit jeweils im Rahmen eines laufenden integrierten Modells getestet werden.

Bei dem Ausbau der Module wurde absichtlich darauf verzichtet, einen vorgeschriebenen gemeinsamen Modellierungsansatz zu benutzen. Aus Sicht der Systemanalyse ist es am wichtigsten, die spezifische Dynamik aller Systemteile und Systemzusammenhänge zu erfassen, mögliche einschränkende Modellierungsvorschriften wären dabei kontraproduktiv. Den Modellierungen gemeinsam ist der Fokus auf das dynamische Systemverhalten, was bei der Betrachtung von langfristigen Trends sowie der Reaktion auf Klimavariabilitäten von entscheidender Bedeutung ist.

Das Modell wurde zur räumlich differenzierten und zeitlich dynamischen Version des integrierten Modells (SIM) ausgebaut.

## 2.3 Ergebnisse

### 2.3.1 Aufbau des integrierten Modells **SIM** (**S**emi-arid **I**ntegrated **M**odel)

Das integrierte Modell SIM (Semi-arid Integrated Model) erfaßt die dynamischen Zusammenhänge des Kausalgeflechts Wasserverfügbarkeit - Landwirtschaft - Lebensqualität für die brasilianischen Bundesländer Ceará und Piauí.

Die 332 Munizipien der Bundesstaaten Ceará und Piauí dienen als gemeinsame räumliche Diskretisierungseinheit aller Module des integrierten Modells. Die zeitliche Auflösung reicht von einem Tag bis zu fünf Jahren entsprechend des zu beschreibenden Prozesses. Die Wahl der Skala bildet stets einen Kompromiß zwischen der feineren Skala, auf der man die einzelnen Prozesse versteht und auf der detaillierte Feldmessungen vorgenommen werden können und der gröbereren Skala, auf der die Ergebnisse aussagekräftig sind und auf der die raumdeckenden Sekundärdaten oft nur verfügbar sind.

Der Zeithorizont liegt in der Größenordnung von 50 Jahren.

Das Modell besteht aus 4 Hauptmodulen: einem klimatologischen (CLIMO), einem, das die wasserbezogenen Prozesse berücksichtigt (HYMO), einem das die landwirtschaftlichen und agrarökonomischen Aspekte beschreibt (LAMO), und einem Modul, das die soziokulturellen Zusammenhänge darstellt (SEMO). Diese Hauptteile wiederum bestehen aus Teilmodellen, die teilweise von anderen Teilprojekten entwickelt wurden und integrierenden Verbindungen, die eine konsistente Verknüpfung der Teilmodelle herstellen. Abbildung 2 zeigt die Einordnung der einzelnen Teile in die zuvor erarbeitete Systemstruktur.

Zusätzlich werden externe treibende Kräfte, wie z. B. Geburten- und Sterberaten oder auch Preisentwicklungen agrarökonomischer Produkte, berücksichtigt. Diese werden nicht im Modell errechnet, sondern gehen als Szenarien in die entsprechenden Teilmodelle ein. Diese Szenarien können dabei sehr umfangreichen detaillierten Studien entsprechen oder nur einfache Sensitivitätsanalysen sein.

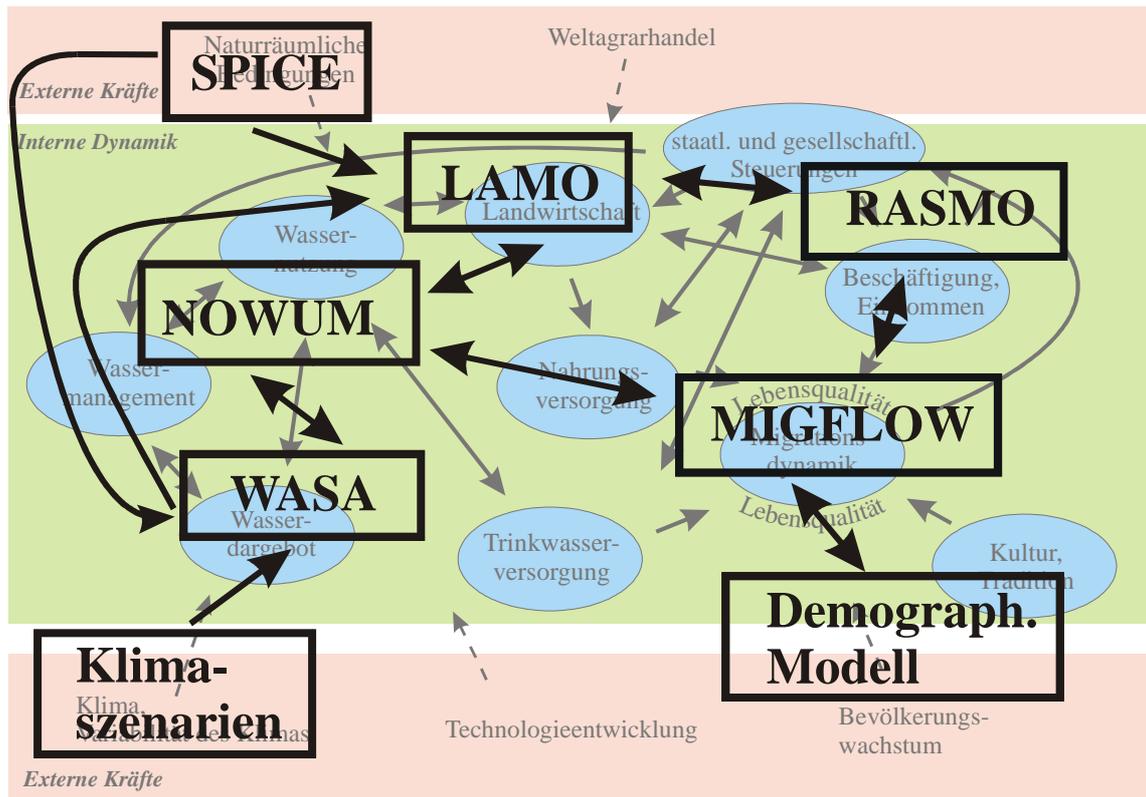


Abbildung 2: Einordnung der Teilmodelle (Vordergrund) in die zuvor erarbeitete Systemstruktur entsprechend der Abbildung 1(Hintergrund).

Nachfolgend werden die einzelnen Teilmodule kurz beschrieben.

### 2.3.1.1 CLIMO

Eine der wichtigsten treibenden Kräfte, der in WAVES betrachteten Prozesse, ist das Klima. Die Variabilität des Niederschlags, die sowohl räumlich als auch zeitlich, im untersuchtem Gebiet sowohl interannuell als auch innerhalb der Jahre, sehr groß ist, stellt eine beträchtliche Einschränkung für die menschlichen Aktivitäten dar.

Eine Rekonstruktion historischer Klimadaten für die 60-jährige Periode 1920-1980 und Simulationen für die Jahre 2001-2050 wurden vom Fachbereich Klimaanalyse/ -modellierung bereitgestellt. Sie umfassen die Variablen Niederschlag, Globalstrahlung, minimale und maximale Temperatur sowie die Windgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchte in täglicher Auflösung. Sämtliche Variablen sind auf die Munizipienschwerpunkte interpoliert. Temperatur und Niederschlag der historischen Rekonstruktion sind Ergebnisse einer Analyse der 89 verfügbaren Stationsdatensätze für Ceará, Piauí und Umgebung mit langjährigen täglichen Daten. Strahlung und relative Luftfeuchte wurden durch Regressionen ermittelt. Die Winddaten und der Niederschlag im Südosten des Untersuchungsgebietes wurden aus Monatsklimatologien (CRU) übernommen. In den Szenarien werden statistische Charakteristika der Rekonstruktion mit angenommenen großräumigen Klimatrends kombiniert. Diese Trends sind aus transienten Klimaänderungssimulationen von globalen Klimamodellen (ECHAM 4, HADCM 2) abgeleitet. Zusätzlich wurde ein Szenario ohne Klimaänderungen erstellt.

Die potentielle Evapotranspiration wird mit Hilfe der Gleichung von Penman-Monteith berechnet. In diese Berechnungen gehen die Klimagrößen Temperatur, relative Luftfeuchte, Nettostrahlung und Windgeschwindigkeit ein.

### 2.3.1.2 HYMO

Die Wasserverfügbarkeit ist eine der zentralen Themen im Projekt WAVES. Dabei sind sowohl Aspekte der physischen Wasserbilanz, als auch die Wassernutzung und das Wassermanagement von großer Bedeutung.

Das Modul besteht aus den Teilmodellen WASA (Model of Water Availability in Semi-Arid Environments), das die natürliche Wasserverfügbarkeit für die unterschiedlichen Wasserspeicher beschreibt und NoWUM (Nordeste Water Use Model), das die Wassernachfrage für die unterschiedlichen Nutzungssektoren berechnet.

Die direkte Kopplung von WASA und NoWUM erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Wassernutzungsarten den unterschiedlichen Wasserspeichern zugeordnet und anschließend die Abhängigkeit der tatsächlich entnommenen Wassermenge vom Wasserangebot und dem Bedarf beschrieben.

#### WASA

Die physische Wasserbilanz beschreibt die Wassermengen im Boden, in kleinen Açudes, in größeren Wasserspeichern, sowie in Flüssen, mit einer Auflösung von einem Munizip oder kleiner bei einem täglichen Zeitschritt. Die kleinsten rechnerischen Einheiten sind die Boden-Vegetationskomponenten, Teile der Munizipien, die bezüglich Bodenverhältnisse, Relief und Vegetation homogen sind. Diese Komponenten sind nicht räumlich explizit, sondern als Flächenanteile im Modell repräsentiert, wobei aber die relativen topographischen Positionen untereinander beschrieben sind.

Das Modell besteht aus einer Kombination von vertikaler Wasserbilanz auf der Ebene der Boden-Vegetationskomponenten, lateralen Prozessen an einer aggregierten Landschaftsebene, einem Übergang ins Flußnetz an der Munizipebene sowie einer Beschreibung des großräumigen Flußnetzes für das Gesamtgebiet von Ceará und Piauí.

Die vertikale Wasserbilanz wird durch hydrologisch homogene Flächen beschrieben und abhängig von Boden, Gefälle (aus der SPICE Datenbank) und Vegetation definiert. Für jede Boden-Vegetationskomponente werden Verdunstung, Infiltration, Bodenfeuchte, Versickerung und Abfluß berechnet. Sie gruppieren sich zu Landschaftseinheiten, die sich in Hochflächen, Hänge und Täler innerhalb der Teileinzugsgebiete gliedern. Hier befinden sich kleinere Açudes (Oberflächenwasserspeicher) unterschiedlicher Größen, die lateral miteinander verbunden sind. Auf dieser Ebene wird der Übergang des Abflusses in die Nebenflüsse beschrieben. Bis hierhin werden alle Simulationen im Modell nicht geographisch explizit gerechnet, sondern nur Flächenanteilen zugeordnet. Auf der Ebene des Munizips werden die Hauptflüsse und die größeren Wasserspeicher einzeln beschrieben. Eine Verbindung der Flüsse zwischen den Munizipien vervollständigt die physische Wasserbilanz.

