

PIK Report

No. 89

REGIONALE INTEGRIERTE MODELLIERUNG
DER AUSWIRKUNGEN
VON KLIMAÄNDERUNGEN AM BEISPIEL
DES SEMI-ARIDEN NORDOSTENS
VON BRASILIEN

Annekathrin Jaeger



POTSDAM INSTITUTE
FOR
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

Eingereicht als Dissertation
an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Potsdam im Oktober 2003

Autor:
Dr. Annekathrin Jaeger
E-mail: Annejaeger@gmx.net

Ansprechpartner:
Prof. Axel Bronstert
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
PF 60 12 03, D-14412 Potsdam
Tel.: +49-331-288-2531
Fax: +49-331-288-2695
E-mail: bronstert@pik-potsdam.de

Herausgeber:
Dr. F.-W. Gerstengarbe

Technische Ausführung:
U. Werner

POTSDAM-INSTITUT
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG
Telegrafenberg
Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam
GERMANY
Tel.: +49 (331) 288-2500
Fax: +49 (331) 288-2600
E-mail-Adresse: pik@pik-potsdam.de

Abstract

Semi-arid regions are characterized by a high degree of water scarcity. An increasing water demand due to population growth and economic development and a decrease in interannual precipitation rates due to Global Climate Change may aggravate water scarcity in the future, which poses the risk of worsening the already poor living conditions in these regions.

An assessment of likely impacts of Global Climate Change requires integrated studies, that analyse the complex mechanisms and feed-backs between natural and human systems in semi-arid-regions and quantify impacts, best by using integrated dynamic models. Such a study was carried out by the joint Brazilian-German research project WAVES taking the semi-arid Northeast of Brazil as an example. One main result was the *Semi-arid Integrated Model SIM*. For the first time, the model allows for a comprehensive modelling of the complete causal chain of Climate Change, water availability, agricultural production and quality of life/migration including feed-backs from a dynamic, quantitative and geographically explicit point of view.

SIM is a deterministic integrated model, that computes discrete. It is composed of several dynamically combined sub-modules. External driving forces are included via scenario assumptions. Calculations are possible on several spatial scales for a time horizon up to 50 years. This thesis made an in-depth contribution to the model development, analysed model uncertainties with the use of sensitivity and uncertainty analysis and performed integrated scenario analysis.

Model application generally results in good model performance when comparing the simulation results with observed empirical data. Crop yields and agricultural production as well as the size of population or hydrological behaviour in the region are being well represented by the model. This confirms the adequacy of the chosen modelling approach.

Using the methods of sensitivity and uncertainty analysis, uncertainties in input data, model parameter and model structure were scrutinized. Especially, simulation results for irrigated crop yields, changes in irrigation areas or changes in migration processes are charac-

terised by a high degree of uncertainty. Climate and soil reduction factors exhibit major spatial influences on irrigated crop yields. Impacts of parameter variations mostly decrease for variables that are not directly related to the origin source within the causal chain. The coupling of sub-modules is of great importance for the behaviour of certain variables.

Simulations with two climate scenarios proved a high regional sensitivity and vulnerability to impacts of Global Climate Change. Significance of impacts is found after 2025 only. Both for the scenarios with an increase and a decrease of trends in precipitation, water stress continues to be a major problem, leading to lower water availability and thus worsening living conditions in the region. Within the scenario based on the assumption of a precipitation decrease, strong losses of crop yields and a substantial higher rate of migration are visible compared to the scenario based on the assumption of a precipitation increase.

In order to assess the likely impacts of socio-economic development strategies, simulations with two reference scenarios were computed. Development strategies such as the extension of large reservoirs and potential irrigated areas are confronted with limits of efficiency gains due to the prevailing water scarcity in the region. Agricultural GDP increases in the scenario describing a higher extension of potential irrigated areas, but migration continues to increase. The results indicate that all regional development strategies are tightly restricted by the general natural conditions of the region and the maintaining high importance of the agricultural sector. Impacts of Global Climate Change may reinforce these restrictions which refers to the need for careful long-term planning of regional development.

Generally, SIM reasonably well represents both the complex dynamics of the system investigated and the likely impacts of Global Climate Change. Therefore, the model can serve as a valuable instrument for assessing the potential of different strategies for enhancing the adaptability of the region to the impacts of Global Climate Change. However, the inclusion of a macro-economic sub-module and a better description of the feed-back mechanisms between life quality and migration could still improve the model's capabilities.

Studierzimmer

Dissertation: Ich bin ein Teil von jener Kraft,
 Die stets das Böse will und
 stets das Gute schafft.
Anne: Wohl an. Jetzt glaub' ich's Dir.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen des deutsch-brasilianischen Verbundprojektes WAVES (*Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid North-east of Brazil*) am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung entstanden. Das Projekt wurde aus Fördermitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) auf deutscher und aus Fördermitteln des Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) auf brasilianischer Seite finanziert. Die Arbeit wurde lange Zeit durch das Hochschulsonderprogram HSP3 des Landes Brandenburg gefördert.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den vielen Menschen bedanken, die zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben:

Prof. Dr. Martin Claußen, der trotz knapper Zeitressourcen zusagte, Erstgutachter der Arbeit zu sein.

Prof. Dr. Axel Bronstert, der nicht nur das Zweitgutachten übernahm, sondern mich auch während der Fertigstellung der Arbeit mit detaillierten Kommentaren und vielen sonstigen Hilfestellungen sehr unterstützte. Er hat das Modell von den Kinderschuhen der Entwicklung an mit Rat und Tat begleitet.

PD Dr. Petra Döll, die das Drittgutachten der Arbeit übernommen hat. Ihrer stets engagierten Arbeit im WAVES-Projekt verdanke ich viele Anregungen, die in diese Arbeit einfließen.

Das *Semi-Arid Integrated Model (SIM)* wurde in der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung entwickelt. Dr. Maarten Krol hat als Leiter der Arbeitsgruppe den Prozess der Modellerstellung maßgeblich geprägt.

Viele Teilmodule des Modells wurden von Projektpartnern entwickelt. Ohne sie gäbe es das Modell nicht. Besonders zu danken habe ich: Petra Döll, Andreas Döring, Dagmar Fuhr, Thomas Gaiser, Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, Andreas Güntner, Maike Hauschild, Holger Hinterthür, Sabine Höynck und Peter C. Werner.

Die Zusammenarbeit bei der Entwicklung der Szenarien hat sehr viel Spass gemacht. Ich danke herzlichst den Mitgliedern der Szenarienarbeitsgruppe: Petra Döll, Dagmar Fuhr, Thomas Gaiser, Joachim Herfort, Sabine Höynck, Maarten Krol, Christoph Külls, Mario Mediondo, Andreas Printz und Susanne Voerkelius.

Nicht zuletzt gehört großer Dank meiner Familie, meinen Freunden und Bekannten. Mein Vater war unschätzbar als Motivator und Ratgeber. Dafür bin ich ihm zu tiefsten Dank verpflichtet. Und außerdem gibt es noch Axel...

Potsdam, Oktober 2003 | Annekathrin Jaeger

Inhalt

Abbildungen	XI
Tabellen	XV
Zusammenfassung	XVII

KAPITEL 1 Einleitung

1.1	Problembeschreibung	1
1.2	Ansatz und Ziele	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3

KAPITEL 2 Integrierte Modellierung

2.1	Integrierte Forschung	5
2.2	Integrierte Modellierung	7
2.2.1	Grundlagen	7
2.2.2	Entwicklung der integrierten Modellierung	9
2.2.3	Schlussfolgerungen für die vorliegende Arbeit	12

KAPITEL 3 Systembeschreibung

3.1	Die Bundesstaaten Ceará und Piauí im Überblick	13
3.2	Klima	14
3.3	Hydrologie	16
3.3.1	Wasserverfügbarkeit	16
3.3.2	Wassernutzung und -management	17
3.4	Naturräumliche Grundlagen	20
3.4.1	Geologie	20
3.4.2	Natürliche Vegetation	20
3.5	Ökonomie	21
3.5.1	Gesamtwirtschaftliche Rahmendaten	21
3.5.2	Agrarökonomische Rahmendaten	22
3.6	Landwirtschaft	24
3.6.1	Ackerbaukulturen und Anbaumethoden	24
3.6.2	Strukturverteilung im Agrarsektor	25
3.6.3	Hauptprobleme der Landwirtschaft	26
3.7	Soziokultureller Rahmen	27

3.7.1	Demographie	27
3.7.2	Migration	27

KAPITEL 4 Modellbeschreibung des Semi-arid Integrated Model (SIM)	31
--	-----------

4.1	Modellentwicklung	31
4.2	Modellstruktur	33
4.2.1	Skalen des Modells	33
4.2.1.1	Räumliche Skalen	33
4.2.1.2	Zeitliche Skalen	34
4.2.2	Aufbau des Modells	34
4.3	Teilmodule	36
4.3.1	Klimamodul	36
4.3.2	Hydrologisches Modul	36
4.3.3	Landwirtschaftliches Modul	38
4.3.4	Soziologisches Modul	40
4.4	Detaillierte Beschreibung einzelner Modelle	41
4.4.1	YES (Yield Estimation)	41
4.4.2	Kopplung: Wassernutzung und Wasserverfügbarkeit	45

