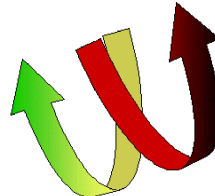


**WASSERVERFÜGBARKEIT SOWIE ÖKOLOGISCHE, KLIMATISCHE UND
SOZIOÖKONOMISCHE WECHSELWIRKUNGEN IM SEMIARIDEN
NORDOSTEN BRASILIENS**



WAVES

**Verbundprojekt WAVES
Statusbericht der ersten Hauptphase**

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 - 31.07.2000

Berichtszeitraum: 01.08.1997 - 31.12.1999

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

Potsdam, den 15. Februar 2000
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
Telegrafenberg, Postfach 60 12 03, D-14412 Potsdam

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	1
2 Stand des Vorhabens	2
2.1 Einleitung und Fragestellung des Teilprojekts	2
2.2 Methodisches Vorgehen	2
2.3 Ergebnisse	4
2.3.1 Aufbau des integrierten Modells SIM (Semi-arid Integrated Model)	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	15
2.3.6 Erstellung von integrierten Szenarien	18
2.4 Diskussion	19
2.5 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern	20
2.5.1 Workshops	20
2.5.2 Bilaterale Projektaktivitäten	20
2.5.3 WAVES-Seminar in Brasilien	21
2.6 Bibliographie	22
2.6.1 Eigene Publikationen	22
2.6.2 Zitierte Literatur	22
3 Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung und Ausblick	23
4 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind	23
5 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten	24

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 breit 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 wurde mit der Erstellung von zwei Referenzszenarien, die verschiedene Bilder der möglichen zukünftigen Entwicklungen repräsentieren, begonnen. Das integrierte Modell SIM bietet die Möglichkeit, eine thematisch breite und intern konsistente Quantifizierung der Szenarien durchzuführen und damit die Folgen des globalen Wandels und der regionalen Politik in den Szenarien mit Hilfe von Indikatoren darzustellen.

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, the development of two reference scenarios was started, covering different themes of possible future developments. The integrated model SIM offers a thematically broad and internally consistent quantification of the impacts of global change and regional policy in the scenarios and generates 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 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 Szenarien werden verschiedene Bilder der möglichen zukünftigen Entwicklungen repräsentieren. Für jedes Szenario sollen mögliche Steuerungen auf ihre Effektivität hin analysiert werden.

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 geschlußfolgert: „*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

Die Modellierungs- und Integrationsstrategie, der gefolgt wurde, ähnelt der anderer integrativer Studien im Global Change Bereich, 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 Açudes abhängig ist und andererseits die Versorgung mit Nahrung und das Einkommen der ländlichen Bevölkerung sicherstellen soll.

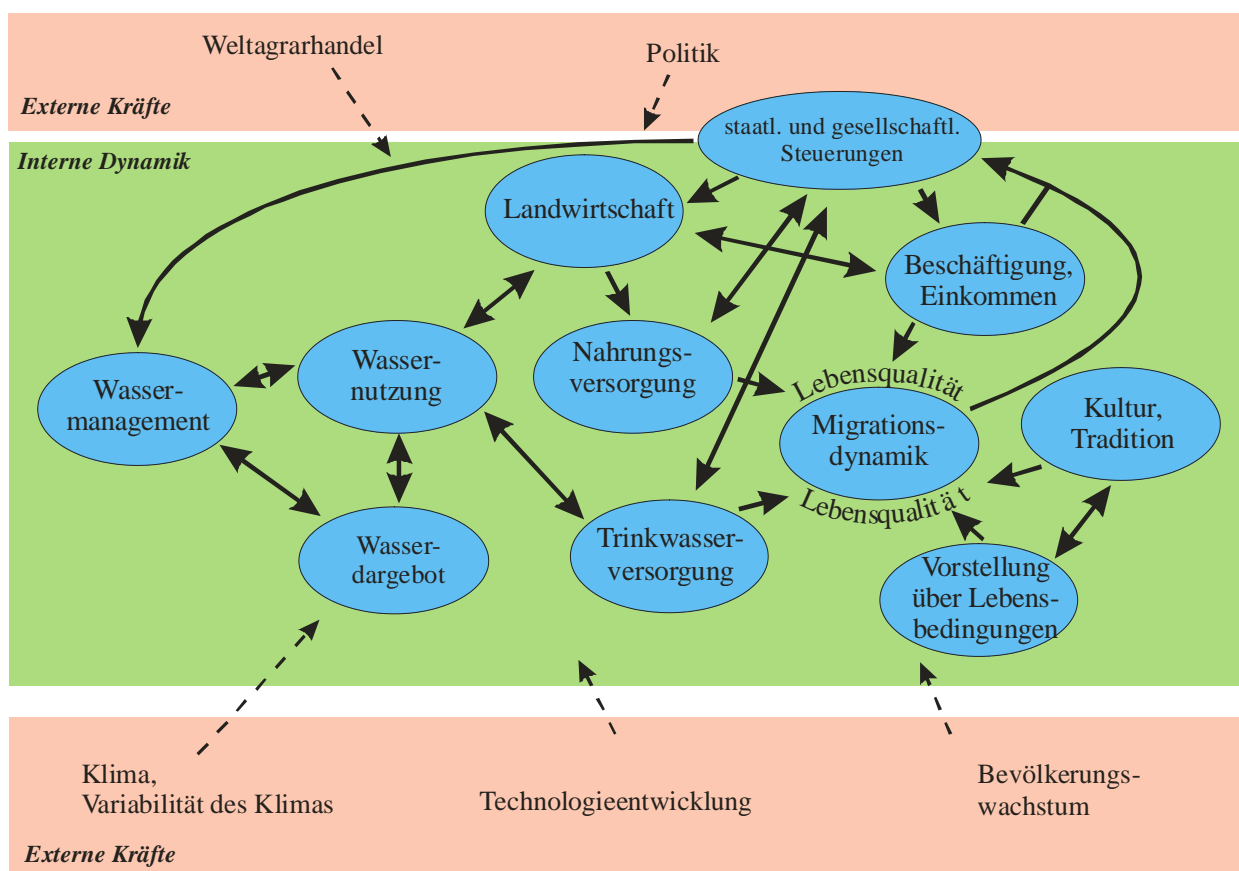


Abbildung 1: Systemanalyse der Zusammenhänge zwischen Wasserverfügbarkeit und sozialen Folgen; mittlerer Detaillierungsgrad.

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 ent-

hält 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** (**S**emi-arid **I**ntegrated **M**odel) beschreibt die Dynamik 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 und unterscheidet sich danach, welcher Prozeß betrachtet wird.

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 gröberen 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.

In jedem Teilmodell werden die Entwicklungen bestimmter Variablen beschrieben, die durch extern definierte Kräfte oder in anderen Teilmodellen errechnete interne Variablen beeinflusst werden.

Abbildung 2 zeigt die Einordnung der einzelnen Teile in die zuvor erarbeitete Systemstruktur. Dabei zeigen die roten Pfeile zwischen RASMO und CROPWAT bzw. MIGFLOW, daß diese Verbindungen bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht zufriedenstellend hergestellt werden konnten.

Nachfolgend werden die einzelnen Teile sowie deren Kopplungen näher erläutert.