#### NoWUM

Der gesamte Wasserbedarf setzt sich aus der Wassernachfrage in den unterschiedlichen Wassernutzungssektoren zusammen. In NoWUM werden Wasser für den Haushalt, die Tiere, die Bewässerung und Wassernutzung in Industrie und Tourismus auf Munizipebene beschrieben. Für jeden Wassernutzungssektor werden das Volumen der wassernutzenden Aktivitäten und die Nutzungsintensität bei einer zeitlichen Auflösung von 10 Tagen bis zu 1 Jahr kombi-

niert. Bei der Berechnung des Bewässerungswasserbedarfes wird ein Ansatz der FAO (FAO, 1992) benutzt. Entsprechend der Einteilung im Agrarzensus (IBGE 1998a, 1998b) werden verschiedene Tierarten betrachtet: Kühe, Schweine, Pferde, Esel, Kaninchen, Schafe, Ziegen, Hühner, Wachteln und zwei Maultierarten.

### Kopplung

Eine Kopplung der Berechnungen des physischen Wasserangebots und der Wassernachfrage sind aus zwei Gründen extrem wichtig:

Erstens dient diese Kopplung zur Beschreibung der Wassermenge, die von der verfügbaren Menge entnommen wird. Dadurch werden direkt die Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit stromabwärts und in der Zukunft berechnet. Für diese Kopplung ist eine Zuordnung von Wassernutzungssektoren an den unterschiedlichen verfügbaren Wasserspeicher erforderlich. Eine solche Zuordnung wird in einer Zuordnungstabelle beschrieben. Diese beschreibt, welche Teile des benötigten Wassers aus welchen Speichern (kleinen und großen Açudes, Flüsse, verschiedene Grundwasserarten) entnommen werden.

Ein zweiter Kopplungsgrund ist der Einfluß der Wasserverfügbarkeit auf die Nutzung. Wenn die Wasserverfügbarkeit die Nachfrage nicht mehr oder kaum noch abdecken kann, wird sich die Intensität der Nutzung ändern. Die entnommene Wassermenge bestimmt sich somit aus dem Bedarf und wird je nach beschriebenem Sektor unterschiedlich stark reduziert, falls die vorhandene Menge an Wasser den Bedarf der nächsten Zeit nicht ausreichend deckt, wobei die Trinkwasserversorgung zuletzt und möglichst am wenigsten reduziert wird. Dieses entspricht sowohl den Erfahrungen im Feld als auch den gesetzlich festgelegten Richtlinien (in Ceará).

### 2.3.1.3 LAMO

Die Landwirtschaft spielt in der Fragestellung von WAVES eine verbindende Rolle zwischen Wasserverfügbarkeit und Lebensqualität. Die Wasserverfügbarkeit stellt einen sehr wichtigen limitierenden Faktor in der Landwirtschaft dar. Sowohl der Regenfeldbau als auch der Bewässerungsanbau sind direkt oder abgedämpft (wenn das Wasser in den Açudes gespeichert wird) in großem Maße vom Niederschlag abhängig. Neben den Niederschlagsbedingungen haben die Böden und die Anwendung verschiedener Produktionsmethoden einen großen Einfluß auf die Erträge. Die Produktion bestimmt stark den ökonomischen Erfolg der Landwirtschaft und damit das Einkommen der Landwirte, die Beschäftigung der Lohnarbeiter, aber auch die Nahrungssicherung der Subsistenzlandwirte.

### CROP YIELD

Potentielle landwirtschaftliche Erträge werden im integrierten Modell nach einer von der FAO entwickelten Methode (FAO, 1979) berechnet. Es werden für 4 phänologische Perioden des Pflanzenwachstums die Restriktion der Wasserverfügbarkeit (spezifischer: aktuelle Verdunstung) mit der typischen Sensitivität der Pflanze in diesen Perioden kombiniert, woraus sich aufgrund der Wasserlimitierung ein relativer Ertragsverlust ergibt. Die im integrierten Modell simulierten Pflanzen sind: Bananen, Kokosnüsse, Tomaten, Kaju, Baumwolle, Mango, Cassava, Gras, Melonen, Bohnen, Zuckerrohr, Mais und Reis. Die benötigten Modellparameter wurden mit Hilfe des detaillierteren Modells EPIC bzw. nach der ITC/LSC-Methode abgeleitet. Die aktuelle Verdunstung wird aus WASA für Hydrotone mit landwirtschaftlicher Nutzung übernommen. Der Einfluß der Bodenqualität auf den Ertrag ist dabei nur teilweise erfaßt, d.h. der Einfluß der Bodenqualität auf den Bodenwasserhaushalt wird durch eine Tabelle, die den Einfluß der Bodenqualität auf den Maximalertrag ohne Wasserrestriktion darstellt, repräsentiert.

Außerdem werden die physischen Bodeneigenschaften in WASA, also bei der Berechnung der Wasserverfügbarkeit, mit einbezogen. Es werden verschiedene Anbaumethoden, die sich durch den Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden und bewässert/unbewässert unterscheiden, berücksichtigt.

#### RASMO

Die Agrarökonomie stellt im Modell die Schaltstation zwischen den rein naturräumlichen Potentialen und der Nutzung dieser Potentiale und damit den wichtigsten Indikatoren für die Lebensqualität der ländlichen Bevölkerung dar. Die agrarökonomischen Simulationen werden in zwei Schritten durchgeführt:

Erstens erfolgt eine Einkommensoptimierung. Sie beschreibt, wie die Landwirte unter durchschnittlichen klimatologischen Bedingungen und unter Berücksichtigung einer Reihe von Restriktionen, wie z. B. der Zahl der Arbeitskräfte oder der vorhandenen Ackerfläche, am besten den Anbau von Feldfrüchten auf ihren Flächen einrichten könnten.

Zweitens wird in einem "Realisierungsmodus" für jedes Jahr simuliert, wie bei gegebener Landnutzung die zufällig auftretenden Wetterbedingungen sich auf das Betriebsergebnis und den dadurch bestimmten Indikatoren, wie Beschäftigung und Nahrungsversorgung, auswirken.

Der Agrarsektor wird auf kommunaler Ebene dargestellt, wobei kleine, mittelgroße und große Betriebsklassen unterschieden werden. Jede Betriebsgrößenklasse hat im Optimierungsmodell die Möglichkeit, Produktionsverfahren wie den Anbau verschiedener Nutzpflanzen und Tierhaltung einzusetzen. Für jedes Produktionsverfahren werden die Kosten, der Geldgewinn, der benötigte Arbeitseinsatz und der Futterbedarf berechnet. Restriktionen ergeben sich durch die verfügbaren Anbauflächen, die verfügbaren Futterprodukte, die verfügbare Mechanisierung und die Selbstversorgung, die stets vorrangig bedient wird. Das Betriebsergebnis hängt von den Produktverkäufen (jene Produkte, die nicht als Nahrung oder Futter verwendet wurden) und Produktionskosten, inklusive dem Arbeitseinsatz von Nicht-Familienmitgliedern, ab. Viele der sonstigen Parameter werden nicht dynamisch im integrierten Modell beschrieben, sondern gehen als Szenarien in das Modell ein. Dabei scheint ein Zeitschritt von 10 Jahren für das Auftreten von signifikanten Änderungen bezüglich der Entscheidung von Landnutzungen angebracht. Das Betriebsergebnis bei tatsächlich aufgetretenem Klima wird jährlich simuliert. Dabei werden die Anbauflächen der unterschiedlichen Produktionsverfahren aus dem Optimum übernommen. Wenn der Landwirt sich entscheiden soll, ist es noch unklar, wie hoch der Niederschlag sein wird. Die zufällig, also durch die vorgegebenen Klimaverhältnisse, auftretenden Erträge werden von LAMO ermittelt und fließen in die Berechnungen des Betriebsergebnisses (ohne nachträgliche Optimierung) ein.

#### SPICE

Bodenkundliche und geomorphologische Informationen für die beiden Bundesstaaten sind in einer flächendeckenden Bodendatenbank erfaßt, die verschiedenen Anwendungen, z. B. zur Erfassung der standortsbedingten Abflußbildung oder Produktionspotentiale dient. Das Bodeninformationssystem SPICE (Soil and Terrain Information System for the states of Piauí and Ceará) wurde entsprechend des SOTER-Ansatzes (Soil and Terrain Digital Database, FAO, 1993) entwickelt, d.h., daß die Landschaft nach topographischen und bodenkundlichen Gesichtspunkten hierarchisch strukturiert wird.

Als Basis dienen verschiedene Karten, die bodenkundliche Profilangaben sowie Informationen über Gefälle, Lage und Flächenanteile von Bodentypen und Bodengesellschaften innerhalb von Toposequenzen in der Landschaft enthalten. Auf gesamtstaatlicher Skala werden ca. 350 Landschaftseinheiten mit ca. 620 Geländekomponenten und 1150 Bodenkomponenten unterschieden

#### 2.3.1.4 SEMO

Der sozioökonomische und soziokulturelle Teil des Modells erweitert zunächst den agroökonomischen Blick auf die Gesellschaft zu einer kompletteren Beschreibung der Lebensbedingungen. Das geschieht größtenteils über szenariospezifizierte Annahmen für Variablen, die einen wichtigen Einfluß auf die Lebensqualität haben. Abhängig von dieser Lebensqualität wird eine Tendenz zur Abwanderung abgeleitet. Diese Migration ist einer der dynamischen Prozesse des demographischen Modells, das die Bevölkerungsentwicklung eines bestimmten Gebietes beschreibt.

#### MIGFLOW

Das Migrationsmodell MIGFLOW errechnet die Anzahl der Migranten pro Munizip in jährlichen Zeitschritten. Als Kriterium hierfür dient der Unterschied in der Lebensqualität zwischen den Munizipien (in Ceará und Piauí und einem zusätzlichem Migrationsziel außerhalb der beiden Staaten) und die Entfernung zwischen den Munizipien und den daraus resultierenden Kosten der Migration. Wenn die Differenz der Lebensqualitäten die Migrationskosten übertrifft, wird ein linear davon abhängiger Migrationsfluß simuliert. So entsteht Migration zwischen Paaren von Munizipien. Mögliche Nothilfeprogramme, die in Jahren mit schlechten Erträgen durchgeführt werden, werden berücksichtigt.

Die Lebensqualität wird in Abhängigkeit vom Pro-Kopf-Einkommen und der Gesundheitsversorgung (auf Basis des Gesundheitsbudgets) errechnet.

#### Demographisches Modell

Das demographische Modell beschreibt die Bevölkerungsentwicklung, aufgelöst nach Alter, Geschlecht und Familientyp. Die Familientypen sind stark mit den Betriebstypen in RASMO gekoppelt und ermöglichen somit die Einbindung in die Agrarökonomie. Dabei werden die unterschiedlichen dynamischen Prozesse (Fertilität, Mortalität, Migration) explizit abgebildet. Trends in den altersabhängigen Fertilitäts- und Mortalitätsraten werden szenarioabhängig vorgeschrieben. Die Migration wird aus dem Regressionsmodell übernommen.

### 2.3.2 Modelle aus den anderen Fachbereichen und eigene Modellierung

Die Entwicklung des integrierten Modells erfolgte projektübergreifend. Dabei spielen Modellierungsbeiträge verschiedener Projektgruppen sowie deren Vortrags- und Diskussionsbeiträge bei den Projektworkshops bezüglich Integrierter Modellierung (Dezember 1997, Januar 1999) eine sehr große Rolle. Deshalb scheint es sinnvoll, in einer Kurzübersicht (Tabelle 1) zu erläutern, welche Arbeiten am Modell von der Teilprojektgruppe selbst gemacht worden sind und welche Arbeiten auf Zuarbeiten aus dem Projekt zurückzuführen sind.