KAPITEL 5 Validierung	47
------------------------------	-----------

5.1	Validierungskonzept	47
5.2	Analyse der Daten zur Validierung	50
5.2.1	Landwirtschaft	50
5.2.2	Hydrologie	53
5.2.3	Demographie	53
5.3	Vergleich der Simulationsergebnisse mit historischen Daten	53
5.3.1	Landwirtschaft	54
5.3.1.1	Zeitlicher Verlauf von Ertrag und Produktion	54
5.3.1.2	Räumliche Validierung von Ertrag und Produktion	60
5.3.2	Hydrologie	65
5.3.3	Demographie	66

KAPITEL 6 Modellanalysen (Sensitivität und Unsicherheit) und Modellanwendungen	69
---	-----------

6.1	Einführung	69
6.2	Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen	69
6.2.1	Zweck und Methodik	69
6.2.2	Landwirtschaft	71
6.2.2.1	Wasserstress	71

6.2.2.2	Aussaattermin	73
6.2.2.3	Bodenreduktionsfaktoren	75
6.2.2.4	Bewässerung	76
6.2.2.5	Räumliche Einflüsse auf die Erträge	82
6.2.3	Hydrologie	83
6.2.3.1	Kopplung Wassernutzung und Wasserverfügbarkeit	83
6.2.3.2	Auswirkung der Änderungen wichtiger Parameter	85
6.2.4	Soziologie	86
6.2.5	Einfluss der Anfangsbedingungen	88
6.2.6	Charakterisierung der Klimaszenarien	90
6.2.7	Auswirkungen der Klimaszenarien	92
6.2.7.1	Hydrologie	93
6.2.7.2	Landwirtschaft	95
6.2.7.3	Sozio-ökonomische Entwicklung	98
6.3	Referenzszenarien	99
6.3.1	Charakterisierung der Referenzszenarien	99
6.3.2	Auswirkungen der Referenzszenarien	102
6.3.2.1	Hydrologie	102
6.3.2.2	Landwirtschaft	104
6.3.2.3	Sozio-ökonomische Entwicklung	105

KAPITEL 7 Fazit **107**

7.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	107
7.1.1	Modellzweck	107
7.1.2	Modellkonzept	107
7.1.3	Modellvalidierung	108
7.1.4	Modellanalyse	110
7.1.5	Modellanwendungen	111
7.1.5.1	Klimaszenarien	111
7.1.5.2	Referenzszenarien	112
7.1.5.3	Schlussfolgerungen für die Region	113
7.1.6	Gesamtbewertung des Modells	114
7.2	Ausblick	114
7.2.1	Erweiterung und Verbesserung des Modells	114
7.2.2	Übertragbarkeit des Modells	116

Literatur **117**

Anhang

Abbildungen

Abb. 3.1	Das „poligono das secas“ in Nordostbrasilien	13
Abb. 3.2	Schematische Darstellung der großräumigen Zirkulationsverhältnisse im tropischen Atlantik	15
Abb. 3.3	Niederschlag, potentielle Verdunstung (berechnet nach Penman-Monteith), Verhältnis zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung	16
Abb. 3.4	Verteilung der Vegetationsformen innerhalb des Untersuchungsgebietes.	20
Abb. 3.5	Historische Entwicklung des BIP [10^6 US\$1995] von Brasilien, Ceará und Piauí	21
Abb. 3.6	BIP pro Sektor	22
Abb. 3.7	Preisentwicklung der Produzentenpreise von Bohnen in Ceará und Piauí.	23
Abb. 3.8	Einteilung der Munizipien in vier Regionen, die hinsichtlich der landwirtschaftlichen Nutzung ähnlich sind	24
Abb. 3.9	Relativer Anteil der Anbauflächen verschiedener in Ceará angebaute Kulturpflanzen	24
Abb. 3.10	Relativer Anteil des Produktionswertes verschiedener in Ceará angebaute Kulturpflanzen	25
Abb. 3.11	Entwicklung der Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe und Betriebsflächen in Ceará und Piauí 1950 - 1995	25
Abb. 3.12	Entwicklung der Betriebsgröße und Betriebsflächen für verschiedene Größenklassen in Ceará und Piauí 1950-1995	26
Abb. 3.13	Durchschnittliches pro Kopf Einkommen in Salario Minimo (1991) in verschiedenen Regionen (inflationsbereinigt)	28
Abb. 4.1	Systemstruktur für die integrierte Modellierung	32
Abb. 4.2	Darstellung der Szenarioregionen	34
Abb. 4.3	Einordnung der Teilmodelle (Vordergrund) in die zuvor erarbeitete Systemstruktur	35
Abb. 4.4	Struktur des Ertragsmodells YES. Einflüsse auf die modellierten Erträge und Produktionen sowie Kopplung zu anderen Teilmodellen	42
Abb. 4.5	Gesamte Erntefläche von 11 der im Modell betrachteten Pflanzen in Ceará und geschätzte Anbaufläche	43
Abb. 5.1	Schema der Modellentwicklung mit Positionierung der operationellen, konzeptuellen und Datenvalidierung	48
Abb. 5.2	Erträge für Maniok (blau) und die jeweils beste Regression für Daten vor und nach 1973	52
Abb. 5.3	Vergleich der Erntefläche, der Anbaufläche und der berechneten Anbaufläche in Ceará für 12 Kulturpflanzen	52
Abb. 5.4	Vergleich erhobener (PAM bzw. SEPA) und simulierter Erträge für den Zeitraum 1947-1998 bzw. 1975-1998 für die beiden Bundesstaaten	58
Abb. 5.5	Vergleich erhobener (PAM bzw. SEPA) und simulierter Produktionen für ausgewählte Pflanzen für den Zeitraum 1947-1998 bzw. 1975-1998 für die beiden Bundesstaaten	59
Abb. 5.6	Vergleich der simulierten Produktionen mit den erhobenen Daten (PAM) in den Szenarioregionen. Mittelwerte für 1975-1998	61
Abb. 5.7	Produktion von Bohnen und Reis für den Zeitraum von 1975-1998, Vergleich simulierter und gemessener Daten (PAM)	63
Abb. 5.8	Jährliche Reis- und Bananenerträge, gemittelt über einen Zeitraum von 1975-1998, Vergleich simulierter und gemessener Daten (PAM)	64
Abb. 5.9	Vergleich von gemessenen Daten (blau) und Simulationsdaten (rot) für Abflüsse, gemessen an den Stationen Arneiroz, Croatá, Peixe Gordo und Iguatú.	65
Abb. 5.10	Ergebnisse der Validierung des Vergleichs der simulierten mit den Daten der IBGE. a) Entwicklung der Bevölkerungsverteilung in verschiedenen Regionen, b) gesamte Bevölkerung beider Bundesstaaten, c) Einwohner, die in Piauí bzw. Ceará geboren sind, aber in anderen Bundesstaaten leben, d) Entwicklung einzelner Altersgruppen der Bevölkerung.	68