Externe treibende Kräfte, wie z. B. Geburten- und Sterberaten oder auch Preisentwicklungen agrarökonomischer Produkte werden nicht im Modell errechnet, sondern gehen als Szenarien in die entsprechenden Teilmodelle ein. Diese Szenarien können dabei sehr umfangreichen detail-

lierten Studien entsprechen oder nur einfache Sensitivitätsanalysen sein (siehe auch den Statusbericht der AG Szenarien).

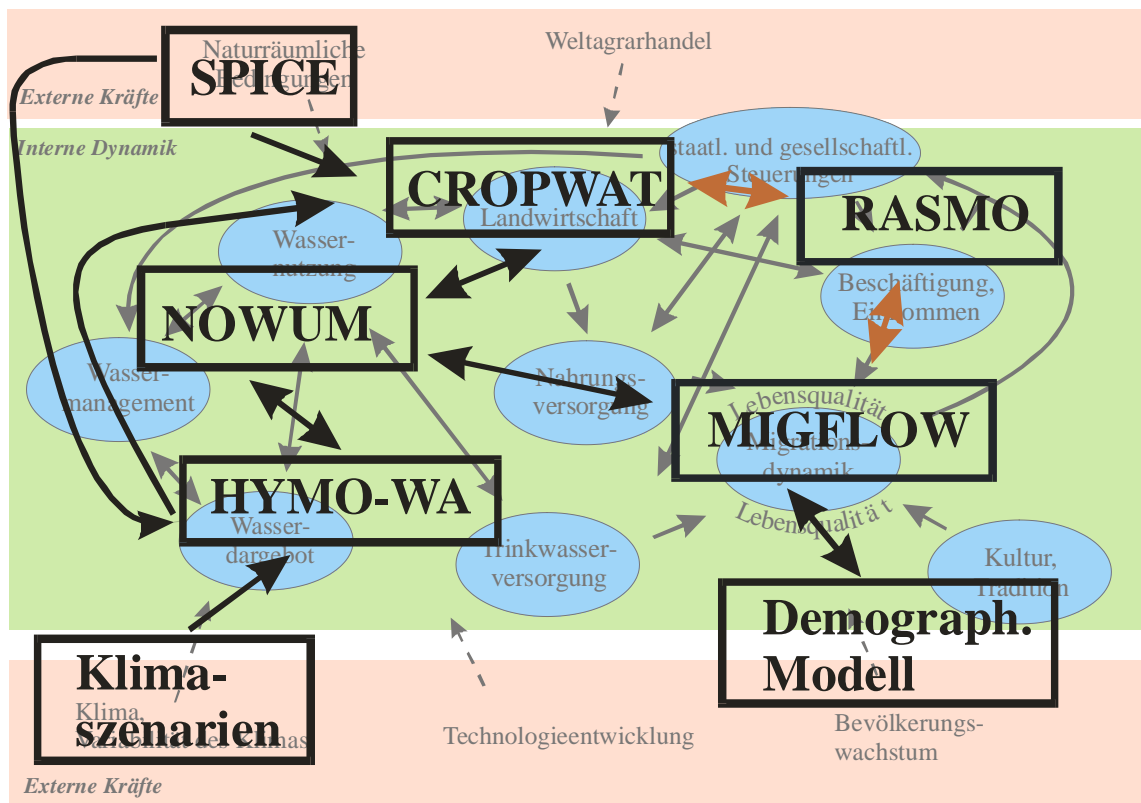


Abbildung 2: Einordnung der Teilmodelle (Vordergrund) in die zuvor erarbeitete Systemstruktur (Hintergrund).

2.3.1.1 CLIMO

Eine der wichtigsten treibenden Kräfte, der in WAVES betrachteten Prozesse, ist das Klima. Der Variabilität des Niederschlags, die sowohl räumlich als auch zeitlich, hier 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 eine Simulation der 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 und 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. Im Szenario werden statistische Charakteristika der Rekonstruktion mit angenommenen großräumigen Klimatrends kombiniert. Diese Trends sind aus transienten Klimaänderungssimulationen von globalen Klimamodellen (ECHAM 4) abgeleitet.

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

strahlung und Windgeschwindigkeit ein. Skalierungsuntersuchungen zeigten, daß hier tägliche Berechnungen angebracht sind.

2.3.1.2 HYMO

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

Das Modul besteht aus den Teilmodellen HYMO-WA (HYMO-Water Availability), 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 HYMO-WA 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.

HYMO-WA

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 kombiniert. Bei der Berechnung des Bewässerungswasserbedarfes wird der Ansatz von CROPWAT (FAO, 1992) benutzt. Entsprechend der Einteilung im Agrarzensus (IBGE 1998a, 1998b) werden ver-

schiedene 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 Açuden gespeichert wird) in großem Maße vom Niederschlag abhängig. Neben den Niederschlagsbedingungen haben die Böden 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.

CROPWAT

Potentielle landwirtschaftliche Erträge werden im integrierten Modell nach der CROPWAT-Methode (FAO, 1992) berechnet. In CROPWAT wird 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 (genauere Erläuterungen sind in den Statusberichten der AG Bodenkunde und der AG Pflanzenbau nachzulesen). Die aktuelle Verdunstung wird aus HYMO-WA für Hydrotöpfe 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 HYMO-WA, also bei der Berechnung der Wasserverfügbarkeit, mit einbezogen. Es werden verschiedenen Anbaumethoden 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 5 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 CROPWAT 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 dienten verschiedene Karten, die bodenkundlichen 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 können. 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.

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.

Einige Fachbereichsbeiträge werden erst im Jahr 2000 voll in SIM integriert werden können, da sie noch in der Entwicklung sind oder erst zu spät zur Verfügung standen (Bodendaten aus SOTER-Klassifikation, Vervollständigung der Wassernutzungskategorien, agrarökonomische Modellierung, Migrationsmodellierung, Bodeneigenschaften und verbesserte Prozeßbeschreibungen in HYMO-WA). Sie sind in der jetzigen Version des Modells durch vereinfachte oder unvollständige Darstellungen ersetzt. Dadurch können einige der dynamischen Prozesse im Moment noch nicht vom Modell vollständig abgebildet werden, wie z. B. die agrarökonomische Reaktion auf die sich ändernden klimatischen Bedingungen. Die oben genannten Modellverbesserungen und Erweiterungen werden bis zum Ende der ersten Hauptphase erfolgen.

2.3.2 Modelle aus den anderen Fachbereichen und eigene Modellierung

Die Entwicklung des integrierten Modells war eine projektübergreifende Aktivität. Dabei sind Modellierungsbeiträge aller Projektgruppen sowie deren Vortrags- und Diskussionsbeiträge bei den Projektworkshops bezüglich Integrierter Modellierung (Dezember 1997, Januar 1999) von sehr großer Bedeutung. Deshalb scheint es sinnvoll, in einer Kurzübersicht (Tabelle 1) zu erläutern, welche Arbeiten am Modell von den Teilprojektgruppen 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 HYMO-WA	PIK – Hydrologie / UFC – Hydraulik
	Definition, geographische Verschneidungen von Hydrotopen, Parametrisierungen	PIK – Integrierte Modellierung
	Modellierung NoWUM	GhKassel – Wassernutzung
	Kopplung HYMO-WA mit NoWUM	PIK – Integrierte Modellierung
LAMO	Implementierung CROPWAT	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 Gruppen, die sie bearbeiten.