CLIMO	Klimadaten und -szenarien	PIK – Klima
	Verdunstung	PIK – Integrierte Modellierung
HYMO	Modellierung WASA	PIK – Hydrologie / UFC – Hydraulik
	Definition, geographische Verschneidungen von Hydrotopen, Parametrisierungen	PIK – Integrierte Modellierung
	Modellierung NoWUM	GhKassel – Wassernutzung
	Kopplung WASA mit NoWUM	PIK – Integrierte Modellierung
LAMO	Implementierung CROP YIELD	PIK – Integrierte Modellierung
	Kalibrierungsdaten EPIC bzw. ITC/LSC-Methode, Einfluß Bodenqualität	Uni-Hohenheim – Bodenkunde / Pflanzenwachstum / UFC – Pflanzenbau
	Optimierungsmodell RASMO	FH-Köln
	Realisierung der Agrarökonomischen Ergebnisse	PIK – Integrierte Modellierung
	Bodendatenbank SPICE	Uni-Hohenheim – Bodenkunde (Zuarbeiten PIK-Hydrologie/Integrierte Modellierung)
SEMO	Lebensqualitätsindikator	GhKassel – Soziokulturelle Analyse
	Migrationsregression	GhKassel – Soziokulturelle Analyse
	Demographisches Modell	GhKassel – Soziokulturelle Analyse / PIK – Integrierte Modellierung / UFC – Integrierte Modellierung

Tabelle 1: Teilmodelle des integrierten Modells und die zugehörigen Gruppen.

### 2.3.3 Parametrisierungen und Datenbearbeitung

Vorbedingung für ein erfolgreich arbeitendes integriertes Modell ist nicht nur eine gute und bilanzierte Darstellung der wichtigsten dynamischen Prozesse, sondern auch die Verfügbarkeit einer deckenden Datengrundlage. Im Projekt WAVES beschäftigen sich fast alle Forschungsgruppen mit räumlicher Datenverarbeitung. Auch innerhalb des Teilprojekts Integrierte Modellierung sind solche Arbeiten durchgeführt worden.

Die räumlichen Datenarbeiten im Teilprojekt fokussierten auf zwei Teilaufgaben: Parametrisierungen und die geographische Definition von Hydrotopen. Beide sind für die Teilmodelle WASA und für LAMO und deren Verbindung notwendig und flossen in SPICE ein. Die Arbeiten wurden im Rahmen einer räumlichen Datenanalyse aufgerasterter Daten mit Hilfe von Arc/Info in genauer Absprache mit den anderen Projektgruppen (insbesondere AG Landschaftsökologie und Uni-Hohenheim) durchgeführt.

Die kleinsten Diskretisierungseinheiten der SOTER-Daten sind eine Kombination von Bodenfamilien bzw. Typen morphologischer Erscheinungen (SOTER-Einheiten), die sich aufgrund genetischer Eigenschaften zu Landschaftstypen ergänzen. Der Name SOTER ist auf die Kombination Soil und Terrain zurückzuführen. Diese Einheiten wurden innerhalb des Geographischen Informationssystems den anderen vorliegenden räumlichen Daten wie Munizipien, Teileinzugsgebiete und Flußnetz geometrisch angeglichen und mit diesen verschnitten.

Außerdem konnte der Flächenanteil von Bodentypen innerhalb dieser Diskretisierungseinheiten quantifiziert und in das GIS eingearbeitet werden (ESRI, 1993).

Die Parametrisierungsarbeiten beinhalteten die Ableitung von hydrologischen sowie physisch-geographischen Parametern wie Flußnetz, Teileinzugsgebiete oder Hangneigungsklassen für Ceará und Piauí aus einem Digitalen Geländemodell (DGM) (ESRI, 1993; von Werner, 1995; USGS, 1996). Ein wichtiger Schritt war die Konvertierung dieser Daten von einem gleichmäßig aufgerasterten Datensatz (1 km Kantenlänge der Pixel) auf die municipale Ebene als kleinste

Diskretisierungseinheiten innerhalb des integrierten Modells. Das Flußnetz im Modell ist z. B. auf Munizipebene definiert. Jedem Munizip wird ein Hauptvorfluter zugeordnet. Die laterale Konnektivität zwischen den Munizipien wird durch ein Dendrogramm (Fließbaum) definiert. Dieser Baum stellt die geographische (räumlich-laterale) Kopplung der Wasserverfügbarkeit von Fließgewässern in der Region dar, und ist damit eine der wichtigsten im Modell abgebildeten räumlichen Kopplungen (Laurini & Thompson, 1992; van Deursen, 1995; von Werner, 1995). Als Beispiel faßt Abbildung 3 die verschiedenen Schritte bei der Herleitung der Parameter für das Abflußroutine im Gewässernetz zusammen.

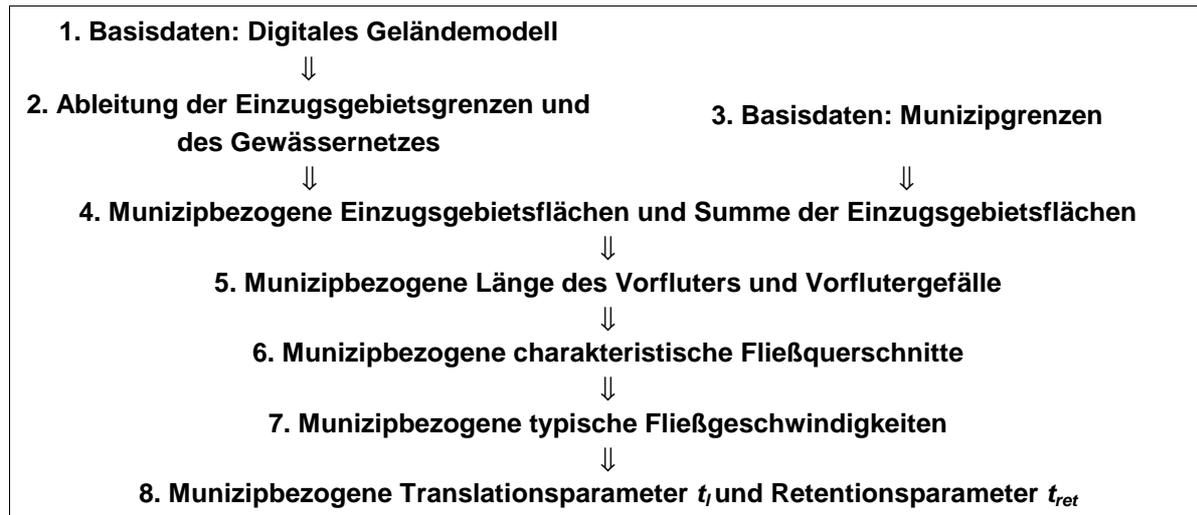


Abbildung 3: Arbeitsschritte bei der Ableitung der Parameter für das Abflußrouting.

### 2.3.4 Anwendungen

Zur Abschätzung der Aussagekraft und Belastbarkeit des Modells, wurden Validierungen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Als weitere Anwendungen von SIM wurde die Sensitivität vom Nordosten Brasiliens für Klimaänderung betrachtet und Referenzszenarien der Regionalentwicklung sowie Interventionsvarianten dieser Referenzszenarien gerechnet.

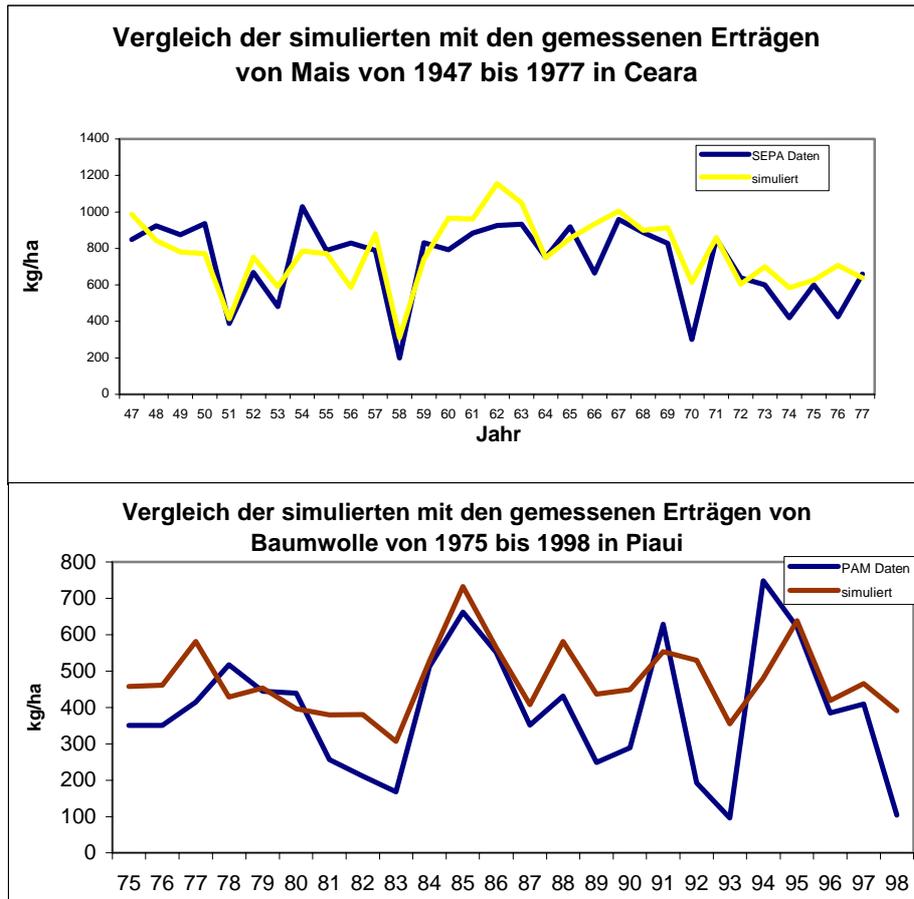
Nachfolgend sind exemplarisch einige Ergebnisse zusammengestellt.

Beispiele für Modellergebnisse zur Validierung sind in Abbildung 4 zu sehen. Hierbei werden die Simulationen der jährlichen Erträge von Mais in den Jahren 1947–1977 in Ceará und Baumwolle in Piauí (1975-1998) mit entsprechenden Daten (IPLANCE 1996, IBGE ) verglichen (Abbildung 4a). Die schlechtere Übereinstimmung in Piauí ist insbesondere auf eine grobe Extrapolation der Niederschläge auf Grund fehlender Meßdaten und schlechteren Bodeninformationen zurückzuführen. Ertragsverschlechterungen durch Einflüsse von Krankheiten und ähnlichem werden nicht erfaßt, wodurch einzelne Jahre überschätzt werden können.

Ein weiteres Beispiel zur Modellvalidierung an Hand gemessener Abflüsse am Pegel Peixe Gordo (Rio Jaguaribe) zeigt Abbildung 4b.