Abb. 6.1	Auswirkungen der Variation des Termins zur Pflanzenaussaat auf die Erträge von Bohnen, Reis, Tomaten und Kokosnuss, gemittelt über Bundesstaaten	75
Abb. 6.2	Auswirkungen der Vernachlässigung von Bodenreduktionsfaktoren auf die Erträge von Bohnen.	76
Abb. 6.3	Auswirkungen der Variation des Parameters b_w um ± 3 im Vergleich zu einem Standardwert (normal), der die Entwicklung der Größe der bewässerten Flächen pro Pflanze beschreibt	78
Abb. 6.4	Vergleich der bewässerten und unbewässerten Erträge und Einfluss auf den Gesamtertrag und die Produktion am Beispiel von Bananen, Mais, Tomaten und Reis	80
Abb. 6.5	Der Indikator q_{irr} gibt an, inwieweit der Bewässerungsbedarf während der Trockenzeit erfüllt wird. Gezeigt werden Änderungen [%] zwischen Modelllauf mit und einem Modelllauf ohne Reduzierung der potentiellen auf die aktuelle Bewässerungsfläche. Mittelwerte über die Jahre 1960-1980.	81
Abb. 6.6	Räumliche Einflüsse auf die Erträge	82
Abb. 6.7	Räumliche Korrelationskoeffizienten. Vier Modellläufe, bei denen jeweils unterschiedliche Faktoren (1-4), die die Erträge räumlich beeinflussen, mit einbezogen worden.	83
Abb. 6.8	Unterschiede zwischen der gekoppelten und ungekoppelten Version für die Simulation der gespeicherten Volumina der Stauseen eines Beispielmunizips (Iguatú).	84
Abb. 6.9	Unterschiede zwischen der gekoppelten und ungekoppelten Version. Volumen des entnommenen Wassers aller Quellen eines Beispielmunizips (Iguatú).	84
Abb. 6.10	Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung verschiedener Variablen von den Anfangsbedingungen. Vergleich der zu unterschiedlichen Zeitpunkten gestarteten Simulationen mit einem Modelllauf von 1921-1998.	89
Abb. 6.11	Simulation des regionalen Niederschlags im semi-ariden Nordosten von Brasilien im Zeitraum 1961 bis 1990 in sieben GCMs (IPCC-DDC, 1999) im Vergleich mit beobachteten Daten (NEW ET AL., 1999)	90
Abb. 6.12	Jährlicher Niederschlag [mm] in Ceará und Piauí. Historische Daten (1921-1998) und Szenariendaten (1999-2050) basierend auf GCM Läufen.	92
Abb. 6.13	Änderungen des Niederschlags in den verwendeten Klimaszenarien. Trend über eine Periode von 50 Jahren (2001-2050).	92
Abb. 6.14	Hydrologische Auswirkungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation mit Eingabedaten entsprechend des Referenzszenarios A (vgl. Kapitel 6.3) und verschiedener Klimaszenarien. a) Abfluss an der Mündung des Flusses Jaguaribe b) gespeichertes Wasser in grossen Stauseen am Ende der Regenzeit. c) Volumen des gesamten entnommenen Wassers. d) Erfüllung des Wasserbedarfs verschiedener Sektoren während der Trockenzeit.	94
Abb. 6.15	Landwirtschaftliche Auswirkungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation mit Eingabedaten entsprechend des Referenzszenarios A (vgl. Kapitel 6.3) und der ECHAM- und HADCM-Klimaszenarien sowie des konstanten Klimaszenarios. a) Änderungen des Trends [%] von Erträgen von Mais, b) Zahl der Munizipien mit hohen Ernteverlusten (Gesamtzahl 332), c) Anteil der genutzten Bewässerungsfläche bezüglich der potentiell zur Verfügung stehenden Fläche, d) Produktion bewässert angebauter Baumwolle, e) Ertrag unbewässert angebauter Bohnen	97
Abb. 6.16	Hydrologische Auswirkungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation mit Eingabedaten entsprechend des Referenzszenarios A (vgl. Kapitel 6.3) und der ECHAM- und HADCM-Klimaszenarien sowie des konstanten Klimaszenarios: Anzahl der Migranten aus dem Sertão und Einfluss der Nothilfeprogramme, die ab 2001 gestartet werden.	99
Abb. 6.17	Auswirkungen der unterschiedlichen Referenzszenarien im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation der Referenzszenarien A und B (vgl. Kapitel 6.3.1) mit dem Klimaszenario ECHAM: a) gespeichertes Wasser in großen Stauseen ($> 50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) zum Ende der Regenzeit, b) Wasserentnahme, c) Erfüllung des Wasserbedarfs der Bewässerungslandwirtschaft, d) Anteil der potentiell bewässerten Anbauflächen, die tatsächlich benutzt werden.	103
Abb. 6.18	Gespeichertes Volumen großer Stauseen in Ceará. Unterschied zu einer Simulation, in der nur der Stausee Casthanaõ gebaut wird. Vergleich zwischen dem Beibehalt der Investitionskosten und der Halbierung der selbigen.	104

Abb. 6.19 Auswirkungen der unterschiedlichen Referenzszenarien im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation der Referenzszenarien A und B (vgl. Kapitel 6.3.1) mit dem Klimaszenario ECHAM: a) Bewässerte Produktion von Kokosnüssen, b) Anzahl der Munizipien mit mehr als 60% Ernteverlust, die Gesamtzahl beträgt 332, c) Bevölkerung im Hinterland, d) Kumulative Migration für die Regionen im Untersuchungsgebiet 106

Abbildungen im Anhang

Abb. A1.1: Die Bundesstaaten Ceará und Piauí.

Abb. A4.1: Verbindung von SIM und RASMO

Abb. A4.2: Struktur des Programms des Semi-Arid Integrated Model SIM.

Tabellen

Tabelle 3.1:	Infrastruktur der Wasserversorgung in Ceará und Piauí (HYDROISOTOP, 2002).	18
Tabelle 3.2:	Prozentuale Verteilung der Flächennutzung in Piauí und Ceará (IBGE, 1998a, 1998b)	20
Tabelle 3.4:	Beschäftigte nach Wirtschaftssektoren 1992 und 1996 [%], IBGE(1998a, 1998b)	22
Tabelle 3.3:	Bruttoinlandsprodukt (BIP) für Ceará und Piauí 1995 (SUDENE, 1996)	22
Tabelle 3.5:	Außerhalb der Region lebende Einwohner nordöstlicher Herkunft im Vergleich zur Bevölkerungsentwicklung	30
Tabelle 4.1:	Parameter ax. Entnahme von weniger Wasser, wenn für eine Anzahl ax von Tagen der tägliche Wasserbedarf nicht mehr gedeckt ist	46
Tabelle 5.1:	Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte m (in kg außer: Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchten) und der zeitlichen Korrelation der simulierten mit gemessenen jährlichen Produktionsdaten für Ceará.	56
Tabelle 5.2:	Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte m (in kg/ha bzw. Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchten/ha), Variationskoeffizienten V und der zeitlichen Korrelation R der simulierten mit gemessenen jährlichen Ertragsdaten für Ceará.	56
Tabelle 5.3:	Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte m (in kg bzw. Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchten) und der zeitlichen Korrelation der simulierten mit gemessenen jährlichen Produktionsdaten für Piauí.	57
Tabelle 5.4:	Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte m (kg/ha bzw. Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchte/ha), Variationskoeffizienten V und der zeitlichen Korrelation R der simulierten mit gemessenen jährlichen Ertragsdaten für Piauí.	57
Tabelle 5.5:	Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Korrelationskoeffizient der simulierten jährlichen Erträge und der Produktion zwischen gemessenen und simulierten Daten auf der Ebene der Munizipien, gewichtet mit der jeweiligen Anbaufläche pro Munizip.	61
Tabelle 6.1:	Unsicherheitsanalyse für den Zeitraum von 1947 bis 1995 bzw 1975 bis 1998 für Ceará und Piauí. Verglichen werden drei Variablen: der langjährige Mittelwert (in kg/ha), die Standardabweichung (in kg/ha) und die Korrelation mit statistischen Daten (SEPA bzw. PAM). Für diese Variablen wird jeweils der Mittelwert (m), die Standardabweichung (stdev) und der Variationskoeffizient (V) gezeigt.	72
Tabelle 6.2:	Beiträge der Parameter zur Unsicherheit in den mittleren Pflanzenerträgen für Ceará und Piauí. R ² zeigt die Korrelation einer linearen Regression der Ergebnisse.	73
Tabelle 6.3:	Beiträge der Parameter zur Unsicherheit in der Standardabweichung der jährlichen Pflanzenerträge und zur Korrelation mit empirischen Daten (PAM) für Piauí.	74
Tabelle 6.4:	Sensitivitätskoeffizienten bezüglich der Variation des Parameters 'seeding-date' auf die Pflanzenerträge.	75
Tabelle 6.5:	Räumliche Korrelation auf der Ebene der Munizipien der simulierten Erträge, Läufe mit und ohne Bodenparameter im Vergleich.	76
Tabelle 6.6:	Sensitivitätskoeffizienten bezüglich des Parameters bw. Auswirkung der Änderungen des Parameters auf Mittelwert und Korrelationskoeffizient der Erträge bzw. Mittelwert des Agrar-BIP, Gesamt-BIP und Migration aus dem Sertão.	79
Tabelle 6.7:	Änderung der jährlichen bewässerten Erträge von Kulturpflanzen über den Zeitraum 1960-1980 [%] durch Nutzung der gesamten potentiellen Bewässerungsfläche	81

Tabelle 6.8:	Sensitivitätskoeffizienten der Auswirkungen einer Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit um den Faktor 10 (ks+) bzw 0.1 (ks-) sowie der Wurzeltiefe um den Faktor 1.5 (z+) und 0.5 (z-) für den Zeitraum 1960-1998. Dargestellt sind die Auswirkungen auf den mittleren jährlichen Abfluss, das gespeicherte Volumen grosser Stauseen zu Beginn der Trockenzeit, den bewässerten Ertrag und die Produktion von Tomaten, die Migration sowie das Agrar-BIP von Ceará und Piauí.	85
Tabelle 6.9:	Vergleich der Ergebnisse von SIM und WASA. Änderung des Abfluss in Ceará [%] durch Variation der Parameter ks und z um den Faktor 0.10 und 10 bzw. 0.5 und 1.5.	86
Tabelle 6.10:	Unsicherheitsanalyse für den Zeitraum von 1921-1998 für Ceará und Piauí. Verglichen werden Mittelwert und Standardabweichung von fünf Variablen: Agrar-Einkommen [R\$/c], Migration, Gesamt-Einkommen [R\$/c], Gesamt-BIP [R\$] und die Erfüllung des Bewässerungswasserbedarfs in der Trockenzeit.	87
Tabelle 6.11:	Beiträge der Parameter zur Unsicherheit in den Mittelwerten der Ergebnisse des demographischen Modells (vgl. Tab. 6.10). R ² zeigt die Korrelation einer linearen Regression der Ergebnisse.	88
Tabelle 6.12:	Trends [%] der Änderungen der Erträge und Produktion der unbewässert und bewässert angebauten Pflanzen. Vergleich der Simulationen von zwei Klimaszenarien über den Zeitraum 2001-2050.	96
Tabelle 6.13:	Trend der Änderungen der bewässerten Erträge und der Produktion für zwei Referenzszenarien für den Zeitraum 2001-2025.	105
Tabelle A2.1:	Überblick über die zur Validierung und in der Analyse zur Validierung genutzten landwirtschaftlichen Daten. Weiterhin sind die zur Abschätzung der bewässerten Fläche genutzten Daten aufgeführt. (vgl. Kapitel 5.2.1)	
Tabelle A3.1:	Überblick über die zur Validierung genutzten demographischen Daten und ihre Quellen.	
Tabelle A4.1:	Die wichtigsten Aufgaben der einzelnen Unterprogramme des Semi-Arid Integrated Model SIM.	
Tabelle A4.2:	Überblick über die Teilmodelle (zur Definition der vgl. Kapitel 4.3) hinsichtlich ausgewählter Kriterien wie Skala, Programmiersprache, Realisierung.	