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 HYMO-WA und für CROPWAT/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 units), 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 munizipale 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. Die-

ser 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 Abflußrouting im Gewässernetz zusammen.

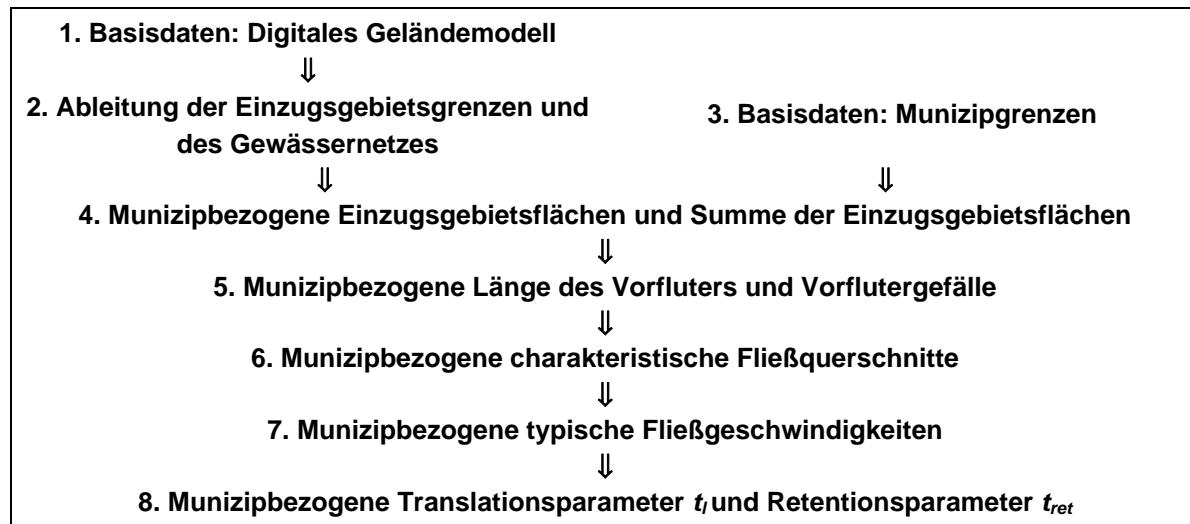


Abbildung 3: Arbeitsschritte bei der Ableitung der Parameter für das Abflußrouting.

2.3.4 Anwendungen

Entsprechend der Modellierungsstrategie wurden die allerersten hypothetischen Versionen schrittweise durch von den verschiedenen Fachbereichen unterstützte ausgearbeitete Module ersetzt (siehe Kapitel 2.2). Dadurch gab es immer eine laufende Version des Modells, also auch immer Ergebnisse, die den aktuellen Stand des Modells charakterisieren.

Bisher sind noch nicht alle Teilmodelle vollständig integriert. Daher sind die hier gezeigten Ergebnisse des integrierten Modells SIM sind noch nicht endgültig.

Dennoch zeigen sie interessante Resultate und geben einen Eindruck vom Gesamtmodell.

Erste Rechnungen beziehen sich vorrangig auf die Teile des Modells, die zuerst lauffähig waren, daß heißt die Teilintegration CLIMO – HYMO und CLIMO – HYMO – LAMO.

Außerdem wurden einige Sensitivitätsstudien sowie erste Validierungsläufe durchgeführt.

Beispiele für Modellergebnisse zur Validierung sind in Abbildung 4 zu sehen. Hierbei werden die Simulationen der relativen (in bezug auf den Maximalertrag) jährlichen Erträge im Regenfeldbau von Mais in den Jahren 1942–1980 in Ceará mit den entsprechenden Daten von IPLANCE 1996 verglichen. In diese Simulation gehen bisher nur klimatische Verhältnisse ein. Trotzdem stimmt der Verlauf der Erträge schon einigermaßen überein. Unterschiedliche Böden und agrarökonomische Betrachtungen werden nicht betrachtet. Eine Kopplung mit dem agrarökonomischen Modell RASMO wird die Ergebnisse somit erheblich verbessern.

Abbildung 5 vergleicht die berechneten Abflüsse an zwei ausgewählten Pegeln mit gemessenen Werten. Sie zeigen, daß der charakteristische Jahresgang des Abflusses vom Modell überwiegend zufriedenstellend wiedergegeben wird, und daß die simulierten Ergebnisse teilweise gut (4a), in anderen Fällen weniger gut (4b) übereinstimmen.

Die Abweichungen zwischen modellierten und gemessenen Werten können auf die im Moment teilweise noch ungenügende Konzeptionierung der Abflußbildung und auf die sehr grobe Parametrisierung zurückgeführt werden.

Erste Sensitivitätsuntersuchungen zeigen den Einfluß bestimmter Modellparameter auf die Simulationsergebnisse. Abbildung 6 ist als Beispiel der Einfluß des Parameters, der den kontrol-

lierten Abfluß aus dem Stausee beschreibt, auf das Füllvolumen des Açude Oros in den Jahren 1921-1980 beschrieben. Interessant ist dieser Parameter auch deswegen, weil er durch den Menschen direkt und einfach gesteuert werden kann.

Neben Validierungs- und Sensitivitätsstudien wurden Modellläufe mit den vom Fachbereich Klima interpolierten Szenariendaten der Klimavariablen einer Simulation des ECHAM4-Modells für die Jahre 2001-2050 durchgeführt.

Für einen Modellauf über mehrere Jahre ergeben sich dabei zahlreiche Ergebnisse, da die Variablen meist auf Munizipebene und teilweise täglich berechnet werden. Je nach Anwendung werden hieraus einzelne Ergebnisse ausgewählt.

Beispielhaft wird in Abbildung 7 die Änderung des durchschnittlichen monatlichen Abflusses in Peixe Gordo in den ersten 25 Simulationsjahren gegenüber den zweiten 25 Simulationsjahren gezeigt. Diese Änderungen resultieren aus einer Niederschlagsabnahme im Untersuchungsgebiet in dem verwendeten Datensatz des Klimaszenarios (siehe Statusbericht der AG Klimaanalyse/ -modellierung).

Weitere Beispiele von Ergebnissen sind im Kapitel 6 Band 1 erläutert.

Abbildung 8 demonstriert den Einfluß der Kopplung des Wassernutzungsmodells NoWUM mit dem die natürlichen Wasserressourcen beschreibendem Modell HYMO-WA. 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 Ausgangsfüllvolumen wurde in beiden Simulationen Null gesetzt. Wie zu erwarten ist, sinkt das Volumen des Wassers in der die Wassernutzung berücksichtigenden Version stärker.