Das Abflußvolumen, die zeitliche Verteilung im Jahr sowie die interannuelle Variabilität werden überwiegend gut wiedergegeben.

a)



b)

**Monatlicher Abfluß am Pegel Peixe Gordo, Rio Jaguaribe 1962-1981**

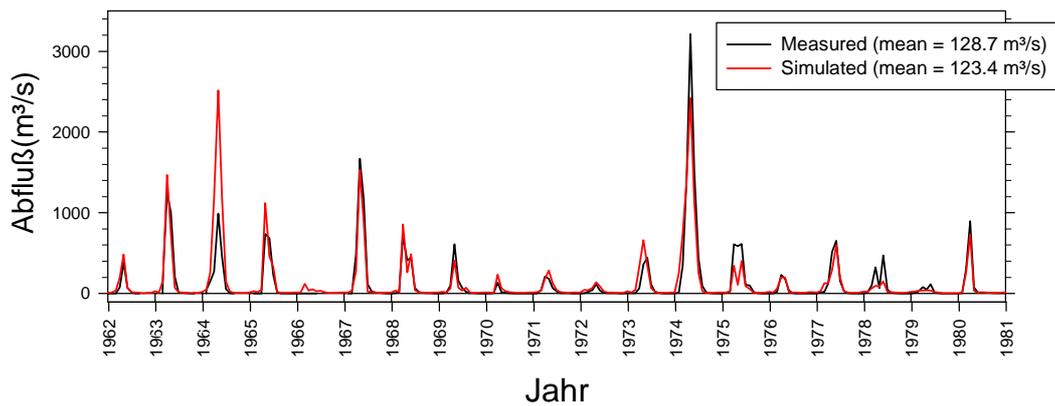


Abbildung 4: Beispiele zur Modellvalidierung: a) Vergleich jährlicher landwirtschaftlicher Erträge mit entsprechenden Daten für Ceará bzw. Piauí b) gemessene und modellierte monatliche Abflüsse am Pegel Peixe Gordo, Rio Jaguaribe für die Periode 1962-1981

Es wurden Simulationen zur Analyse des Modellverhaltens durchgeführt (Abbildung 5 und 6). Abbildung 5 demonstriert den Einfluß der Kopplung des Wassernutzungsmodells NoWUM mit dem die natürlichen Wasserressourcen beschreibendem Modell WASA. Gezeigt wird der summierte mittlere Füllstand aller kleineren Açudes im Munizip Iguatú im Jahr 1980. Es werden die Rechnungen der gekoppelten Version mit denen der ungekoppelten verglichen. Das Ausgangsvolumen wurde in beiden Simulationen Null gesetzt. Wie zu erwarten ist, sinkt das Volumen des Wassers in der die Wassernutzung berücksichtigenden Version stärker.

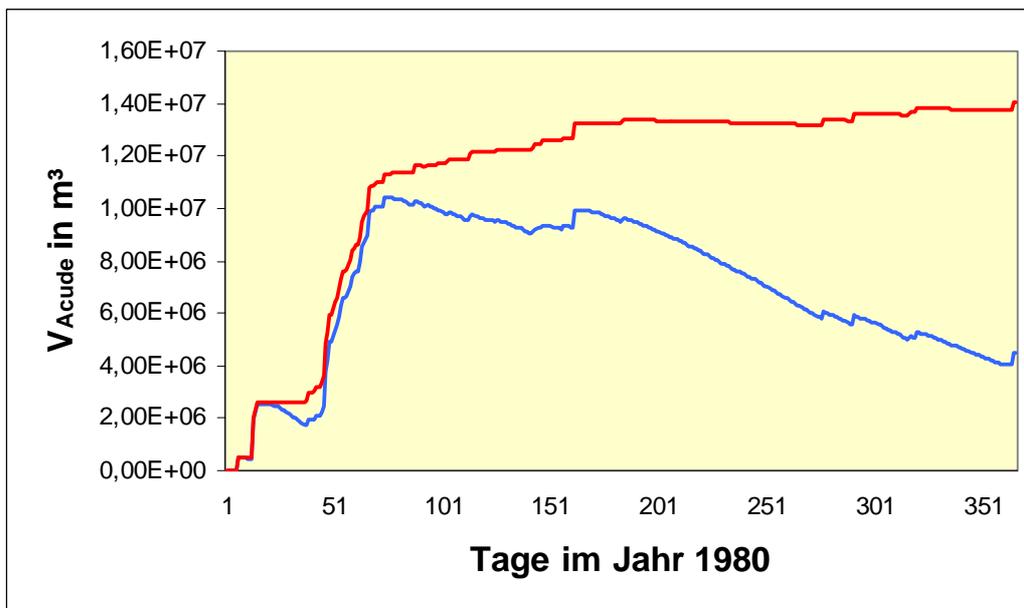


Abbildung 5: Füllstand kleiner Açudes im Munizip Iguatú mit (blau) und ohne (orange) Kopplung des Wassernutzungsmodells NoWUM und dem die natürlichen Wasserhältnisse berechnenden WASA

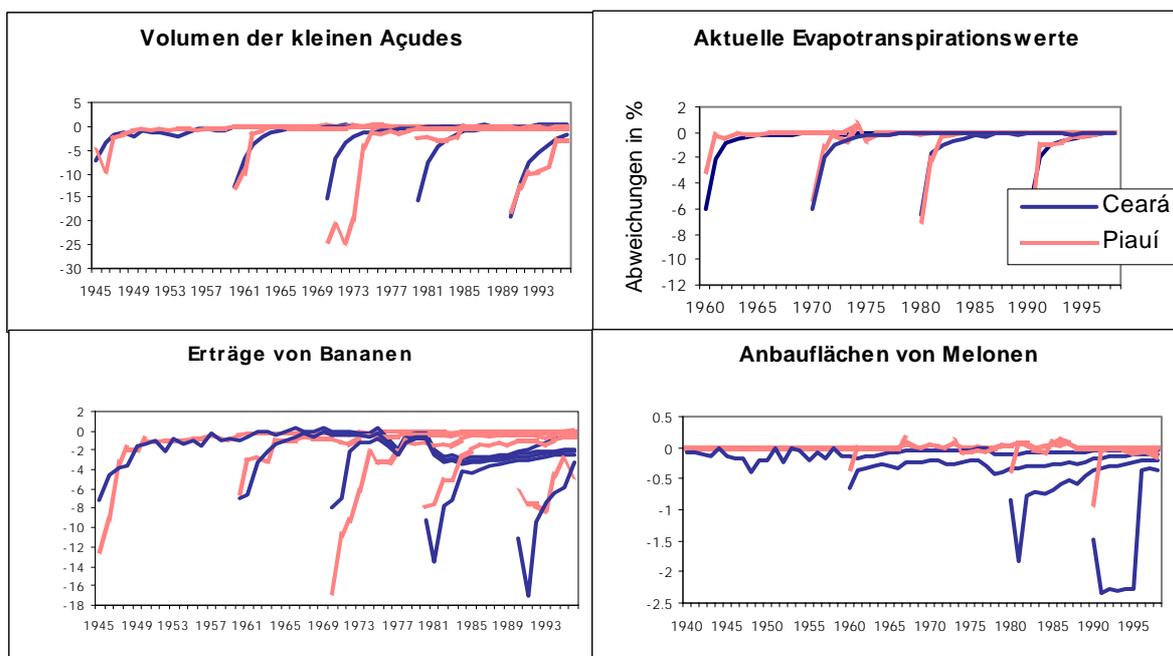


Abbildung 6: Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung verschiedener Variablen von den Anfangsbedingungen. Vergleich der zu unterschiedlichen Zeitpunkten gestarteten Simulationen mit einem Modellauf von 1921-1996

In Abbildung 6 wurden zu verschiedenen Zeiten mit jeweils gleichen Anfangsbedingungen für die nicht klimatischen Variablen Simulationen gestartet und mit einem entsprechenden Modelllauf, der die vollständige zur Verfügung stehende historische Klimarekonstruktion erfaßt verglichen wurde. Die sich verringern den Fluktuationen geben einen Hinweis auf die Stabilität des Systems. Die verschiedenen Variablen reagieren unterschiedlich robust.

Untersuchungen zu Modellsensitivitäten für Klimaänderungen wurden mit 2 verschiedenen Klimaszenarien, die von globalen Klimamodellen (ECHAM 4, HADCM 2) abgeleitet worden sind, bzw. einem Szenario ohne Klimaänderungen durchgeführt.

Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 7. Es ist das Volumen des gesamten zum Ende der Regenzeit in den großen Stauseen gespeicherten Wassers über 50 Jahre zu sehen. Dieses wird benötigt, um die nachfolgende Trockenzeit und eventuelle Dürrejahre zu überstehen. Drei verschiedene Klimaszenarien wurden getestet. Der große Anstieg des Volumens zu Beginn wird durch die Fertigstellung des Stausees Castanhão verursacht. Bei der Simulation mit dem auf ECHAM4 basierenden Klimaszenario tritt als Folge einer Abnahme der Jahresniederschläge um etwa ein Viertel zwischen Basis- und Szenarioperiode bei annähernd unveränderten Werten der potentiellen Verdunstung eine drastische Reduktion der Wasserressourcen somit des gespeicherten Wasservolumens auf. Diese klimatischen Einflüsse sind ab 2030 erkennbar und werden später signifikant größer als die Variabilität. Im HADCM2 Szenario sind trotz der angenommenen Niederschlagszunahme keine größeren Änderungen im gespeicherten Wasservolumen, verglichen mit dem Szenario ohne Klimaänderungen, sichtbar.

Ein weiteres Beispiel der Auswirkungen der verschiedenen Klimaszenarien ist in Abbildung 8 dargestellt. Es zeigt, daß die Niederschlagsänderungen in den Szenarien große Auswirkungen auf die munizipienbezogene räumliche Verteilung der jährlichen mittleren Erträge haben.

Der Trend im Maisertrag für 2001-2050 zeigt für das Klimaszenario, in dem der Niederschlag sich insgesamt verringert, einen starken Rückgang der Erträge insbesondere im Süden Cearás, entlang des Rio Jaguaribe, sowie im Südosten Piauí's. Für das mit HADCM2 abgeleitete Szenario ergeben sich leichte Zunahmen, vorrangig im Norden des Untersuchungsgebietes.