Zusammenfassung

Semi-aride Regionen sind durch knappe Wasserressourcen und steigenden Wasserbedarf aufgrund von Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum gekennzeichnet. Ein klimabedingter Rückgang der Niederschläge kann zu einer weiteren Verschlechterung der Lebensbedingungen und der Lebensqualität in diesen Regionen führen, die durch hohe Unterentwicklung und Armut charakterisiert sind.

Die Untersuchung möglicher Auswirkungen der Klimaänderung erfordert integrierte Studien, die die komplexen Mechanismen und Wechselwirkungen von Natur und Gesellschaft in semi-ariden Regionen analysieren und Auswirkungen der Klimaänderung mit Hilfe von integrierten Modellen quantifizieren. Eine solche Studie wurde von dem deutsch-brasilianischen Verbundprojekt WAVES für den semi-ariden Nordosten Brasiliens durchgeführt. Dabei wurde das Semi-Arid Integrated Model SIM entwickelt. Das Modell ermöglicht erstmals eine dynamische, quantitative und geographisch explizite Beschreibung des Wirkungsgeflechts Klimaänderung-Wasserverfügbarkeit-Landwirtschaft-Lebensqualität/Migration einschließlich möglicher Rückkopplungen.

SIM ist ein deterministisches und modular aufgebautes integriertes Modell, das diskret rechnet und mehrere disziplinäre Teilmodelle in einer dynamischen Betrachtungsweise miteinander verbindet. Externe treibende Kräfte gehen dabei als Szenarioannahmen ein. Das Modell ermöglicht Berechnungen auf mehreren räumlichen Skalen über einen Zeitraum von bis zu 50 Jahren. Die vorliegende Arbeit trug maßgeblich zur Erstellung des Modells bei, analysierte das Modell mit Hilfe von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen und führte Szenarioanalysen für die Untersuchungsregion durch.

Der Vergleich der simulierten Modellergebnisse mit erhobenen historischen Daten für das Untersuchungsgebiet bestätigt grundsätzlich die Qualität und Eignung des Modellierungsansatzes. Für die Darstellung der landwirtschaftlichen Erträge und Produktion auf Bundes- und regionaler Ebene, die Abbildung der Gesamtbevölkerung und die Erfassung des hydrologischen Verhaltens im Untersuchungsgebiet ergeben sich gute Übereinstimmungen.

Mit Hilfe von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen wurden Unsicherheiten in den

Eingabedaten und Parametern sowie in der Modellstruktur umfassend analysiert. Als besonders unsicher erweisen sich die Simulationsergebnisse zu den bewässert angebauten Pflanzen, zu der Änderung von Bewässerungsflächen der Landwirtschaft und zu den Migrationsprozessen. Die größten räumlichen Einflüsse auf die Erträge haben Klima und Bodenreduktionsfaktoren. Auswirkungen von Parametervariationen sind für die im Wirkungsgeflecht entfernteren Variablen zumeist schwächer. Kopplungen zwischen Teilmodellen weisen einen großen Einfluss auf.

Simulationen mit zwei Klimaszenarien zeigen eine hohe Sensitivität der Region gegenüber Klimaänderungen, deren Auswirkungen mittelfristig ab dem Jahr 2025 sichtbar werden. Sowohl für einen Anstieg als auch einen Rückgang der Niederschläge zeigt sich, dass die Wasserknappheit nicht verschwindet und die geringe Wasserverfügbarkeit als restriktive Einflussgröße der Lebensbedingungen in der Region bestehen bleibt. Im niederschlagsärmeren Szenario kommt es zu deutlich negativeren Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Erträge und die Migration als im niederschlagsreicheren Szenario.

Simulationen mit zwei Referenzszenarien zur Einschätzung der Auswirkungen sozio-ökonomischer Entwicklungen verdeutlichen, dass Strategien des Ausbaus von Stauseen und landwirtschaftlichen Bewässerungsflächen aufgrund der steigenden Wasserknappheit relativ rasch an Effizienzgrenzen stoßen und trotz höherem Agrar-BIP die Migration steigt. Die natürlichen Rahmenbedingungen und die Dominanz der Landwirtschaft setzen jeder Regionalentwicklungsstrategie enge Grenzen. Eine Klimaänderung kann hierauf verstärkend wirken, was eine langfristige Planung erfordert.

Insgesamt bildet SIM die komplexe Dynamik des Systems und die Auswirkungen der Klimaänderungen gut ab. Das Modell kann dazu beitragen, Maßnahmen zu testen, die auf eine höhere Anpassungsfähigkeit semi-arider Regionen gegenüber den Auswirkungen der Klimaänderung abzielen. Eine Modellerweiterung um den Bereich der Makroökonomie und eine detaillierte Erfassung der Wechselwirkungen von Lebensqualität und Migration würden den Erklärungshorizont des Modells weiter steigern.

Einleitung

Kapitel

1

1.1 Problembeschreibung

Dass ein weltweiter Wandel des Klimas stattfindet, ist mittlerweile nahezu unbestritten. Ebenso unbestritten ist die Annahme, dass sich mit einer möglichen Klimaänderung weitreichende Folgewirkungen auf der regionalen Ebene etwa in Form von höheren oder niedrigeren Niederschlägen, längeren Trockenzeiten und Dürren oder Überschwemmungen verbinden können, die sich erheblich auf die Lebensbedingungen und Lebensqualität sowie auf die Stabilität von Ökosystemen auswirken können (IPCC, 2001).

Obwohl die Auswirkungen des Klimawandels je nach Region verschieden ausfallen, kann vermutet werden, dass semi-aride Regionen, die ca. ein Drittel der Erdoberfläche bedecken und in denen ca. 20% der Erdbevölkerung wohnt, besonders betroffen sein werden (GAISER ET AL., 2003A). Viele dieser Regionen weisen einen hohen Grad an Unterentwicklung und Armut auf. Weite Teile der Bevölkerung leben von der Landbewirtschaftung, die durch die geringe und sehr variable Verfügbarkeit von Wasser erschwert wird und dadurch von den klimatischen Rahmenbedingungen stark abhängig ist (UNEP, 2003).

Der Wasserknappheit steht eine gleichzeitig steigende Nachfrage nach Wasser aufgrund von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum gegen-

über. Sollte es klimabedingt zu einem Rückgang der Niederschläge und daraus folgend zu vermehrten Dürren und zur stärkeren Erosion oder Degradation von Böden kommen, würde dies die ohnehin schon schwierigen Rahmenbedingungen gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Entwicklung in diesen Gebieten erheblich erschweren.

Traditionelle Kenntnisse und Praktiken, mit Dürren umzugehen, stellen nach gegenwärtigem Kenntnisstand keine ausreichende Grundlage für erfolgreiche Adaptionsstrategien dar; sie vermögen die negativen Auswirkungen vermehrter Dürreperioden allenfalls zu vermindern, nicht aber vollständig zu kompensieren. Ebenfalls fehlen oft die Mittel und Kapazitäten für problemgerechte Adaptionsstrategien. Somit ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass sich klimabedingt die Lebensbedingungen der lokalen Bevölkerung in semi-ariden Gebieten verschlechtern werden (IPCC, 2001).

Eine solche Entwicklung beinhaltet vor allem die Gefahr einer weiteren Verarmung weiter Teile der Bevölkerung im ländlichen Raum, deren Folgen schwer abschätzbar sind. Sie reichen von sozialen Spannungen bis hin zu Migrationsprozessen in die Städte, wo die Landflüchtigen in der Regel in den Armenvierteln landen.

Ob und in welchem Umfang es zu klimabedingten Änderungen der Niederschlagsmengen in semi-ariden Gebieten kommen wird und welche Wechselwirkungen zwischen ökologischem System sowie ökonomischem und gesellschaftlichem Umfeld daraus resultieren ist allerdings schwer abschätzbar. Für eine konkrete Analyse sind Studien notwendig, die die Auswirkungen der Klimaänderung räumlich differenziert in einzelnen Regionen untersuchen, ohne dabei mögliche Rückkopplungen und räumliche Variabilitäten außer Acht zu lassen.

Eine integrierte Regionalstudie wurde in dem deutsch-brasilianischen Forschungsprojekt WAVES (Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brazil) vorgenommen. In dem Projekt wurden die Zusammenhänge zwischen Wasserverfügbarkeit und Migration im semi-ariden Nordosten von Brasilien unter Be-

rücksichtigung von treibenden Kräften wie Klima oder Bevölkerungswachstum untersucht.