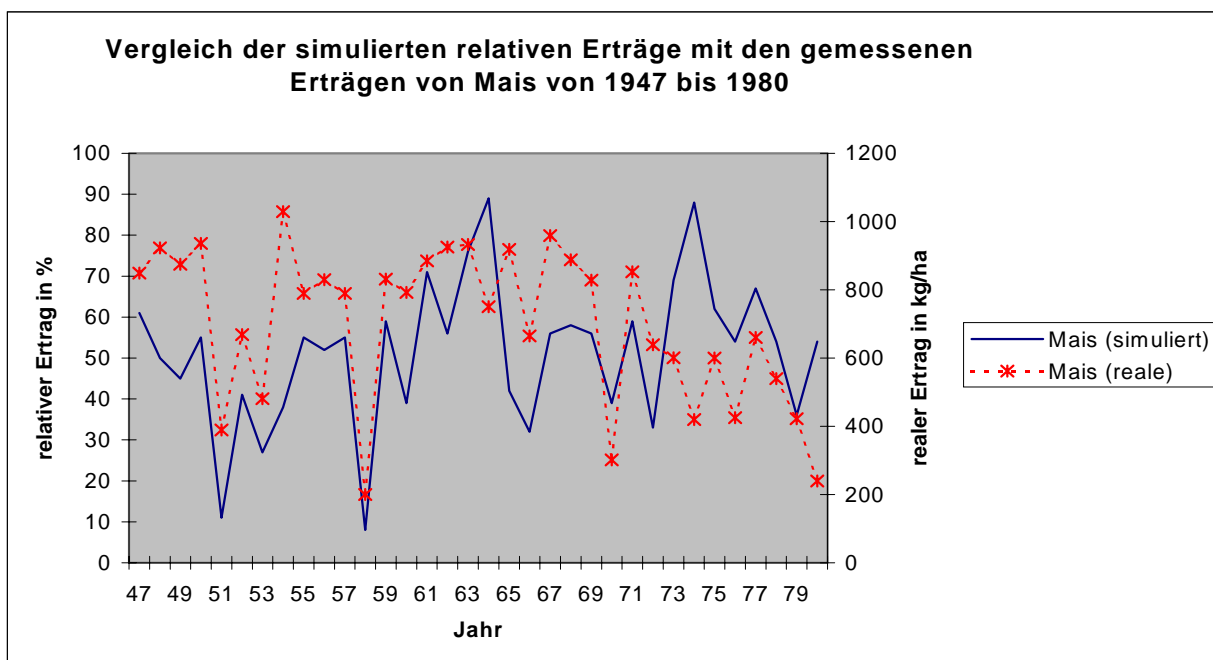


Abbildung 4: Vergleich der simulierten Maiserträge (relativ zum Maximalertrag) mit gemessenen Daten von 1947 bis 1980 in Ceará.

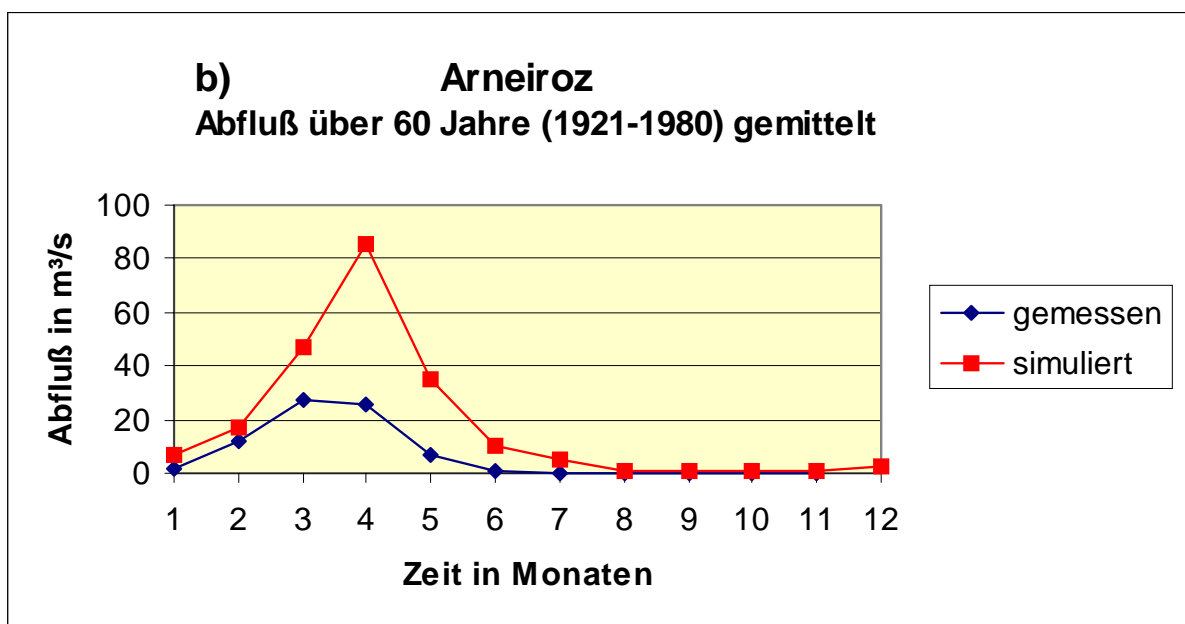
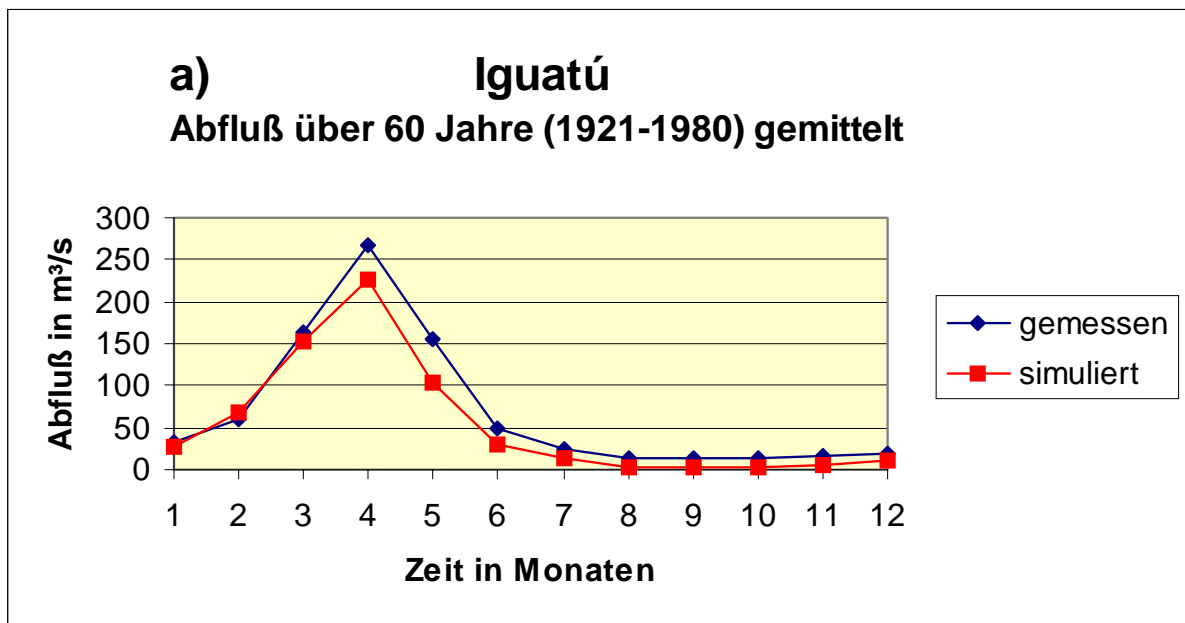


Abbildung 5: Abfluß an zwei verschiedenen Pegeln. Vergleich der gemessenen mit simulierten Werten. Gezeigt werden Monatswerte, die über 60 Jahre (1921-1980) gemittelt wurden.