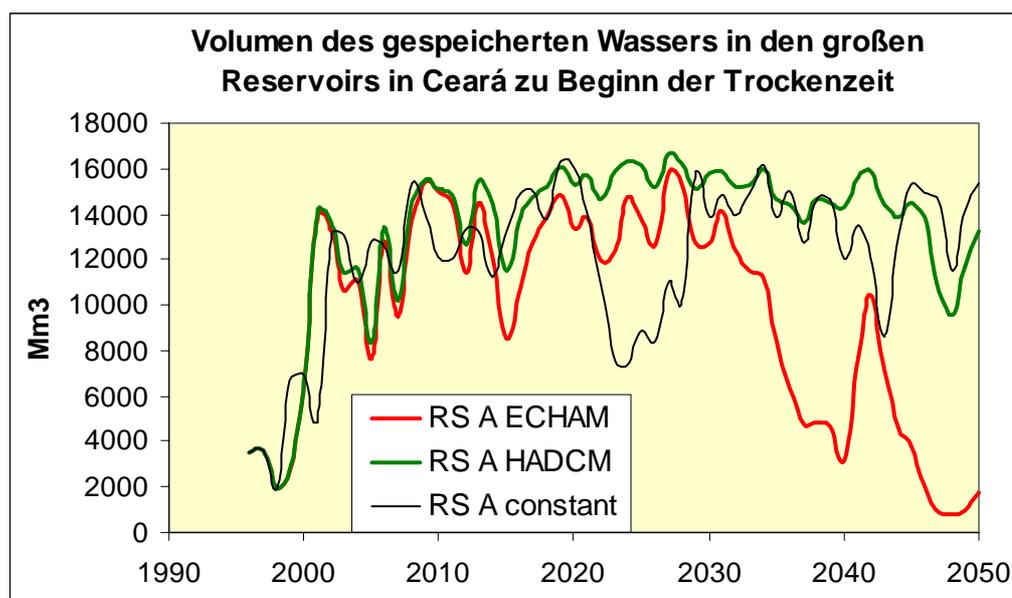
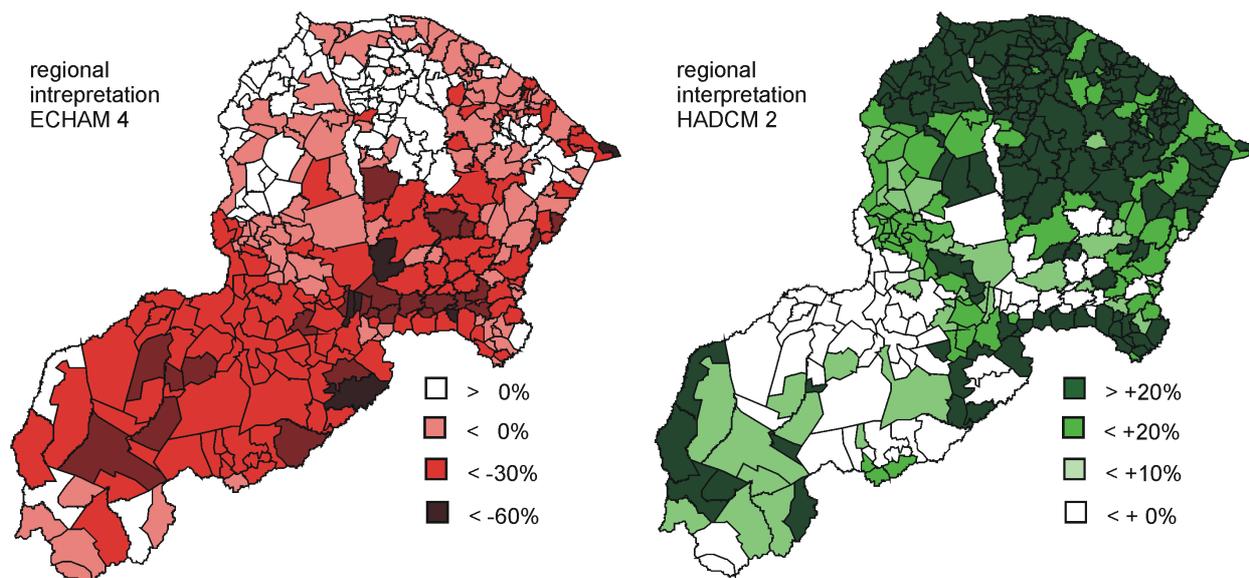


Abbildung 7: Änderung des in den großen Stauseen gespeicherten Wasservolumens von 1996-2050 unter dem Einfluß verschiedener Klimaszenarien



Die in WAVES entwickelten Referenzszenarien der Regionalentwicklung wurden mit Hilfe des integrierten Modells analysiert und verglichen. Unterschiede der Entwicklung der Migration im Globalisierungsszenario (A) und dem mehr auf Dezentralisierung ausgerichteten Szenario B sind in Abbildung 9 zu sehen. Die modellierte Migration wird durch Einkommensdefizite angetrieben. Die große Variabilität, also hohe Migration in den Jahren mit geringeren Niederschlägen, bleibt in beiden Szenarien erhalten. Sie verringert sich, wenn man die vom Staat in Dürre Jahren vorgenommenen Nothilfeprogramme berücksichtigt. Da in der Kalibrierung des Migrationsmodells vor allem die räumlichen Muster der Migration und die kumulative Migration über die Periode 1991-1996 betrachtet wurde, ist die simulierte jährliche Variabilität nicht belastbar. Das Migrationsmodell erfaßt nur einen Teil der Prozesse, zeigt aber aussagekräftig, wie sich laut diesem Teilverständnis die Migration in den Referenzszenarien entwickelt. Die Summierung zeigt nur geringfügig höhere Werte für Szenario A, in dem, durch verstärkte Förderung einiger Regionen und verstärktem Anbau von Cash Crops, die Einkommensdefizite größer sind.

Für weitere Anwendungsbeispiele und ausführlichere Erläuterungen sei auf die beigelegten Publikationen verwiesen.

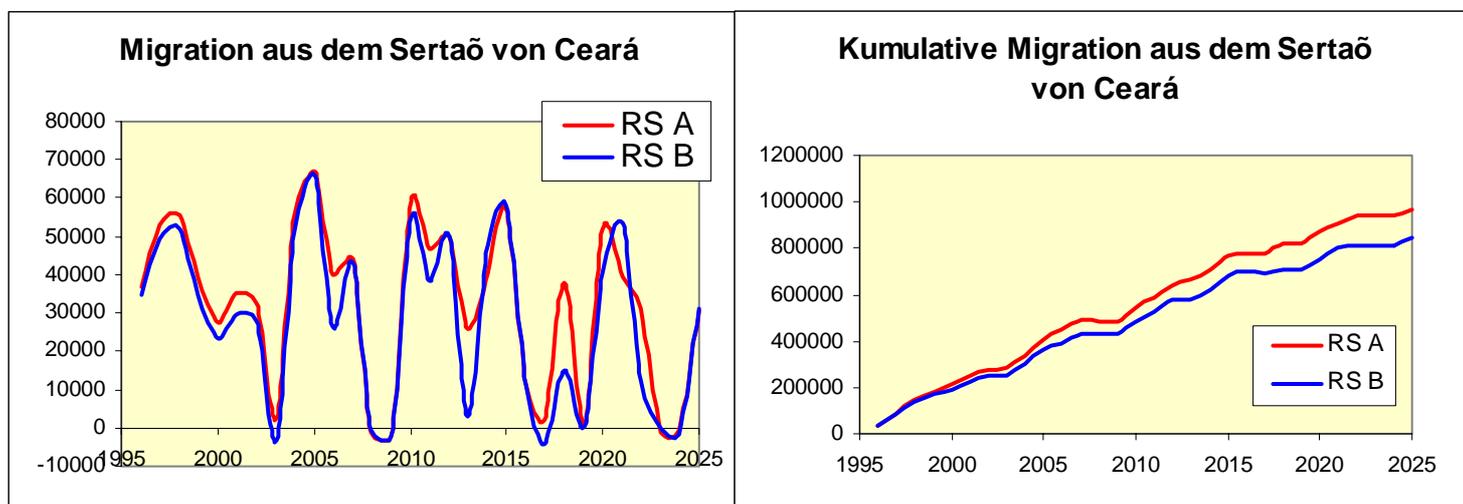


Abbildung 9: Jährliche Migration aus dem Hinterland. Vergleich der beiden Referenzszenarien: Globalisierungsszenario (RS A) und Dezentralisierungsszenario (RS B)

### 2.3.5 Untersuchungen zu Skalierungsproblemen

Die verschiedenen Forschungsdisziplinen beschreiben eine große Zahl unterschiedlichster Prozesse und Modelle, die jeweils auf eigenen Skalen definiert sind. Diese müssen zusammengeführt und kombiniert werden.

Somit ist die Skalierungsproblematik eines der zentralen Forschungsthemen auf dem Gebiet der integrierten Modellierung. Eine Verknüpfung dieser Teilbeschreibungen ist nur möglich, wenn die Skalensprünge zwischen den unterschiedlichen Beschreibungen berücksichtigt sind. Dabei ist der Bereich der zu bearbeitenden Skalen sehr breit.

Bei der Verbindung verschiedener Skalen gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten.

Zum einen das "upscaling", bei dem kleinskalige, also kleinräumige bzw. kurzzeitige Informationen verallgemeinert werden, um dadurch Informationen für eine größere Fläche bzw. einen längeren Zeitraum zu bekommen. Der entsprechend umgekehrte Ansatz, das "downscaling", versucht die auf großen Skalen verfügbare Information mit detaillierterem Wissen zu kombinieren und damit Informationen für kürzere Zeiträume bzw. kleinere Gebiete abzuleiten.

Beide Ansätze wurden je nach Fragestellung angewendet. Dabei kommt für die experimentell ausgerichteten Arbeiten eher das Upscaling und für die großräumigen Modellierungen eher das Downscaling in Betracht.

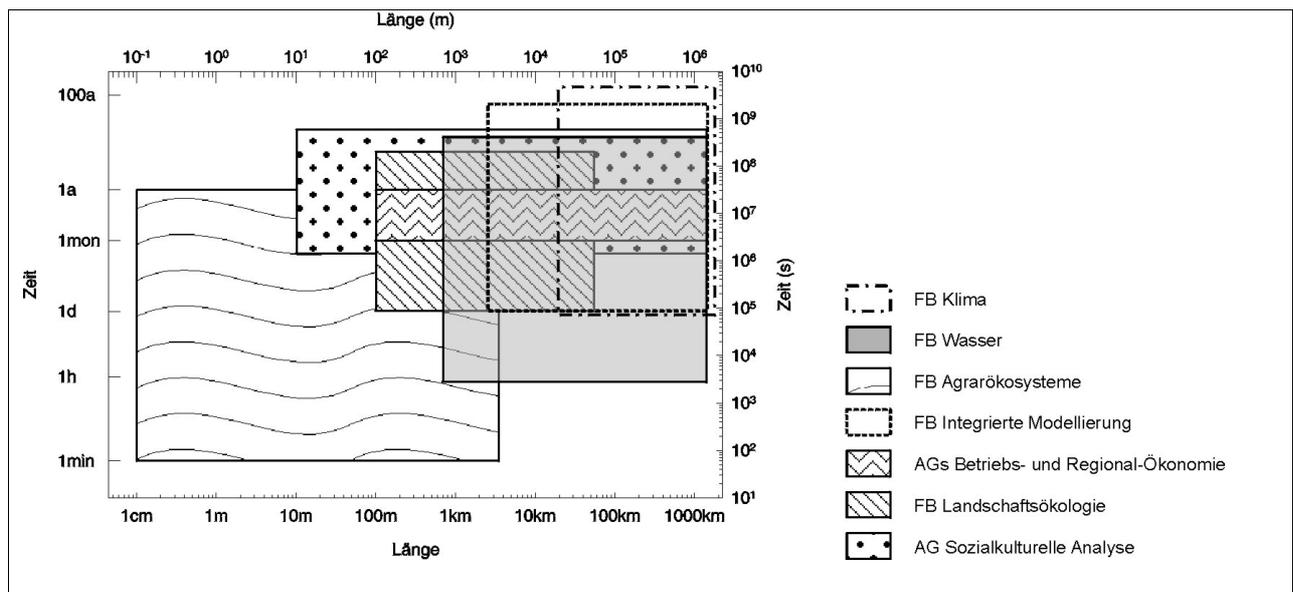


Abbildung 10: Raum- und Zeitskalen die in den Teilprojekten in WAVES verwendet werden.

In Abbildung 10 werden die von den verschiedenen Fachbereichen bzw. Arbeitsgruppen in WAVES üblicherweise verwendeten Raum- und Zeitskalen (bezüglich Ausdehnung und Dauer) zusammenfassend dargestellt. Man erkennt, daß der Skalenbereich sowohl für den Zeit- als auch den Raumbezug mehrere Größenordnungen umfaßt.

Die gemeinsame Integrationsebene aller Fachbereiche ist die Fläche (Ausdehnung) der beiden Bundesstaaten Ceará und Piauí bei einer Unterteilung in Verwaltungsbezirke (Auflösung).

Die Ergebnisse sollen somit auf der Skala der Bundesstaaten (400700 km<sup>2</sup>) dargestellt werden. Auf dieser Ebene wird die regionale Politik in wesentlichen Punkten bestimmt. Außerdem häufen sich auch die Folgen von Wasserknappheit wie Migration, so daß die Politik davon nicht unbeeinflusst bleiben kann.