Das Untersuchungsgebiet umfasst die brasilianischen Bundesstaaten Ceará und Piauí. Dieses Gebiet weist die wesentlichen Charakteristika semi-arider Regionen auf und ist durch eine hohe Sensibilität gegenüber Änderungen des Klimas gekennzeichnet. Ebenso ist die Region durch einen hohen Grad an Unterentwicklung und Armut weiter Teile der Bevölkerung geprägt, was zu der weit verbreiteten Bezeichnung als Armenhaus Brasiliens geführt hat.

Wiederholte Dürren haben in der Vergangenheit zu einer Verknappung der Wasserressourcen und deshalb zu einer starken Beeinträchtigung der landwirtschaftlichen Produktion geführt. So war z.B. im Dürrejahr 1983 die Bruttowertschöpfung der Landwirtschaft um 16% niedriger als im Normalfall (PARRY ET AL., 1988).

1.2 Ansatz und Ziele

Eine Regionalstudie wie sie im WAVES-Projekt durchgeführt wurde erfordert ein hohes Verständnis der Dynamik der zahlreichen Prozesse, die die Funktion des Systems und dessen Verknüpfungen bestimmen. Disziplinäre Ansätze sind hierfür wenig zielführend. Vielmehr besteht die Notwendigkeit, die verschiedenen Erkenntnisse relevanter Disziplinen zusammenzuführen.

Hierfür ist ein integriertes Modell erforderlich, das dynamisch, quantitativ und geographisch explizit die Wirkungskette *Klima-Wasserverfügbarkeit-Landwirtschaft-Lebensqualität-Migration* in all ihren komplexen Zusammenhängen und prozessualen Abläufen für die zu modellierende Region beschreibt. Eine dynamische Betrachtung ist dabei von zentraler Bedeutung, da gerade z.B. bei der Wasserverfügbarkeit die zeitliche Variabilität eine wesentliche Einflussgröße ist. In der Literatur zur

integrierten Modellierung konnte kein Modell gefunden werden, dass diesen Anforderungen entspricht. Im Rahmen von WAVES wurde deshalb das *Semi-Arid Integrated Model SIM* entwickelt, das die regionalen Auswirkungen globaler Wandelprozesse durch die Integration einzelner natur- und sozialwissenschaftlicher Teilmodule umfassend abbildet.

Das Modell besteht aus Teilmodulen der Disziplinen Klimatologie, Hydrologie, Agrarökonomie, Soziologie und Demographie. Bei der Modellbildung sind verschiedene externe Randbedingungen zu berücksichtigen. Ziel des Modells ist es, Aussagen über mögliche künftige Entwicklungen und die wichtigsten Zusammenhänge bezüglich der Wasserverfügbarkeit und des Wasserverbrauchs, der Entwicklung von landwirtschaftlichen Erträgen und Einkommen sowie möglicher Migrationsprozesse der Bevölkerung treffen zu können. Die Einschät-

zung von Auswirkungen möglicher politischer Eingriffe sowie die Analyse der Sensitivität auf globale Änderungsprozesse in Form von Szenarienstudien ermöglicht die Analyse von Handlungsspielräumen für die politische Steuerung derartiger Entwicklungsprozesse.

Das Gesamtmodell wurde im Rahmen des WAVES-Projekts durch die Arbeitsgruppe "Integrierte Modellierung" erarbeitet.¹ Einzelne Teilmodelle wurden von Kooperationspartnern des WAVES-Projektes entwickelt. Zusammen mit den selbst erstellten Teilmodellen wurden sie dann zu dem Gesamtmodell verknüpft. In diesem Kontext kam der vorliegenden Arbeit zum einen die Aufgabe zu, wesentlich zu der Erstellung des integrierten Gesamtmodells beizutragen. Ausgehend von einer vorliegenden Systemanalyse wurde die Modellstruktur weiterentwickelt. Einzelne Teile waren dabei detailliert zu bearbeiten. Dies betraf die wesentliche Erstellung eines landwirtschaftlichen Produktionsmodells, die Verknüpfung des landwirtschaftlichen Modells mit den anderen Teilmodellen und die Verknüpfung der Modelle

zur Wasserverfügbarkeit und zur Wassernutzung.

Zum anderen war es die Aufgabe der Arbeit, das Gesamtmodell zu validieren, um die Aussagekraft und die Gültigkeit der Aussagen des Modells beurteilen zu können. Zusätzlich war das Gesamtmodell zu analysieren, u.a. durch Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen. Diese Untersuchungen machen einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit aus. In der Forschung zur Integrierten Modellierung regionaler Auswirkungen globaler Wandelprozesse wird der Aspekt der Modellanalyse bislang oft zu wenig berücksichtigt. Die Arbeit kommt damit der in der Literatur weit verbreiteten Forderung nach, diesem Aspekt verstärkt Aufmerksamkeit zu schenken, um das Verständnis der Funktionsbedingungen integrierter Modelle zu erhöhen (für einen Überblick über die Diskussion siehe ROTMANS, 2001). Weiterhin wurden verschiedene Szenariorechnungen zu möglichen Auswirkungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet durchgeführt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 gibt einen einführenden Überblick über die theoretischen und methodischen Grundlagen integrierter Forschung und Modellierung und skizziert die Entwicklung dieses Forschungsgebiets.

In Kapitel 3 erfolgt eine Systemanalyse des Untersuchungsgebiets, bei der die für die Fragestellung relevanten Themen und die zu modellierenden Prozesse sowie externen Einflussfaktoren dargestellt werden.

Im Kapitel 4 werden die angewandte Methodik der Modellierung, die Modellstruktur und die einzelnen Modellkomponenten des integrierten Gesamtmodells beschrieben.

In Kapitel 5 wird eine Validierung des Modells durchgeführt, die der Bewertung der Aus-

sagekraft der Modellergebnisse dient. Zudem werden die verfügbaren Daten analysiert. Um die Belastbarkeit der Simulationen zu überprüfen, wurden Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Analysen werden in Kapitel 6 dargestellt. Außerdem werden verschiedene Klima- und Referenzszenarien gerechnet, mit denen mögliche Auswirkungen globaler Wandelprozesse in der Untersuchungsregion dargestellt werden.

Kapitel 7 fasst die einzelnen Abschnitte zusammen, bewertet die Ergebnisse und diskutiert den weiteren Forschungsbedarf.

1. Der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung gehörten Prof. Axel Bronstert und Dr. Maarten S. Krol (ehemals Postdam Institut für Klimafolgenforschung) sowie die Verfasserin dieser Arbeit an.

Integrierte Modellierung

Kapitel

2

2.1 Integrierte Forschung

Phänomene des Globalen Wandels wie der anthropogen verstärkte Treibhauseffekt, die Degradation von Böden, der Verlust von biologischer Vielfalt oder die Verknappung von Süßwasser setzen sich aus einer Vielzahl dynamischer und interaktiver Einzelentwicklungen natürlicher und gesellschaftlicher Systeme auf einer Vielzahl von Skalen zusammen, die in der Summe den Betrachter vor ein kompliziertes Puzzle voller Vielschichtigkeit stellen. Bereits jedes Einzelsystem zeichnet sich durch eine fundamentale Inhomogenität aus, die sich nicht präzise in Gleichungen fassen lässt (SCHELLNHUBER, 1998). Die einzelnen Systeme sind aber nicht geschlossen; vielmehr erhöht sich die analytische Komplexität durch die wechselseitigen Netzwerkbeziehungen der Systeme, die sich in ihren internen Zusammenhängen gegenseitig über vielfältige prozessuale Abläufe sowohl positiv als auch negativ beeinflussen (HOUGHTON ET AL., 1996).

Berücksichtigt man die unterschiedlichen Skalen der Auswirkungen globaler Wandelprozesse auf natürliche Systeme, nämlich die zeitliche (saisonal, jährlich, mehrjährig, historisch), die räumliche (lokal, regional, kontinental, global), die systembezogene (einzelne Pflanzen, Ökosysteme, terrestrische Biosphäre) und die funktionale Ska-

la (interne Variabilität von Ökosystemen, Variabilität zwischen Ökosystemen, globale Variabilität), verdeutlichen sich die Komplexität und die Schwierigkeiten, denen sich eine Forschung zu den Ursachen und Auswirkungen globalen Wandelprozesse ausgesetzt sieht (VAN DER SLUIJS, 1996; HISCHEMOELLER UND HOPPE, 1995, FUNTOWICZ UND RAVETZ, 1991).

Die Strukturierung und Beschreibung der einzelnen Systemkomponenten und Systemprozesse in der Antroposphäre und Ökosphäre sowie ihrer Ursache-Wirkungs-Ketten und deren Interaktionen ist durch eine rein disziplinäre Herangehensweise, die auf die Abbildung und das Verständnis einzelner medialer und sektoraler Phänomene abzielt, alleine nicht zu leisten. Eine solche Herangehensweise kann notwendigerweise nur einen Ausschnitt der Gesamtproblematik erfassen. Vielmehr besteht die Notwendigkeit, verschiedene Disziplinen in einem übergreifenden Forschungsansatz zu integrieren.