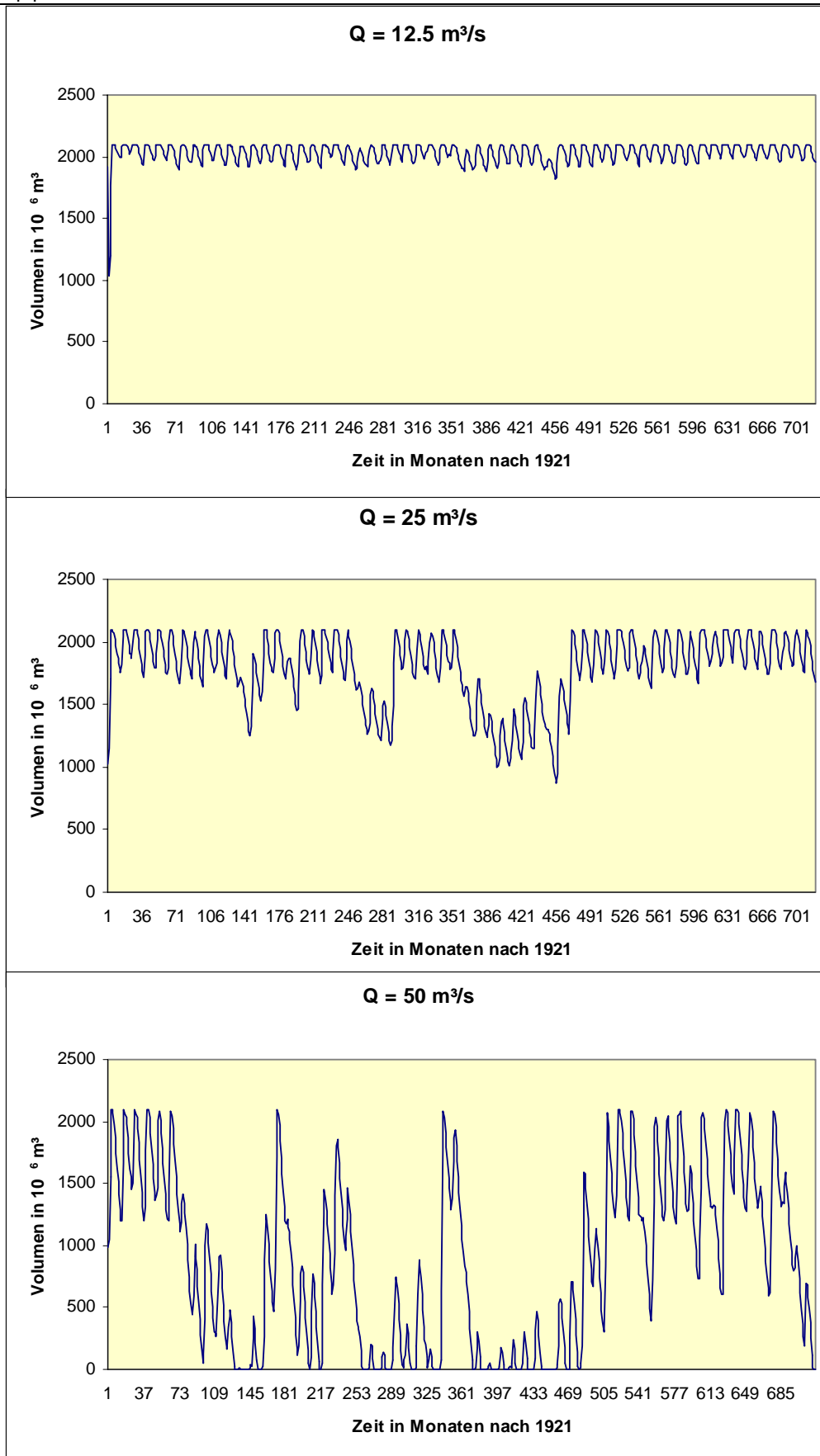


Abbildung 6: Füllstand des Açudes Oros in Abhängigkeit vom kontrolliertem Ausfluß.

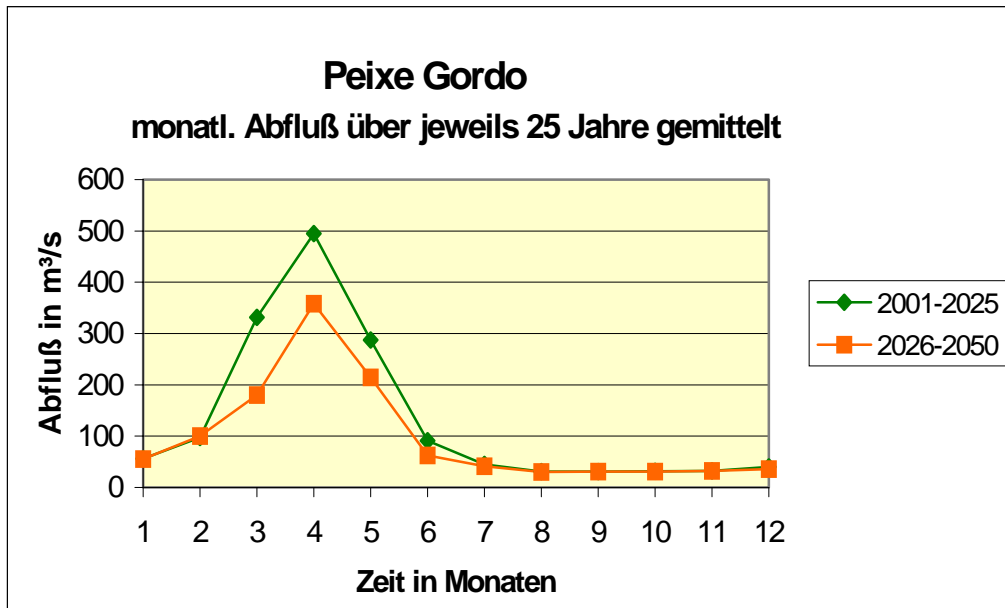


Abbildung 7: Monatliche Abflüsse am Pegel Peixe Gordo über jeweils 25 Jahre gemittelt. Vergleich der Jahre 2001-2025 bzw. 2026-2050 mit Klimadaten, die aus einer ECHAM4-Simulation abgeleitet sind.