Viele der hier verwendeten Prozeßbeschreibungen sind an der Feldskala definiert (in der Regel  $1 \text{ km}^2$ ). Eine Aggregation dieser Prozeßbeschreibungen ist also notwendig. Allerdings darf diese nicht zu grob erfolgen.

Auch die aggregierten Beschreibungen müssen viele dynamische Prozesse wie den Einfluß der variablen Wetterbedingungen und der Klimaänderung auf die Hydrologie, Änderungen der Landnutzung auf Wasserhaushalt und Agrarökonomie, Änderungen der Wasserinfrastruktur auf Wasserbilanz und Wassernutzung usw. abbilden können. Die typische Beschreibungsebene jedes dieser Prozesse stellt eine Restriktion, die bestimmt, wieweit aggregiert werden kann, dar. Eine andere Restriktion bildet die Datenverfügbarkeit. Für manche Parameter wie z. B. die Klima- oder Bodendaten sind Daten für das ganze Gebiet von Ceará und Piauí sowohl räumlich als auch zeitlicher Auflösung nur auf relativ grober Skala verfügbar. Diese begrenzte Datenverfügbarkeit bildet eine wesentliche Restriktion bei der Angleichung der Skalenniveaus zwischen den Teilmodulen des integrierten Modells.

Bei einigen der einfacheren, v.a. linearen Prozeßbeschreibungen wird die Parametrisierung problemlos eine Hochskalierung auf eine gröbere Ebene zulassen. Bei vielen anderen spielen nichtlineare Prozesse eine wichtige Rolle. Somit ist es vorerst unklar, ob eine einfache Skalierung anwendbar ist; und falls ja, ob dabei Parameterwerte eventuell skalenabhängig angepaßt werden müssen. Dabei muß in Betracht gezogen werden, daß das integrierte Modell die großräumige Dynamik zu simulieren versucht und kleinskaligere Prozesse eher dann interessant sind, wenn diese einen signifikanten Einfluß auf die großräumigen Variablen haben. Anders ausgedrückt, Prozesse, die 'nur' die kleinskalige Heterogenität besser beschreiben, ohne die großräumigen Mittelwerte zu beeinflussen, sind weniger von Interesse, es sei denn, diese Heterogenität stimmt mit anderen feinskaligen Ereignissen, mit denen eine modellmäßig wichtige Verbindung besteht, überein oder korreliert stark mit ihnen.

Eine der Skalierungsarbeiten, die durchgeführt wurde, ist die Analyse der Parametrisierung der potentiellen Verdunstung. Hierfür wird die Formel von Penman-Monteith benutzt. Diese Gleichung ist gegenüber oft benutzten empirischen Formeln weitgehend prozeßorientiert. Diese Wahl beruht auf der Notwendigkeit des Modells, Einflüsse unabhängiger Änderungen der Klimavariablen sowie Änderungen in der Bodenbedeckung, Vegetation und Landnutzung abbilden zu können.

Die Gleichung von Penman-Monteith ist nicht spezifisch an eine zeitliche Skala gebunden, wohl aber an räumliche Einheiten, in denen die Eingangsvariablen (Klima, Bodenbedeckung) homogen sind.

Die zeitliche Skalierungsfrage wurde durch Anwendung dieser Formel mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung angegangen. Dabei wurden die Klimazeitreihen der PIK-Klimastationen in Tauá, Picos und Vale de Gurgéia benutzt. Diese Reihen sind hierfür besonders geeignet, weil alle erforderlichen Klimadaten simultan und mit höherer zeitlicher Auflösung (bis zu 10 Minuten, abhängig von der Variablen) verfügbar sind.

Die Simulationen zeigen, daß eine halbtägige Mittelung der meteorologischen Eingabegrößen geeignet ist, um einerseits den Rechenaufwand zu begrenzen und andererseits den Tagesverlauf der Evapotranspiration, der z. B. zur Beschreibung des Pflanzenwachstums benötigt wird, noch in ausreichender Genauigkeit abzubilden.

Die Fehler, die sich aus den verschiedenen Auflösungen ergeben, weichen bei Anwendung der Formel auf einer zeitlichen Skala von einem halben bis einem ganzen Tag nur um einige Prozente von den Ergebnissen mit feiner Auflösung ab. Sie liegen bei 0.1 (Halbtageswerte) bzw. 0.1-0.2 mm/d (Tageswerte). Bei weiterer Vergrößerung der Auflösung werden die Genauigkeitsverluste aber signifikant. Eine Summierung der Differenzen impliziert eine mögliche lineare Korrektur (Abbildung 11a).

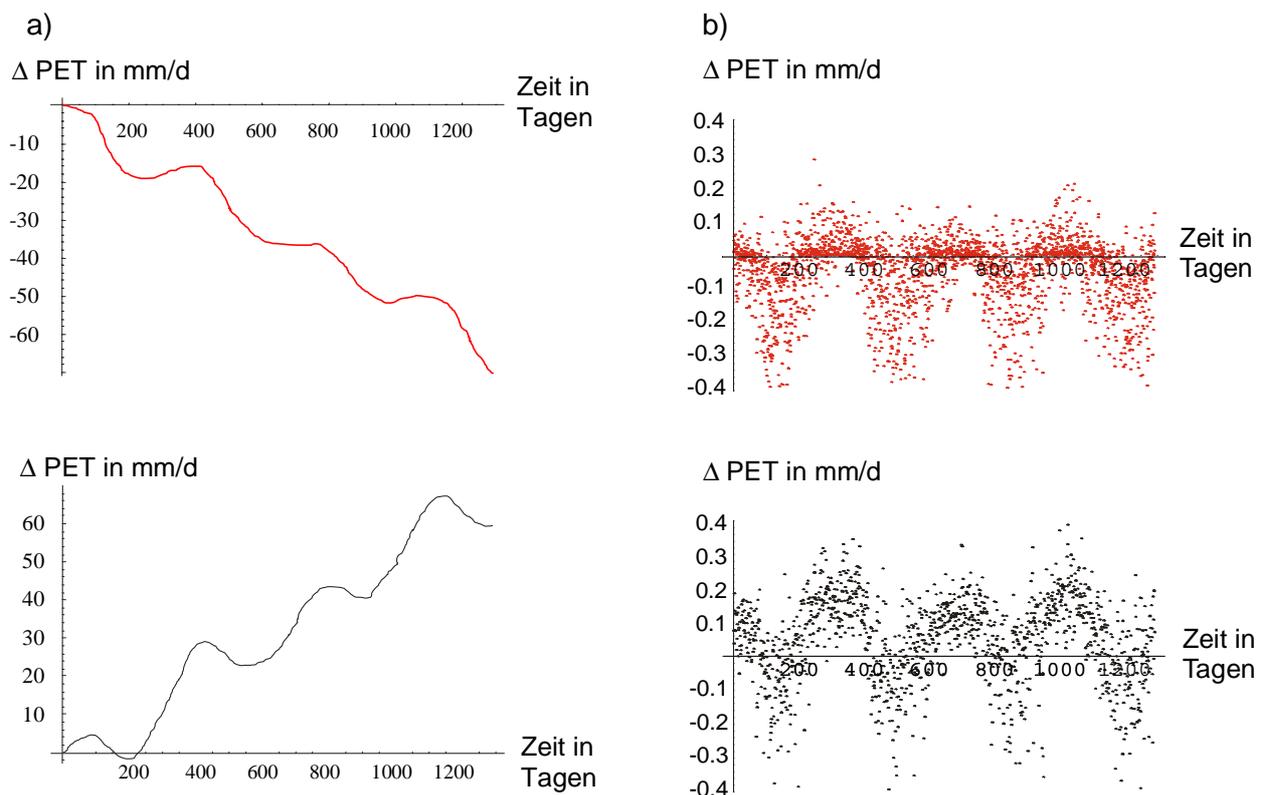


Abbildung 11: Ergebnis der zeitliche Skalierungsuntersuchungen für die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (PET). Differenzen ( $\Delta$ ) zwischen gemittelten und nicht gemittelten Werten der PET berechnet mit Hilfe von Daten der PIK-Klimastation in Picos (2.5.'95 bis 20.11.'98; oben Halbtageswerte und unten Tageswerte): a.) addierte Differenzen, b.) absolute Differenzen

### 2.3.6 Erstellung von integrierten Szenarien

Die Entwicklung von integrierten Szenarien war neben der prozeß-dynamisch orientierten integrierten Modellierung und der GIS-basierten landschaftsökologischen Integration in der Datenebene die dritte integrative Hauptaktivität im WAVES-Programm.

Primäres Ziel der Szenarienaktivitäten war das Aufbauen von umfassend definierten, plausiblen, konsistenten und integrierten Szenarien der langfristigen Regionalentwicklung zur Analyse der Möglichkeiten von nachhaltigen Entwicklungen für die Nutzung von Boden und Wasser in Ceará und Piauí. Es wurden Referenzszenarien erstellt, die mögliche Entwicklungen auf regionaler und überregionaler Ebene zeigen und Interventionsszenarien, d.h. Variationen auf die Referenzszenarien. Dabei können die Folgen von regional definierten Eingriffen abgeschätzt werden.

Die Entwicklung eines kompletten Kataloges von Referenzszenarien mit Interventionsvarianten wurde in dieser Projektphase nicht angestrebt. Das war in der bestehenden Projektplanung nicht möglich und auch noch nicht erwünscht. Für die Entwicklung der Szenarien ist die fachinhaltliche Forschung aller Teilbereiche absolut notwendig.

Die szenarienbezogenen Aufgaben wurden von einer Arbeitsgruppe der deutschen Seite des WAVES Programms, die sich aus Mitgliedern aller Teilprojekte zusammensetzt, koordiniert. Der Fachbereich Integrierte Modellierung ist dabei durch Herrn Krol und Frau Jaeger vertreten.

Die Arbeitsschritte waren:

- Sammlung von Szenarioideen,
- Kombination der Ideen in Szenarioskizzen,
- Diskussion und Spezifizierung der Skizzen auf einem in Deutschland stattfindenden Projektworkshop (Nov. 1998)
- Ausarbeitung der Workshopergebnisse zu Beschreibungen von qualitativen Referenzszenarien,
- Besprechungen dieser Szenariobeschreibungen durch die AG Szenarien,
- Diskussion dieser Beschreibungen mit brasilianischen Partnern u.a. auf einem bilateralen Projektworkshop (Apr. 1999),
- erste Quantifizierung der treibenden Kräfte der Szenarien durch die Szenariogruppe,
- Quantifizierungen der dynamischen Prozeßabläufe in den Szenarien durch alle Fachbereiche,
- 3 Workshops mit SEPLAN, SRH und WAVES Wissenschaftlern in Fortaleza (2000/2001) um die in WAVES entwickelten integrierten Szenarien in Regionalplanung (Wasser und Land Ressourcen) einzubeziehen:
  1. Workshop: Diskussion von politischen Möglichkeiten, Diskussion der Plausibilität der Referenzszenarien (storylines und treibende Kräfte), Definition erster Interventionen
  2. Workshop: Präsentation und Diskussion ausgewählter WAVES Ergebnisse für Ceará und Tauá, Definition Interventionen
  3. Workshop: Präsentation und Diskussion der Ergebnisse der integrierten Szenarien (Referenzszenarien und Interventionen an verschiedenen Skalen)

Die Ergebnisse der Szenarien und eine ausführliche Beschreibung derselbigen sind in den beigelegten Publikationen und dem Endbericht 2000 der projektübergreifend arbeitenden AG Szenarien in detaillierter Form nachzulesen.