Ziel einer solchen Forschung ist es, eine oder mehrere Kausalketten globalen Wandels einschließlich aller Rückkopplungen natürlicher und gesellschaftlicher Systemprozesse durch die Vernetzung der Wissensbestände einzelner Disziplinen in ihrer Komplexität und in ihren Interaktio-

nen in Raum und Zeit qualitativ und quantitativ darzustellen. Bei einer solchen Systemsicht kann es nicht darum gehen, eine naturgetreue Abbildung der Realität entlang der verschiedenen Skalen zu erreichen. Angestrebt wird vielmehr die Charakterisierung der grundlegenden natürlichen Einflussgrößen, die einen Rückschluss auf die systembezogene Gesamtentwicklung erlauben (ROTMANS, 2001; ROTMANS UND DOWLATABADI, 1997, ZWERVER ET AL., 1995; PARSON, 1995).

Eine solche Forschung sieht sich einer Flut von disziplinären Theorien, Methoden, Modellen und Informationen gegenübergestellt. Damit stellt sich zum einen die grundsätzliche Frage, was überhaupt aus diesem Fundus in den eigenen Analyseansatz integriert werden soll. Zum anderen stellt sich die Frage, wie die Verkopplung der relevanten Disziplinen erfolgen kann. Diese unterscheiden sich grundsätzlich hinsichtlich ihrer wissenschaftlichen Paradigmen, ihrer Sprache, ihres Anwendungsgebiets und ihrer Untersuchungsmethoden. Jede Disziplin behandelt verschiedene Prozesse mit einem eigenen Maßstabsbereich (BRONSTERT ET AL., 1997).

Zusätzlich weisen die einzelnen Disziplinen aber auch erhebliche interne Differenzen auf, da es im Laufe ihrer Entwicklung zu einer immer stärker werdenden analytischen Spezialisierung auf die Untersuchung immer feinskaliger definierter oder reduktionistischer Problemlagen gekommen ist. Entsprechend inhomogen und unterschiedlich präzise gestalten sich die Informationen zu den einzelnen Systemkomponenten und Systemprozessen, die es intelligent miteinander zu verbinden gilt (SCHELLNHUBER, 1998, SWARTZ UND THOMPSON, 1990).

Die Integration der Wissensbestände verschiedener Disziplinen kann mit Hilfe unterschiedlicher Methoden und Techniken erfolgen. Diese können in qualitative, partizipative und quantitative Methoden unterschieden werden. Qualitative Methoden umfassen z.B. Experten-

interviews, Fallstudien oder qualitative Modellierungsansätze, partizipative Methoden u.a. Szenarioanalysen oder Planspiele. Quantitative Methoden beinhalten quantifizierte Modelle. Die Methoden müssen so gewählt werden, dass sie die disziplinären Erkenntnisse zu Teilaspekten der Wandelprozesse gut verbinden und wiedergeben sowie die Dynamik des Gesamtsystems abbilden (BAILEY ET AL, 1996). In der Repräsentation disziplinärer Erkenntnisse werden in integrierten Forschungsansätzen wahlweise disziplinär übliche Methoden und Modelle eingesetzt oder von diesen abgeleitete vereinfachte Darstellungen in Form von qualitativen Zusammenhängen, Responsfunktionen oder Metamodellen.

Mit diesen vereinfachten Darstellungen verbinden sich Vor- und Nachteile: Als vorteilhaft erweist sich, dass der Fokus klar auf die Dynamik des Gesamtsystems inklusive möglicher Rückkopplungen und Wechselwirkungen gerichtet werden kann. Vereinfachte Ableitungen von komplexen Modellen ermöglichen die einfachere Verbindung disziplinärer Erkenntnisse. Von Vorteil ist auch die Harmonisierung von Skalen und Aggregationsniveau. Nachteilig kann sich dabei auswirken, dass diese Verfahren zu Vereinfachungen führen, die stark abstrahierte und hoch aggregierte Beschreibungsebenen ergeben können, bei denen die einzelnen Verbindungen und Rückkopplungen systemarer Teilprozesse nur sehr implizit abgebildet werden, worunter die Erklärungskraft leiden kann (ROTMANS, 2001).

Die Verbindung disziplinärer Erkenntnisse erfordert in einem hohen Maße eine gute Absicherung der Konsistenz. Hierfür erweist sich die quantitative Modellierung als eine gut geeignete Methodik, weil sie klare Definitionen der Schnittstellen erfordert (PARSON UND FISHER-VANDEN, 1995). Auch bei der Bilanzierung unterschiedlicher Einflüsse auf eine zentrale Systemgröße ist ein Rückgriff auf quantitative Methoden zumeist unumgänglich.

2.2 Integrierte Modellierung

2.2.1 Grundlagen

In einem technischen Verständnis lassen sich integrierte Modelle als Computerprogramme zur weitestmöglichen Quantifizierung kausaler Interaktionsmechanismen einer bestimmten Problemstellung beschreiben. Sie leisten eine Vereinfachung der Wirklichkeit für die systematische Betrachtung komplexer Zusammenhänge (vgl. DOWLATABABI UND MORGAN, 1993). Einen einheitlichen Ansatz oder eine elaborierte Theorie der integrierten Modellierung gibt es nicht. Dennoch lassen sich allgemeine Eigenschaften integrierter Modelle feststellen, wie die Ausrichtung an zusammenhängenden Problemstellungen anstelle von individuellen Prozessen und der Fokus auf dynamisches Verhalten anstelle einer exakten Rekonstruktion des Ist-Zustands.

Der Ausgangspunkt einer integrierten Modellierung ist gewöhnlich eine Systemanalyse des Problems. Hierbei werden die zentralen Größen, die den Zustand des Systems beschreiben, qualitativ definiert und die wichtigsten dynamischen Prozesse sowie externen treibenden Kräfte, die im integrierten Modell beschrieben werden müssen, identifiziert. Insbesondere im Kontext zu globalen Veränderungen liegt der Schwerpunkt dabei auf den Zusammenhängen, die langfristige Entwicklungen beschreiben, d.h. den Einflussgrößen, die einen möglichst großen Teil der Dynamik erklären können.

Der Fokus integrierter Modelle geht damit über Zusammenhänge hinaus, die allein statische räumliche Unterschiede erklären. Ein gutes dynamisches Verständnis wird gegenüber einem exzellenten statischen Verständnis ebenso bevorzugt wie eine Fokussierung solcher Prozesse, die langfristige Trends beeinflussen, anstelle von Prozessen, die Heterogenität auf einer Mikro-Ebene erklären. Dabei gilt

es aber, einen tragfähigen Kompromiss zwischen einer klaren Repräsentation und einer umfassenden Darstellung der dynamischen Prozesse zu finden (KROL ET AL., 2003).

Integrierte Modelle bestehen in der Regel aus mehreren Teilmodellen, die miteinander über Austauschparameter oder integrierende Module verkoppelt sind. Aus Sicht der Systemanalyse ist es am wichtigsten, die spezifische Dynamik aller Systemteile und Systemzusammenhänge zu erfassen. Oft wird deshalb auf die Vorgabe eines gemeinsamen Modellierungsansatzes verzichtet, da eine solche Vorgabe die Möglichkeit der entsprechenden Konzeption der Teilmodelle einschränken würde.

Die konkrete Ausgestaltung eines Modells hängt stark von dem jeweiligen Modellzweck ab. Integrierte Modelle können zur Modellierung von Prozessen sowohl auf globaler wie regionaler Ebene Anwendung finden. Generell gilt, dass das Modell in der Lage sein muss, die grundsätzlichen Charakteristika des zu modellierenden Gesamtsystems abzubilden. Ein Modell, dass die Auswirkungen der Klimaänderung auf eine bestimmte Region modelliert, sollte so viele Informationen zu den natürlichen und gesellschaftlichen Charakteristika der betroffenen Region wie möglich gut verarbeiten können, muss aber gleichzeitig nicht die Ursachen der Klimaänderung auf globaler Ebene abbilden, sondern kann diese als Inputdaten aufnehmen.

Bei der integrierten Modellierung werden Prozesse, die die Wechselwirkung von internen Systemgrößen beschreiben (interne Prozesse) von Prozessen unterschieden, die ebenfalls großen Einfluss auf das Systemverhalten haben, aber vom System selber kaum beeinflusst werden (externe Prozesse). SCHELLNHUBER unterscheidet in diesem Kontext vier Regeln, die bei der Konzeptionalisierung

rung eines integrierten Modells zielführend sein können (SCHELLNHUBER, 1998):

- Identifikation und Bewertung aller relevanten Systemkomponenten, deren Eigenschaften modelliert werden müssen.
- Exogenisierung aller Elemente innerhalb oder außerhalb des zu modellierenden Systems, die von den relevanten Systemkomponenten beeinflusst werden, diese aber nicht beeinflussen, durch Weglassung.
- Exogenisierung aller Elemente innerhalb oder außerhalb des zu modellierenden Systems, die von den relevanten Systemkomponenten nicht beeinflusst werden, diese aber beeinflussen, durch Szenarien, Datenbanken o.ä.
- Nicht-Berücksichtigung aller anderen Elemente, sowohl innerhalb als auch außerhalb des zu modellierenden Systems.