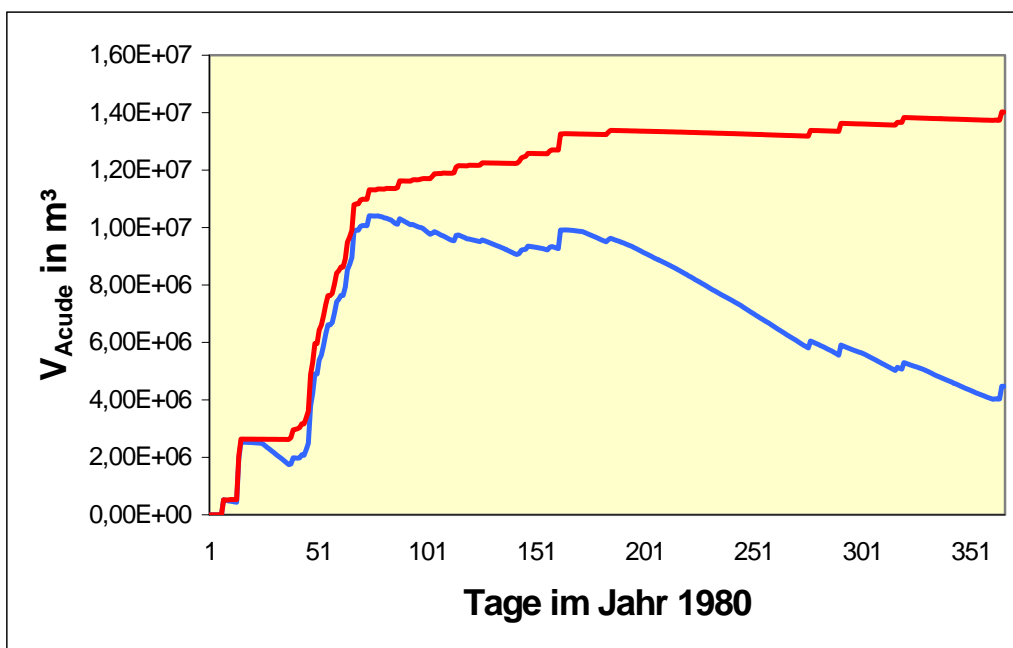


Abbildung 8: Füllstand kleiner Açudes im Munizip Iguatú mit (blau) und ohne (orange) Kopplung des Wassernutzungsmodells NoWUM und HYMO-WA, das die natürlichen Wasserverhältnisse berücksichtigt.

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.

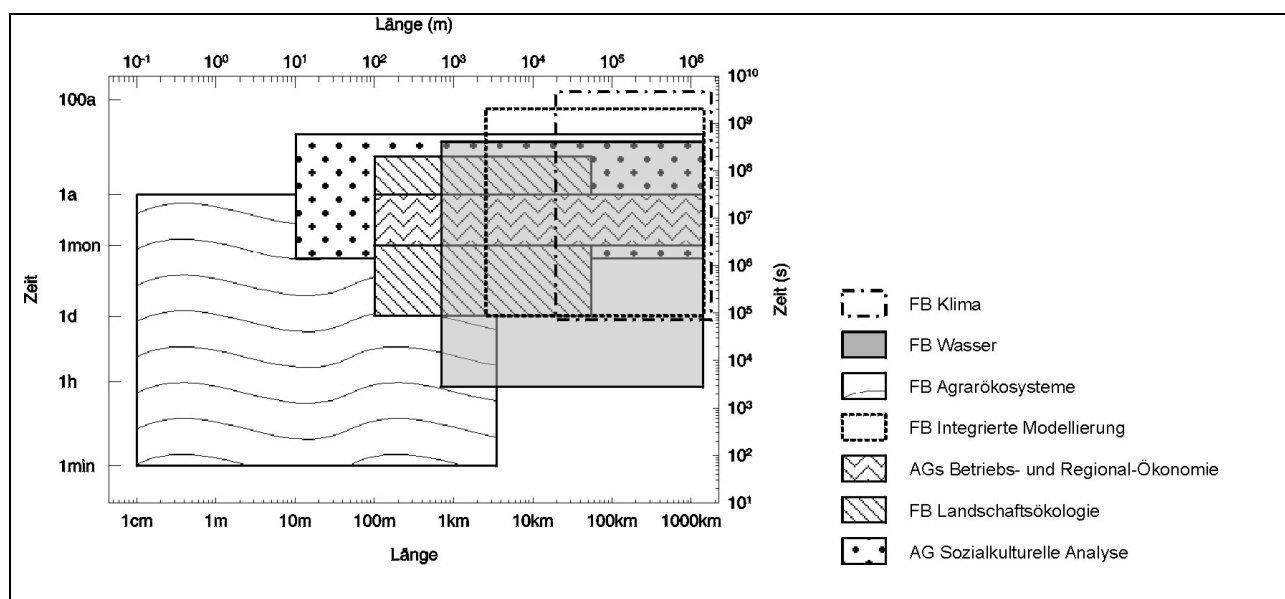


Abbildung 9: Raum- und Zeitskalen die in den Teilprojekten in WAVES verwendet werden.

In Abbildung 9 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^2) 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 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 10a).

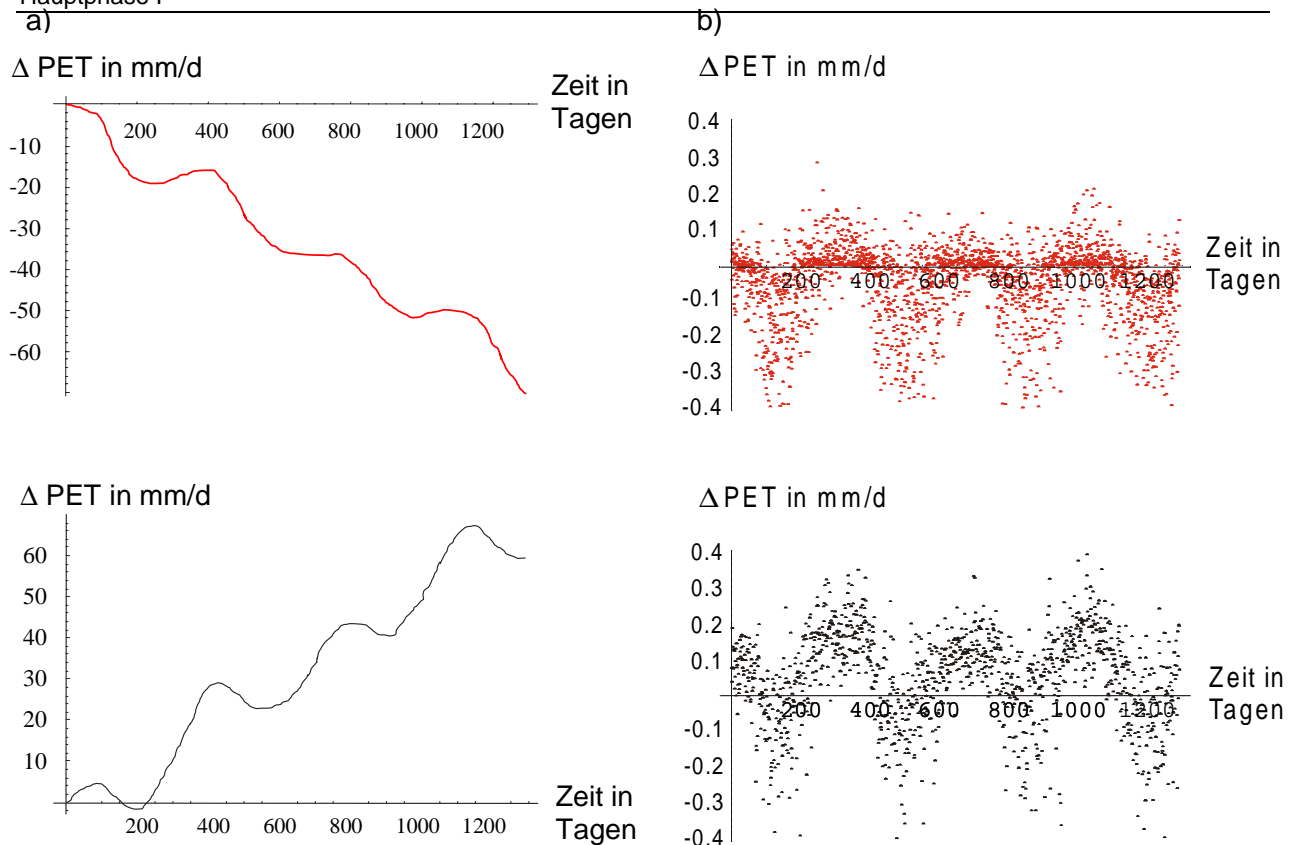


Abbildung 10: Ergebnis der zeitliche Skalierungsuntersuchungen für die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (PET). Differenzen (Δ) zwischen gemittelten und nicht gemittelten Werten der PET berechnet mit Hilfe von Daten der PIK-Klimastation in Picos (2.5.'95 bis 20.11.'98; oben Halbtageswerte und unten Tageswerte): a.) addierte Differenzen, b.) absolute Differenzen