## 2.4 Diskussion

Die vorliegende Version des integrierten Modells SIM beschreibt auf konsistente Weise die Wirkungskette von globalen Änderungen, Wasserverfügbarkeit, Landwirtschaft und sozialen Vorgängen in Ceará und Piauí. Studien in Zusammenarbeit mit den Landesministerien für Planung (SEPLAN) und Wasserressourcen (SRH) von Ceará zeigen das Potential des Modells, politisch relevante Möglichkeiten zukünftiger Entwicklungen abzubilden.

Die Entwicklung von SIM stellt einen wesentlichen Beitrag zur regionalen integrierten Modellierung dar, thematisch breiter als z. B. die MINK Studie (Rosenberg et al., 1993), mehr modellierungsorientiert in der Integration als MBIS (Cohen, 1997) und sich zentralen wissenschaftlichen Zielen für die Zukunft (Magalhães et al. (1988), siehe Kapitel 2.1) annähernd.

Die unterschiedlichen im integrierten Modell enthaltenen Teilmodelle (und deren Kopplungen) sind bezüglich ihrer Unsicherheiten verschieden zu bewerten. Während einige der Fachbereiche auf vorhandene konzeptionelle Ansätze und eine gesicherte Datengrundlage oder sogar auf bestehende regional anwendbare Modelle zurückgreifen, mußten in anderen Fachbereichen neue Teilmodelle erst konzipiert werden.

Dies führt zu einer unterschiedlichen Belastbarkeit der Teilmodelle und damit notwendigerweise zu Unterschieden in den Interpretationen der Ergebnisse des integrierten Modells. Die Ergebnisse der Teilmodelle der Hydrologie und Agrarproduktion sind an der Makroskala gut definiert, z. B. als Abschätzung der regionale Sensitivität für mögliche Klimaänderung (Krol et al., 2001), hingegen an kleineren Skalen unsicherer.

Für andere Teilmodelle ermöglicht die Datenlage und der Stand der Modellbildung nur eine eingeschränktere Validierung mit großen Unsicherheiten, auch wenn die Teilmodelle das ver-

fügbare Verständnis der Prozesse abbilden. Für solche Teilmodelle stellt SIM einen integrativen Rahmen dar, mit dem auf konsistente Weise die Folgen der Entwicklungen unter Annahme der noch hypothetischen Prozeßbeschreibungen simuliert werden können.

Insbesondere bei der Modellierung von Wassernutzung und Migration stellt die eingeschränkte Datenverfügbarkeit ein großes Problem für die Modellkonzipierung und Modellkalibrierung in den einzelnen Fachbereichen dar (siehe WAVES, Endbericht 2000). Viele wichtige Daten sind nur für das Basisjahr 1996 oder wenige sonstige Jahre verfügbar. Dies behinderte die Analyse der dynamischen Prozesse erheblich (z.B. die Beschreibungen von Preiseffekten in der Wassernutzung oder von der interannuellen Variabilität der Migration). Außerdem ist die Qualität der Originaldaten nicht immer abgesichert wie z. B. bei der Bevölkerungsentwicklung, wo eine Ableitung der Migration aus den Daten nur eingeschränkt möglich war.

Dementsprechend müssen nicht nur die Ergebnisse dieser Teilmodelle sondern auch allgemein die Ergebnisse des integrierten Modells mit Vorsicht interpretiert werden (siehe auch den Diskussionsabschnitt in Döll et al. 2001). Hierbei spielt sowohl die Belastbarkeit der Teilmodelle als auch die Stärke der Rückkopplungen auf die ausgewählten Ausgabevariablen eine wichtige Rolle.

Bisherige Anwendungen von SIM umfassen v.a. die Sensitivität vom Nordosten Brasiliens für Klimaänderung und die Abbildung von Referenzszenarien der Regionalentwicklung sowie Interventionsvarianten dieser Referenzszenarien.

#### Regionale Auswirkung des globalen Klimawandels.

Die regionalen Auswirkungen des globalen Klimawandels für den Nordosten Brasiliens bleiben sehr unsicher (Krol et al., 2001). Dies ist ein allgemein auftretendes Problem bei der Interpretation von GCM-Ergebnissen an der subkontinentalen Skala (IPCC, 1999). Die wenigen GCMs mit zufriedenstellender Wiedergabe des Regionalklimas sind uneinheitlich bezüglich des zukünftigen Trends in der Niederschlagsentwicklung im untersuchten Gebiet. Simulierte Trends mit einer angenommenen Business-as-Usual-Zukunft über 100 Jahren variieren zwischen sehr starken Niederschlagsabnahmen (um 50%) bis zu signifikanten Zunahmen (um 20%).

Die landwirtschaftliche Produktion und, noch stärker, die Verfügbarkeit von Oberflächengewässer zeigt sich sensitiv für diese mögliche Klimaänderungen. In dem ungünstigeren Szenario führt dies in 50 Jahren zu erheblichen Produktionsverlusten in der Landwirtschaft, zu einer immer schlechteren Abdeckung der Wassernachfrage und zu einer dramatischen Verringerung in der gespeicherten Wassermenge am Ende der Niederschlagsperiode, die benötigt wird, um die nachfolgende Trockenperiode und mögliche Dürrejahre zu überbrücken. Im positiven Szenario zeigen sich meist neutrale Tendenzen in den wichtigen Impactindikatoren.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung möglicher Klimaänderungen für die langfristige Planung. Insbesondere in der Planung der Wasserinfrastruktur und der Regionalentwicklung werden lange Zeitskalen betrachtet. In der üblichen Planungspraxis werden Klimaänderungen aber nicht berücksichtigt.

Dies spiegelte sich auch in den von WAVES organisierten Veranstaltungen wieder. Bei den ersten Workshops (1995 bis 1997) wurde Klimaänderungen allgemein nicht als regional wichtiges Problemfeld akzeptiert im Vergleich zu den mehr oder wenig regelmäßig auftretenden akuten Dürreproblemen. Bei den späteren Veranstaltungen, Workshops mit SEPLAN und SRH, wurden die Projektergebnisse gezeigt und das Problem wurde als solches anerkannt. Ein regionales Wissensdefizit wurde von dem neuen Präsident von FUNCEME, dem hydro-meteorologische Dienst von Ceará, festgestellt.

In diesem Bereich hat WAVES deutlich zur Anerkennung des Problems beigetragen und zum Aufbau der regionalen Erkenntnisse über regionale Aspekte der Klimaänderung.

### Szenarien der Regionalentwicklung.

In der Simulation von zwei alternativen Entwicklungspfaden für das Untersuchungsgebiet zeigt sich der Bedeutung der rationellen Planung des Wasserbedarfs (Döll et al, 2001). Im ‚Globalisierungs‘-Szenario, konzentrierend auf Cash Crops und Entwicklung der Küstenregion, wurden starke Zuwachsraten für die Bewässerungslandwirtschaft angenommen. Dieser starke Zuwachs ist aus agrarpolitischer Sicht optimistisch, aber die damit verbundene erhöhte Wassernachfrage kann nicht zuverlässig erfüllt werden. Im Szenario nimmt der Wasserstreß zu, obwohl sogar ein kontinuierlicher Ausbau der Wasserspeicherkapazität angenommen wurde. Im ‚Dezentralisierungs‘-Szenario tritt weder eine Verschärfung noch eine Reduzierung des Wasserstress auf.

In beide Szenarien stabilisiert sich die Wassernachfrage im nicht-landwirtschaftlichen Sektoren und nimmt die Nachfrage gegen 2025 sogar ab. Dieses Ergebnis beruht auf den angenommenen Effekten des Wasserpreises. Der Effekt ist größer als von regionalen Experten erwartet, obwohl die besten verfügbaren Parameterschätzungen benutzt wurden. Regional abgeleitete Parameter sind nicht bekannt. Dies unterstreicht den Bedarf an regionalen wasserökonomischen Untersuchungen über längere Zeitskalen. Der Effekt ist auch insbesondere wichtig, da es gegenwärtig viele Debatten über die ökonomischen Maßnahmen bezüglich der Wasserpolitik gibt.

In beiden Szenarien bleiben sowohl die mittlere Intensität der Migration aus dem Hinterland hoch, als auch die Erhöhung der Migration in Dürrejahre. Die mittlere Intensität der Migration kann dabei als ziemlich robustes Ergebnis interpretiert werden, beruhend auf dem Geburtüberschuss aus demographischen Annahmen und dem andauernden ökonomischen Rückstand des Hinterlandes. Die Simulation von erhöhter Migration in Dürrejahre ist sensibler für die spezifischen unsicheren Annahmen in der Modellierung und kann von spezifischen Nothilfeprogrammen in Dürrejahre beeinflusst werden. Hier kann SIM eingesetzt werden, um die Folgen unter bester Einschätzung der Prozesse abzubilden. Es besteht weiterhin ein großer Forschungsbedarf.

Der Prozeß der Szenarientwicklung in Zusammenarbeit mit den Landesministerien für Planung (SEPLAN) und Wasserressourcen (SRH) förderte sowohl die inhaltliche Qualität der Szenarien als auch die politisch relevanten Diskussionen zwischen den Ministerien und Wissenschaftlern. Bezeichnend ist die persönliche Teilnahme der Planungsministerin von Ceará (Dr. Mônica Clarck) an den beiden letzten Szenarienveranstaltungen und die Anstrengungen, diesen Kontakt in einer festen Zusammenarbeit der Ministerien mit der föderalen Universität in Fortaleza zu verankern.

Die Szenarienaktivität wurde allgemein als sehr geeignetes Mittel gesehen, um beteiligten Fachbereichen und andere Interessierte integrativ über die breite Thematik mitdenken zu lassen. Es hilft das fachbereichsspezifische Denken zu übersteigen und stellt dabei keine so hohen inhaltstechnische Anforderungen wie die integrierte Modellierung dar. Statt dessen fördert es die integrierte Modellierung, indem Wissen über die Einschätzungen der Wichtigkeit der Prozesse abgeleitet werden kann. Umgekehrt wird die Entwicklung von Szenarien von der integrierten Modellierung durch die Simulationen unterstützt, die erstens die inhaltliche Konsistenz der Szenarien nachprüfen und zweitens die quantitativen Folgen abbilden.

Außerdem erlaubt die Szenarienaktivität eine direkte Kommunikation mit Entscheidungsträgern. Die im Projekt angewandte Strategie, die Erstellung der Szenarien mit der integrierten Modellierung direkt zu kombinieren, ist daher sehr empfehlenswert.

## 2.5 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern

### 2.5.1 Workshops der deutschen Projektseite

Es wurden mehrmals im Jahr Workshops von einzelnen Fachbereichen veranstaltet, an denen die Mitglieder der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung teilnahmen.

Der Fachbereich Integrierte Modellierung organisierte zwei Workshops zum Thema Integrierte Modellierung. Beide Workshops hatten zum Ziel, neben der Präsentation des Standes der projektweiten Modellierung für das integrierte Modell und deren kritischer Diskussion, die strategische Planung für die Entwicklung des Modells gemeinsam zu erstellen.

### 2.5.2 Bilaterale Projektaktivitäten

#### Szenarienaktivität bei Workshops in Fortaleza.

Hauptereignisse der Szenarioaktivitäten waren die Präsentation und Diskussion der Szenariobeschreibungen in 4 bilateralen Projektworkshops zwischen April 1999 und Juni 2001 in Fortaleza.