Ein bedeutsames Problem integrierter Modellierung betrifft die Frage der Skalen und der Skalierung. Ein integriertes Modell bildet in der Regel eine Vielzahl verschiedener Prozesse ab, die von unterschiedlichen Disziplinen auf verschiedenen Maßstabsebenen bearbeitet werden. Die Skalen lassen sich dabei in eine räumliche (Ausdehnung, Raumbezug) und in eine zeitliche Skala (Dauer, Zeitbezug) unterscheiden, wobei ebenfalls die Frage ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung zu beachten ist (Unterteilung/Abstand). Der Skalenbereich integrierter Modelle enthält also mehrere Größenordnungen. Für diese Skalen müssen Übergänge konstruiert werden (Skalierung), die an die Problemstellung anzupassen sind.

Dabei kann zwischen den Ansätzen des *Upscaling* und des *Downscaling* unterschieden werden. Beim *Upscaling* werden detaillierte Informationen über kleinräumige Gebiete über einen kurzen Zeitraum zunächst verallgemeinert; anschließend werden von diesen Informationen für eine größere Fläche über einen längeren Zeitraum abgeleitet. Beim *Down-*

scaling wird dagegen versucht, aus großflächigen Informationen über einen längeren Zeitraum Informationen für spezifische Gebiete über einen kürzeren Zeitraum durch die Verkopplung mit detailliertem Wissen um grundlegende Prozesse abzuleiten. Die Erarbeitung von passenden Skalenverbindungen ist ein wichtiger Bestandteil der Integration.

Für die Kopplung von Modellkomponenten können einige allgemeine Prinzipien abgeleitet werden (BRONSTERT ET AL., 2000):

- Die Kompatibilität der ausgetauschten Informationen zwischen den Modellkomponenten muss gewährleistet werden (d.h. Verwendung gleicher Bezeichnungen, gleicher Einheiten, ähnlicher Restriktionen und gleiche Behandlung von Unsicherheiten).
- Die Kompatibilität von Raum- und Zeitskalen sowohl hinsichtlich der Auflösung als auch der totalen Ausdehnung ist notwendig.
- Der Informationsaustausch zwischen den Modulen muss umfassend sein, aber sollte Redundanzen vermeiden.
- Im Fall von Rückkopplungseffekten muss eine gegenseitige Verkopplung der relevanten Prozesse umgesetzt werden
- Die unterschiedlichen Modelle müssen das gleiche Maß an Komplexität aufweisen.

Ein integriertes Modell sollte nicht komplexer gestaltet werden als unbedingt notwendig. Wird die Anzahl der verwendeten Parameter, ihrer Beziehungen und ihrer möglichen Zustände gering gehalten, erleichtert dies die Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit des gesamten Programms. Dies erfordert aber auch, dass nicht zu vermeidende Annahmen, Abschätzungen oder Vereinfachungen bei jedem Schritt der Untersuchung benannt werden müssen. Eine geringe Komplexität muss dabei nicht unbedingt im Widerspruch zur Forderung nach Flexibilität von Modellen stehen: Auch ein wenig komplexes Modell kann flexibel sein (BROOKS UND TOBIAS, 1996).

Aufgrund der gekoppelten, modularen Struktur eignen sich integrierte Modelle für die Abbildung von Wechselwirkungen und Rückkopplungsmechanismen in dynamischen Systemen. Damit einher geht aber auch, dass nur die Systemkomponenten und Prozesse berücksichtigt werden, die für die Fragestellung relevant sind, und andere außer Acht gelassen werden. Dies beinhaltet die Möglichkeit, dass etwaige Wirkungsmechanismen und Rückkopplungen ausgeblendet werden (ROTMANS, 1998, PARSON UND FISHER-VANDEN, 1995).

Integrierte Modelle haben zudem häufig eine große Zahl von Variablen und Parametern, was die Validierung erschwert und Unsicherheiten erzeugt. Die Modelle beschreiben Prozesse oft in einer deterministischen Weise, die extreme Einzelereignisse nicht berücksichtigt, welche Auswirkungen auf das langfristige Systemverhalten haben können. Sie weisen zudem häufig limitierte Möglichkeiten der Kalibrierung und Validierung auf und können das Verhalten von Akteuren wie Regierungen oder Unternehmen und ihre Handlungsstrategien schlecht abbilden (ROTMANS, 1998, WEYANT ET AL. 1996, MORGAN UND DOWNLATABADI, 1996, PARSON UND FISHER-VANDEN, 1997).

Diese Nachteile ergeben aber allein nicht die Unzulänglichkeit integrierter Modellierung, sondern spiegeln zuvorderst die Komplexität der zu modellierenden Systeme. Wie schon erwähnt, ist kein System wirklich abgeschlossen und erlaubt daher eine finale wissenschaftliche Beschreibung. Vielmehr gibt es immer ein Universum außerhalb des zu beschreibenden Systems, dass nicht in der gleichen Detailliertheit abgebildet werden kann. Dieser Anspruch wird von integrierten Modellen aber auch nicht vollständig erhoben. Der Einfluss von Unsicherheiten auf die Modellergebnisse kann durch Tests quantifiziert werden, die eine weitgehende Kontrolle ermöglichen (vgl. Kap.6.2).

2.2.2 Entwicklung der integrierten Modellierung

Der folgende Überblick über wichtige integrierte Modelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit in der Darstellung. Vielmehr geht es darum, die Grundlinien der Entwicklung der integrierten Modellierung zu skizzieren. Die Grundlagen der heutigen integrierten Modellierung wurden in den Siebzigerjahren mit der globalen Modellierung des Abbaus der natürlichen Ressourcen in einfachen, systemtheoretischen Modellen gelegt, die vor allem dazu dienten, mögliche Probleme einer Ressourcenverknappung in der Zukunft zu beschreiben (DOWNLATABADI, 1995). Hierfür waren die Arbeiten von MEADOWS ET AL. (1972) maßgeblich (vgl. auch MEADOWS ET AL., 1982). Makroökonomische Ansätze wurden ab den späten Siebzigerjahren zur Beschreibung von langfristigen Entwicklungstendenzen bei der Nutzung von Energie und des Energiesektors angewandt (NORDHAUS, 1979, EDMONDS UND REILLY, 1985, SCHIMMELPFENNIG, 1996). Diese Arbeiten dienten vor allem dazu, eine gesicherte Grundlage für eine langfristige Planung der Energieversorgung sicherzustellen.

Im RAINS-Modell (ALCAMO ET AL., 1990) wurde die Versäuerungsproblematik in Europa umfassend modelliert. Das Modell diente der Bewertung unterschiedlicher emissionsmindernder Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen versauernder Substanzen in Europa im Rahmen der Konvention über die Verminderung der weitreichenden, grenzüberschreitenden Luftverschmutzung. Das RAINS-Modell erfasst die Generation von Luftschadstoffen, ihre atmosphärischen Konzentrationen und Transportprozesse sowie die jeweiligen Umweltauswirkungen. Hierfür wurden Impact-Indikatoren abgeleitet. Insgesamt ermöglicht das RAINS-Modell somit eine Beschreibung der kompletten Wirkungskette. Das Modell basiert auf detaillierten disziplinären Teilmodellen,

deren Ergebnisse aggregiert und verknüpft wurden. Mögliche Rückkopplungen werden allerdings nicht erfasst (TIMMERMANN UND MUNN, 1997, HORDIJK, 1991).

Im Kontext der Klimafolgenforschung hat sich das Forschungsgebiet der integrierten Modellierung dynamisch weiterentwickelt. Klimaänderungen wurden ab den späten Achtzigerjahren in integrierten Modellen modelliert. Am Anfang wurden dabei stark aggregierte systemtheoretische Modelle der Kausalkette (problemverursachende Aktivitäten von Wirtschaftssektoren, Emissionen, atmosphärische Prozesse, Folgen) wie das IMAGE-Modell verwandt (ROTMANS, 1990). IMAGE ermöglichte die Verknüpfung von ökonomischen Szenarien mit Phänomenen wie dem Anstieg des Wasserspiegels von Ozeanen. Es war das erste integrierte Modell, das eine Abbildung der Wechselprozesse im Klimasystem von den Quellen bis hin zu den Auswirkungen ermöglichte (TIMMERMANN UND MUNN, 1997). Ein populäres Modell ist das DICE-Modell von Nordhaus, das die Auswirkungen von Klimaänderung und unterschiedlichen Politikmaßnahmen auf Volkswirtschaften und CO₂-Emissionen modelliert (NORDHAUS, 1992).

Später wurden qualitative Fortschritte in unterschiedlichen Richtungen gemacht: u.a. wurden biosphärische Folgen räumlich aufgelöst (wie in IMAGE 2, ALCAMO ET AL, 1994), ökonomische Aspekte mittels Gleichgewichtsmodellen betrachtet (wie in GCAM, EDMONDS ET AL., 1994), Unsicherheiten explizit mit erfasst (ICAM, DOWLATABADI UND MORGAN, 1993) oder zusätzliche Themen des globalen Wandels wie etwa Wasserknappheit aufgenommen (TARGETS, ROTMANS UND DE VRIES, 1997). Modelle wie MERGE kombinieren ökonomische und energiewirtschaftliche Modelle mit Klimamodellen und Modellen der Schadensabschätzung (MANNE ET AL., 1992).