2.3.6 Erstellung von integrierten Szenarien

Die Entwicklung von integrierten Szenarien ist 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 ist das Aufbauen von breit 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. Das Ziel ist die Aufstellung von Referenzszenarien, die mögliche Entwicklungen auf regionaler und überregionaler Ebene zeigen und von Interventionsszenarien, sowie Variationen über den 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. Der Modellkatalog integrierter Modelle und der Fachbereichsmodelle, der am Ende der Hauptphase zur Verfügung stehen wird, soll es ermöglichen, Szenarien zu entwickeln. Dieser Katalog war aber während der Projektphase erst in Entwicklung. Dennoch wurde er als notwendig erachtet, damit zu beginnen, damit sich die Projektgruppen schon mit dem Prozeß der Szenarientwicklung vertraut

machen können, so daß für eine zweite Hauptprojektphase alle Bedingungen gegeben sind, um gezielte Szenarienstudien anzugehen.

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.

Die Ergebnisse sind im Statusbericht der Teilprojekt übergreifenden AG Szenarien in detaillierter Form nachzulesen.

Außerdem war Herr Krol Mitgründer der WAVES-Szenariogruppe in Ceará, siehe Kapitel 2.5.2.

2.4 Diskussion

Die vorliegende Version des integrierten Modells SIM beschreibt erfolgreich die Wirkungskette von globalen Änderungen, Wasserverfügbarkeit, Landwirtschaft und sozialen Vorgängen in Ceará und Piauí. Damit ist eine Vorbedingung für die Durchführung von intern konsistenten Szenarioanalysen erfüllt. 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 (Magalhaes et al. (1988), siehe Kapitel 2.1) annähernd.

Die räumliche Auflösung ist das Munizip und umfaßt das gesamte Untersuchungsgebiet. Die zeitliche Auflösung reicht von einem Tag bis zu einem Jahr mit einem Zeithorizont von ungefähr 50 Jahren.

Die derzeitigen Ergebnisse von SIM sind als vorläufig zu betrachten, da noch nicht bei allen Modulen die endgültigen Versionen der Teilmodelle integriert, sondern teilweise noch durch vereinfachte Darstellungen ersetzt sind.

Dennoch zeigen Sensitivitäts- und Validierungsstudien schon viele interessante Resultate. Beispielsweise, daß die Teilmodelle konsistent miteinander verknüpft sind und keine Lücken vorhanden sind.

Die wichtigsten Anwendungen des Modells sind Szenarioanalysen zur Beschreibung von regionalen Entwicklungsmöglichkeiten, die in Form von Sensitivitätsstudien begonnen wurden.

Auch bietet das Modell einen ausgezeichneten Rahmen für regionale Prozeßstudien die in SIM eingebettet werden können, um den Einfluß auf und die Einflüsse von dem integrierten System auszuwerten.

In der weiteren Arbeit werden zunächst die unvollständigen Teilmodelle implementiert werden.

Weiterhin ist eine möglichst breite Modellvalidierung auf verschiedenen Skalenebenen und an Hand unterschiedlicher Validierungsgrößen durchzuführen. Einen weiteren Schwerpunkt wird das Rechnen der beiden Referenzszenarien bilden, was zum Projektabschluß erfolgt sein wird.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern

2.5.1 Workshops

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

Vom Fachbereich Integrierte Modellierung wurden in der jetzigen Projektphase zwei Workshops zum Thema Integrierte Modellierung organisiert. 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.

Beim ersten Workshop im Dezember 1997 wurde die Protoversion des integrierten Modells präsentiert, womit die erste konkrete Implementierung der Modellkonzepte mit vorläufigen, typischen Ergebnisbeispielen vorlag. Die strategische Planung des Workshops bezweckte, im ersten halben Jahr des Projekts gemeinsam eines der Gesamtziele zu besprechen und das Erreichen dieses Zieles konkret zu planen. Weiterhin wurde für jedes Teilmodell eine Modellskizze präsentiert, wobei auf die Schnittstellen der Modelle besonders geachtet wurde. Speziell wurden das Konzept der Lebensqualität und die Verfügbarkeit räumlich bezogener Daten als zusätzliche wichtige Integrationsstellen diskutiert. Am Ende des Workshops wurde die Planung des Zustandekommens einer ersten kompletten Version des integrierten Modells abgesprochen. Dabei wurde seitens aller Modellierungsgruppen festgesetzt, wann die unterschiedlichen Teilmodelle verfügbar sein würden. Es wurden die Rahmenbedingungen wie inhaltlicher und zeitlicher Aufwand, um diese Teilmodelle danach im integrierten Modell aufnehmen zu können, besprochen.

Bei dem zweiten Workshop, im Januar 1999, wurde der Zwischenstand evaluiert. Strategischer Anlaß des Workshops war der anschließende Aufenthalt von Dr. M.S. Krol für ein Jahr in Fortaleza, was einen intensiven Austausch zur Klärung aller aktuell offenen Fragen notwendig machte. Alle Modellierungsgruppen präsentierten den momentanen Stand sowie die weitere Planung zur Vervollständigung der Modelle. Die dann aktuelle Version des ausgebauten integrierten Modells, eine Teilintegration von Klima, Hydrologie und landwirtschaftlicher Produktion, wurde vorgestellt. Die technischen Probleme der Integration wurden detailliert analysiert. Die verbindliche Zulieferung der Teilmodelle für das integrierte Modell wurde für die Teilmodelle, bei denen die ursprüngliche Planung nicht funktionierte, nochmals geplant. Das betrifft fast alle Beiträge.

2.5.2 Bilaterale Projektaktivitäten

Szenarienaktivität beim Workshop in Fortaleza.

Eines der Ereignisse im Rahmen der Szenarioaktivitäten war die Präsentation und Diskussion der Szenariobeschreibungen in einem bilateralen Projektworkshop im April 1999 in Fortaleza.

Bei diesem Workshop trafen sich Wissenschaftler aus allen Projektbereichen der UFC und der deutschen Projektseite. Neben Vorträgen und Arbeitsgruppen wurde ein Teil des Treffens für die konkrete Integration in Szenarien genutzt. Diese Aktivität war von der Szenariogruppe, insbesondere von Dr. M.S. Krol, organisiert.

Beim Treffen wurde allgemein die Szenariovorgehensweise und die Rolle der Szenarien in WAVES sowie die bearbeiteten Versionen der zwei Referenzszenarien im Plenum vorgestellt. Danach wurden zwei Arbeitsgruppen gebildet, die je eines der Referenzszenarien kritisch diskutierte.