Bei diesen Workshops trafen sich Wissenschaftler aus allen Projektbereichen der UFC und der deutschen Projektseite. Die Aktivitäten wurden von der Szenariogruppe organisiert, wobei insbesondere Dr. M.S. Krol für inhaltliche Aspekte Verantwortung trug in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. J.C. de Araújo, Dr. T. Gaiser und Dr. E.M. Mendiondo.

Bei den Treffen wurden inhaltlich die Szenarien (Referenz, Intervention) sowie Hintergrundmaterial aus dem Projekt im Plenum vorgestellt und diskutiert. In Arbeitsgruppen wurden spezifische Szenarien oder thematische Aspekte vertieft.

Konkretes Ergebnis dieser Aktivitäten war eine Erweiterung der Ideen bezüglich der Szenarien (Döll et al, 2001). Das galt insbesondere für das Szenario der Dezentralisierung, in das neue Ideen über die Entstehung einer Dezentralisierung einfließen.

#### Projektseminar und Arbeitsgruppen an der UFC.

In der bilateralen Zusammenarbeit erwies sich der einjährige Aufenthalt von Krol als Gastwissenschaftler an der UFC als besonders wertvoll. Während dieses Aufenthalts konnte die Abstimmung zwischen den deutschen und brasilianischen Projektteilen sowie innerhalb der brasilianischen Projektteile verbessert werden. Dazu wurden Projektseminare und Arbeitsgruppen initiiert, wodurch sich die Zusammenarbeit im Projekt maßgeblich verbesserte.

## 2.6 Bibliographie

### 2.6.1 Eigene Publikationen

(nach Jahr)

Krol, M.S., A. Jaeger, A. Bronstert und J. Krywkow (2001), The Semi-arid Integrated Model (SIM), a regional integrated model assessing water availability, vulnerability of ecosystems and society in NE Brazil, *Physics and Chemistry of the Earth B* (26) 7-8, p 529-533.

Krol, M.S., A. Jaeger und A. Bronstert (2001): Integrated modelling of climate change impacts in Northeastern Brazil, in *Global change and regional impacts: water availability and vulnerability of ecosystems and society in semi-arid Northeast Brazil*, Gaiser, T., M.S. Krol, J.C. de Araújo und H. Frischkorn (Eds) (zu erscheinen; akzeptiert)

Döll, P., M.S. Krol, D. Fuhr, T. Gaiser, J. Herfort, S. Höynck, A. Jaeger, C. Külls, E.M. Mendiondo, A. Printz und S. Voerkelius (2001): Integrated scenarios of regional development in Ceará and Piauí, in *Global change and regional impacts: water availability and vulnerability*

- of ecosystems and society in semi-arid Northeast Brazil*, Gaiser, T., M.S. Krol, J.C. de Araújo und H. Frischkorn (Eds) (zu erscheinen; akzeptiert)
- Jaeger, A., M.S. Krol, J. Krywkow und A. Bronstert (2001), *The Semi-arid Integrated Model SIM*, in *Proceedings of the German-Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems, Achievements and Prospects of Cooperative Research*, September 3-8, 2000, Hamburg (zu erscheinen; Abstract akzeptiert).
- Krol, M.S. (2001), *Report on Tools for integration of ecosystem studies towards the development of management strategies*, in *Proceedings of the German-Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems, Achievements and Prospects of Cooperative Research*, September 3-8, 2000, Hamburg (zu erscheinen; akzeptiert).
- Krol, M.S. (2001), *Integrierte Modellierung der Wasserknappheit im Nordosten Brasiliens im Kontext des Globalen Wandels*, in *Veröffentlichung der Beiträge des 1. Symposium des Forschungsverbundes Lateinamerika – Berlin/Brandenburg „Die Berliner und Brandenburger Lateinamerikaforschung in Geschichte und Gegenwart – Personen und Institutionen“*, G. Wolff (Ed.), IAI-PK, Berlin (zu erscheinen; akzeptiert)
- Krol, M.S. (Ed.) (2001), *Resumo das atividades do programa WAVES em Ceará* (Zusammenfassung der Projektergebnisse der Anwendungsworkshops mit dem Planungsministerium von Ceará), 27. Juni
- Bronstert, A., A. Jaeger, A. Güntner, M. Hauschild, P. Döll und M. Krol (2000), *Integrated modelling of water availability and water use in the semi-arid Northeast of Brazil*, *Physics and Chemistry of the Earth B* (25) 3, p227-232.
- Bronstert, A., Güntner, A., Jaeger, A., Krol, M. und Krywkow, J. (1999): *Großräumige hydrologische Parametrisierung und Modellierung als Teil der integrierten Modellierung*. In: Fohrer & Döll (Hrsg.) (1999): *Proceedings des 2. Workshops: „Modellierung des Wasser- und Stofftransports in großen Einzugsgebieten“* 19/20. November 1998 in Rauschholzhausen bei Gießen. Kassel University Press 31-40.
- Hauschild, M., A. Bronstert, A. Jaeger, A. Güntner, P. Döll und M. Krol (1999), *Integrated modelling of water availability and management in the semi-arid Northeast of Brazil*, *Ann. Geophysicae* 17 (Suppl. II).
- Bronstert, A., Brovkin, V., Krol, M., Lüdeke, M., Peteschel-Held, G., Svirezhev, Yu. und Wenzel, V. (1997): *Integrated systems analysis at PIK: A brief epistemology*, PIK-Report 27, PIK, Potsdam.

## 2.6.2 Zitierte Literatur

(in alphabetischer Reihenfolge)

- Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Krol, M.S. und Zuidema, G. (1994): *Modeling the global society-biosphere-climate system: Part 1: Model description and testing*, *Water, Air, and Soil Pollution*. 76, p1-35.
- Cohen, S.J. (Ed.) (1997): *MacKenzie Basin Impact Study (MBIS), Final Report*, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Toronto.
- ESRI (Environmental System Research Institut Inc.) (1993): *Understanding GIS. The ARC/INFO Method, Rev. 6 for Workstations*, New York.
- FAO (1979): *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, Rome.
- FAO (1992): *CROPWAT - A Computer Program for Irrigation Planning and Management*. FAO Irrigation and Drainage Paper 46, Rome.
- FAO (1993): *Global And National Soils And Terrain Digital Databases (SOTER). Procedures Manual*. In: *World Soil Resources Reports* 74.
- IBGE (ed) (1998a): *Censos Economicos de 1995 - 1996. Censo Agropecuário Ceará*. IBGE. No. 11. Rio de Janeiro.
- IBGE (ed) (1998b): *Censos Economicos de 1995 - 1996. Censo Agropecuário Piauí*. IBGE. No. 10. Rio de Janeiro.

- IPLANCE (1996): Coletelanea de Estatísticas da Produção Agrícola Cearense de 1947 – 1995.
- Laurini, R. und Thompson, D. (1992): *Fundamentals of Spatial Information Systems*. The Apic Series No. 37. Academic Press. Harcourt Brace & Company, Publishers
- Magalhães, A.R., Filho, H.C., Garagorry, F.L., Gasques, J.G., Molion, L.C.B., Neto, M.da S.A., Nobre, C.A., Porto, E.R. und de Rebouças, O.E. (1988). The effects of climatic variations on agriculture in Northeast Brazil, in Parry, M.L., Carter, T.R, Konijn, N.T. (Eds). *The impact of climatic variations on agriculture. Volume 2: assessments in semi-arid regions*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands.
- Rosenberg N.J., Crosson P.R., Frederick K.D., Easterling W.E., McKenny M.S., Bowes M.D., Sedjo R.A., Dramstadter J., Katz L.A., Lemon K.M. (1993): The MINK methodology: background and baseline. In: *Towards an integrated impact assessment of climate change: the MINK study*. Reprinted from *Climatic Change* 24: 1-2, 1993, ed. N.J. Rosenberg. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- USGS (1996): GTOPO30 Documentation.
- Van Deursen, W.P.A. (1995): *Geographical Information Systems and Dynamic Models. Development and application of a prototype spatial modelling language*. Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht. 198p.
- Von Werner, M. (1995): *GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Erosion in kleinen Einzugsgebieten*. Dissertation an der Freien Universität Berlin.

### **3 Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung und Ausblick**

Hauptergebnisse der geplanten Arbeiten waren die Bereitstellung eines integrierten Modells, von gemeinsam erstellten integrierten Szenarien sowie einer Modellanalyse der aufgestellten Szenarien.

Die ursprüngliche Planung wurde mit der Erstellung des integrierten Modells SIM und den Referenzszenarien (siehe den Beitrag der AG Szenarien im Endbericht 2000) eingehalten.

Die Aufnahme der unterschiedlichen Teilmodelle aus anderen Fachbereichen konnte vollständig durchgeführt werden, auch wenn einige Beiträge wesentlich später geliefert wurden, als ursprünglich geplant. Untersuchungen der Modellsensitivitäten, insbesondere für Klimaänderungen, wurden durchgeführt.

Die Szenarientwicklung und -auswertung im letzten Projektjahr erfolgte gemäß des Verlängerungsantrags.

Das integrierte Modell wurde auf den Rechnern der Landeszeitungsstelle des Rede Nacional de Pesquisa (RNP) und der föderalen Universität in Fortaleza (UFC) installiert.

V.a. wegen des verspäteten Beginns der brasilianischen Projektseite verlief die Zusammenarbeit mit der brasilianischen Seite anders als ursprünglich geplant. Einige ursprünglich vorgesehene Teilprojekte der brasilianischen Projektseite fanden nicht statt (Integration Klima-Hydrologie an FUNCEME; integrierte Unsicherheitsanalysen an der UFBA); dafür wurden andere gestartet (Visualisierung; wissenschaftliches Rechnen). Der relativ neue Forschungsbereich der integrierten Modellierung konnte dennoch erfolgreich an der UFC eingeführt werden, insbesondere in der Zusammenarbeit mit Prof. Dr. J.C. de Araújo bezüglich integrierter Analysen der Zusammenhänge zwischen Klima, Hydrologie und Wasserbedarf.

Eine Weiterführung der integrierten Szenariobildung und Modellierung ist in einer Zusammenarbeit von SEPLAN/SRH und UFC unter Mitfinanzierung von CNPq konkret vorgesehen.

Ein neukonzipiertes Forschungsprojekt mit ähnlicher Thematik, aber fokussierend auf der Wasserversorgung, wurde von den föderalen Universitäten von Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba und Pernambuco beim Instituto do Milênio eingereicht. Einige der deutsche WAVES-Partner, unter anderem das PIK, werden sich an diesem Projekt unterstützend beteiligen.

#### **4 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind**

Auf der Ebene der Datenzulieferung ist das WAVES-Projekt sehr auf Zuarbeiten von projektexternen Organisationen angewiesen. Insbesondere für die Beschaffung von Daten bezüglich des Klimas und des Abflusses wurde externe Hilfe genutzt.

Die Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Fortaleza, stellte die von ihnen bearbeiteten Niederschlagsdaten für Ceará zur Verfügung.

Die Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), Fortaleza, stellte die von ihnen bearbeiteten Abfluß- und Niederschlagsdaten für Ceará zur Verfügung.

Die Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Dept. Fortaleza, machten die von ihnen bearbeiteten Daten bezüglich Niederschlag (Einzugsgebiet Parnaíba und Umgebung), Abfluß und Flußbett (Ceará und Piauí) sowie eine ausführliche Datenbank mit Brunnendaten (Ceará) verfügbar.

#### **5 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten**

Im Berichtszeitraum wurden weder Erfindungen noch Schutzrechte angemeldet.