Konkretes Ergebnis dieser Aktivität war eine Erweiterung der Ideen bezüglich der Szenarien. Das galt insbesondere für das Szenario der Dezentralisierung, wo neue Ideen über die Entstehung einer Dezentralisierung einfließen. Ein anderes Ergebnis war das Einleiten einer projektweiten Szenarienaktivität an der UFC.

Gründung Szenariogruppe an der UFC.

Ab Mitte 1999 wurde in Fortaleza eine brasilianische Szenariogruppe aktiv. Diese wurde von Dr. M.S. Krol gegründet. Die meisten der beteiligten Departments der Föderaluniversität von Ceará nehmen daran teil: Prof. Dr. J.C. Araújo, L.A. dos Santos Semrau (Hydraulik), Prof. Dr. V.P. Vidal de Oliveira, Prof. L. Frota Bezerra (Landschaftsökologie), Prof. M.I. de Oliveira Mayorga, Prof. J.C. Vieira Pinheiro (Agrarökonomie). Die Aufgaben dieser Gruppe sind mit denen der deutschen Gruppe eng verflochten. Wegen des späteren Einstiegs dieser Gruppe in die Szenarienkonstruktion liegen die Beiträge eher im Bereich Feinabstimmung und innere Konsistenz der gröberen Vorversionen der Szenarien. Das gilt insbesondere für Ceará und die Herunterinterpretation auf das Munizip Tauá, der Fokusregion in Ceará.

Eine ähnliche Gruppe in Teresina wurde von Dr. J. Herfort (Uni - Hohenheim) geleitet.

Gemeinsame Modellierungsarbeiten.

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. J.W. Ribeiro und seinen Mitarbeitern (Dept. Computação, UFC) wurde die Anwendung von modernen symbolischen Methoden (Formelmanipulation) auf die demografische Modellierung angegangen. Zwischenergebnisse zeigen ein potentielle Möglichkeit, die Langzeitdynamik zu beschreiben.

Die Zusammenarbeit mit Prof. Dr. M.C. Pequeno führte über projektinterne Integration zu einer Umformulierung des technischen Teilprojektes seiner Gruppe und somit zur Anwendung auf einen Optimierungsansatz für Lebensqualitätsbeschreibungen für Tauá (Ceará), der von Prof. Dr. M.I. de Oliveira Mayorga (Dept. Economia Agrícola) bearbeitet wird. Die Diplomarbeit eines Studenten von Prof. Mayorga auf dem Gebiet der Lebensqualität in Tauá wurde von Herrn Krol mitbetreut.

2.5.3 WAVES-Seminar in Brasilien

Eine der wichtigsten Aufgaben von Dr. M.S. Krol bei seinem Aufenthalt in Brasilien (Januar 1999 bis Januar 2000) war das Zustandebringen von konkreten integrativen Aktivitäten durch die brasilianische Projektseite. Neben bilateralen Kontakten mit vielen der brasilianischen Forschungsgruppen ist das Organisieren eines Projektseminars an der UFC ein erfolgreicher Beitrag.

Seit April 1999 wird zweimal pro Monat ein Seminartreffen organisiert, wobei jedesmal ein oder zwei Projektbeteiligte (Professoren und Stipendiaten) vortragen. Auch deutsche Projektbeteiligte, die sich auf einer Dienstreise im Projektgebiet befinden, trugen vor. Das Seminar wird von jeweils ungefähr 15 Teilnehmern aus allen Projektgruppen in Fortaleza gut besucht.

Das Seminar bietet neben dem wissenschaftlich-inhaltlichen Austausch auch Möglichkeiten für die Koordination der Projektarbeiten an der UFC.

2.6 Bibliographie

2.6.1 Eigene Publikationen

- 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.
- Bronstert, A., Güntner, A., Jaeger, A., Krol, M., 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.
- Bronstert, A., Jaeger, A., Güntner, A., Hauschild, M., Döll, P., Krol, M. (2000): Integrated modeling of water availability and water use in the semi-arid Northeast of Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth* (in press). Complete document: http://www.PIK-Potsdam.DE/~axel/haag_pap.pdf
- Krol, M.S. und Bronstert, A. (1997): Final report on the pre-phase and interim funding period of WAVES, Sub-project Integrated Modelling, PIK, Potsdam.

2.6.2 Zitierte Literatur

- 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 (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.
<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/README.html>

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 http://www.mercator.geog.fu-berlin.de/~erosion/diss_pdf.html

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

Hauptergebnisse der für die erste Projektphase geplanten Arbeiten sind die Bereitstellung eines integrierten Modells, von gemeinsam erstellten integrierten Szenarien sowie eine Modellanalyse der aufgestellten Szenarien.

Die ursprüngliche Planung wurde mit der Erstellung des integrierten Modells SIM und den Referenzszenarien (siehe Statusbericht der AG Szenarien) prinzipiell eingehalten.

Einige Teilmodule konnten bisher noch nicht vollständig in das integrierte Modell implementiert werden, da sie nicht rechtzeitig zur Verfügung standen. Sie wurden aber schon im Rahmen des integrierten Modells getestet, und es wurden Schnittstellen mit sonstigen Modulen aufgebaut. Somit wird eine erfolgreiche Integration in den nächsten Monaten erwartet.

Sie sind vorläufig durch vereinfachte Darstellungen ersetzt und werden erst zum Ende der ersten Hauptphase vollständig integriert werden. Das betrifft die Vervollständigung der verschiedenen Sektoren der Wassernutzung (Industrie und Tourismus), die erweiterte Definition der Lebensqualität, die direkte Kopplung mit einer voll funktionsfähigen Version des agrarökonomischen Modells RASMO und die bezüglich einiger Prozeßbeschreibungen verbesserte Version von HYMO-WA.

Die Einbindung der Bodeneigenschaften in HYMO-WA verzögerte sich durch die verspätete Bereitstellung der Bodendaten aus der SOTER-Klassifikation, wobei aus diesem Fachbereich bei der Vervollständigung der Daten und deren Auswertung mitgearbeitet wurde, da sie für die konsistente Kopplung des Bodenwasserhaushaltes mit den Ertragsberechnungen wichtig sind.

Da das Modell noch nicht für alle Teilbereiche aussagekräftig ist, konnten die Referenzszenarien noch nicht analysiert werden. Dies wird aber zum Projektende erfolgt sein.

Der verspätete Projektbeginn und interne Umstellungen der brasilianischen WAVES-Gruppe verursachten das Aussteigen der ursprünglich genannten Partner an der UFBA und FUNCEME. Dafür besteht nun eine intensive Zusammenarbeit mit den neuen Projektpartnern Prof. Calvacante und Prof. Ribeiro von der Abteilung Wissenschaftliches Rechnen und Prof. Araújo von der Abteilung Hydraulik der UFC.

Zum Ende der ersten Hauptphase wird eine in sich konsistente, alle wichtigen Zusammenhänge zwischen Klima, Hydrologie, Wassernutzung, Agrarproduktion, Agrarökonomie und einige gesellschaftliche Prozesse berücksichtigende Modellversion bereitstehen. Die Referenzszenarien werden damit gerechnet und analysiert sein.

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

Die Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Dept. Fortaleza, machte 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.