Die Abschätzungen globaler Modelle sind hoch aggregiert und erlauben keine Abbildung

von regionalen Auswirkungen, deren Verständnis für die Untersuchung globaler Wandelprozesse aber wichtig ist. Die Problematik der Skalenabgrenzung und die Schwierigkeiten der Abbildung regionaler Auswirkungen führten dazu, dass zunehmend die integrierte Modellierung von regionalen Auswirkungen globaler Wandelprozesse auf Umwelt und Gesellschaft in den Blick genommen wurde.

In regionalen integrierten Studien ist die integrierte Modellierung noch nicht so weit verbreitet und entwickelt wie in Studien auf der globalen Skala. Eine oft zitierte Studie des Mackenzie Einzugsgebiets (YIN ET AL., 2000, COHEN, 1997) testete unterschiedliche partiell integrative Ansätze, inklusive partizipativer Bewertungen. Integrierte Studien zum Einfluss der Klimavariabilität auf die Landwirtschaft (PARRY ET AL., 1988), insbesondere auf den Nordosten Brasiliens (MAGELHAES ET AL, 1988), versuchten, qualitativ Erkenntnisse entlang der Kausalkette zu verbinden. Diese Studien liefern eine breite, reichhaltige Datenfülle, integrieren sie aber nicht in Form von Modellen, die Abschätzungen ermöglichen. Für den semi-ariden Nordosten Brasiliens gilt nach wie vor die Folgerung von MAGELHAES ET AL. (1998): *"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"*.

Eine solche Erweiterung ist aus unterschiedlichen Gründen wichtig. Zum einen sind für eine erfolgreiche Problembewältigung konkrete Vorgaben auf der regionalen Ebene notwendig, die die eher allgemeinen Vorgaben der internationalen und nationalen Ebene konkretisieren. Um diese aber sachgerecht definieren zu können, bedarf es zum anderen eines besseren Verständnisses der regionalen Auswirkungen globaler Wandelprozesse wie Klimaän-

derung und ihrer Interaktionen mit regionalen Problemen wie beispielsweise Bodenerosion. Um z.B. die regionalen Interaktionen von Landnutzungsänderungen und Klimaänderung abzubilden, sind räumlich feiner aufgelöste Analysen notwendig.

Diese multidimensionale Kombination von Einflussfaktoren ist nur noch durch die Koppelung an geographische Regionen konsistenterweise handhabbar. Regionalmodelle weisen gegenüber globalen Modellen auch Vorteile bezüglich der Datenverfügbarkeit, der Durchführbarkeit (aufgrund des kleineren Ausschnitts der Problembehandlung), der Vermittlungsfähigkeit der Ergebnisse und dem Test von Wechselwirkungen zwischen regionaler und globaler Ebene auf (ROTMANS UND VAN ASSELT, 2001).

Die Übertragung der Modellierungsergebnisse für eine Region auf andere Regionen ist allerdings nur mit Einschränkungen möglich, da auf dieser regionalen Skala regional spezifische Merkmale (Prozesse, Daten) von großer Bedeutung sind. Dennoch sind die aggregierten Ergebnisse von großem Interesse für die Global Change Forschung, deren Arbeiten für die Bestimmung von Rückkopplungen auf regionale Wirkungsstudien angewiesen sind.

Weitere Entwicklungen im Bereich der integrierten Modellierung betreffen die Bemühungen um die Abbildung der Rolle des menschlichen Handelns und Verhaltens. Als eine zentrale Einflussgröße der globalen Problemlagen ist menschliches Handeln mittlerweile breit akzeptiert. Der Fokus liegt hier auf den Möglichkeiten struktureller Änderungen menschlicher Verhaltensweisen und Lebensstile. Diese erscheinen für die Problembewältigung notwendig, da bei einer Reihe von Problemen des globalen Wandels, wie etwa der Klimaänderung, keine klaren Ziele und Regeln aufgrund von kausalen Verursacherketten gesetzt werden und alternative Technologien zur Problembewältigung eingesetzt werden können wie etwa

bei der durch Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) verursachten Ozonproblematik. Ebenso spielt die Adaption an die möglichen Folgen des Klimawandels eine wichtige Rolle (WBGU, 1999).

Akteursbasierte Modellierung wird als eine vielversprechende Methode gesehen, um sich änderndes Verhalten und Lernprozesse abzubilden. Hierbei ist die regionale Skala geeigneter als die globale Skala, da die relevanten Akteure oder Akteursgruppen regional zwar auch sehr unterschiedlich sein können, die Akteursstrukturen auf regionaler Ebene im Vergleich zu den Akteursstrukturen auf der globalen Ebene aber immer noch eine wesentlich geringere Komplexität aufweisen.

Der Umgang mit Unsicherheiten nimmt einen breiten Platz in der Diskussion um Konzepte integrierter Modellierung ein (BECK UND CHEN, 2000, KANN UND WEYANT, 2000, ROWE, 1994, MORGAN UND HENRION, 1990). Unsicherheiten bestimmen (und beschränken) den Interpretationsraum der Schlussfolgerungen. Unsicherheit entsteht durch die Variabilität von Systemprozessen und einen Mangel an Wissen. Neue Informationen führen nicht immer zu einer Reduzierung von Unsicherheiten. Vielmehr können sie diese auch weiter erhöhen, indem sie z.B. Erkenntnisse in Frage stellen oder auf neue Problemlagen verweisen.

Unsicherheit kann in technische Unsicherheit (Qualität der Datenlage), methodologische Unsicherheit (Funktionalität der angewandten Methoden) und "epistemologische" Unsicherheit (Korrektheit der allgemeinen Konzeption des Problems) unterschieden werden (ROTMANS UND VAN ASSELT, 2001).

In integrativen Betrachtungen ist die Behandlung von Unsicherheiten von großer Bedeutung, weil sich diese in den gleichzeitigen, verschränkten Analysen mehrerer Themenfelder und ihrer Wechselwirkungen auf unterschiedlichen Skalen generell leicht verstärken können. Sie sind auch von der jeweilig be-

trachteten Skala abhängig. Manchmal ist die Unsicherheit an größeren Skalen kleiner, da hier externe Einflüsse weniger Bedeutung haben als die explizit beschriebene interne Dynamik. Zugleich reduziert die aggregierte Betrachtung der internen Heterogenität mögliche Quellen von Unsicherheiten. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Änderungsprozesse sich tatsächlich heterogen gestalten, weil die Prozesse viele Skalen, darunter viele feinere, miteinander verbinden.

Unsicherheiten in integrierten Modellen können durch eine Vielzahl von Methoden, u.a. durch Sensitivitätsanalysen, Validierungstechniken oder formelle Szenarienanalysen, limitiert bzw. quantifiziert werden. Oft wird bei der Modellentwicklung dem Aspekt der Modellanalyse aber nicht genügend Aufmerksamkeit beigemessen (vgl. Kap. 6.2).

2.2.3 Schlussfolgerungen für die vorliegende Arbeit

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Literaturanalyse zur integrierten Modellierung lassen sich die folgenden Vorgaben für die Erstellung des integrierten Modells zusammenfassend festhalten, ohne noch einmal auf die Begründung einzugehen:

- Verwendung eines prozessbeschreibenden Ansatzes.
- Identifikation aller wichtigen regionalen Systemkomponenten durch eine Systemanalyse.
- Abbildung der Systemprozesse sowie von räumlichen und zeitlichen Rückkopplungseffekten in einem flächendifferenzierten, regionalen Modell.
- Fokus auf das dynamische Verhalten der Systemkomponenten der Region.
- Quantifizierung wichtiger externer treibender Kräfte, die regionale Systemkomponenten beeinflussen, von diesen aber nicht

beeinflusst werden (wie z.B. Klimaänderung) durch Szenarien.

- Konstruktion von Skalenübergängen durch die Kombination der Ansätze des Upscaling und Downscaling.
- Sicherung der Kompatibilität der Informationen sowie der Raum- und Zeitskalen der zu koppelnden Modellkomponenten durch die Definition geeigneter Schnittstellen. Vermeidung von Redundanzen beim Informationsaustausch und gegenseitige Verkopplung von Systemprozessen.
- Minimierung der Komplexität des Modells so weit wie möglich, um Handhabbarkeit und Überprüfbarkeit zu gewährleisten.
- Geographisch explizite Beschreibung der Wasser- und Landnutzungskomponenten zur Beschreibung der Gradienten Bevölkerungsdichte, Landnutzung und Entwicklung.
- Bewertung von Unsicherheiten durch Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen.

Systembeschreibung

Kapitel

3

3.1 Die Bundesstaaten Ceará und Piauí im Überblick

Die beiden nordostbrasilianischen Bundesstaaten Ceará und Piauí umfassen eine Fläche von 398950 km². Die Einwohnerzahl von Ceará betrug im Jahr 2000 7.43 · 10⁶. In Piauí lebten im Jahr 2000 2.84 · 10⁶ Personen (IBGE, 2002). Beide Staaten liegen größtenteils im „*poligono das secas*“, einem großflächigen Gebiet, dass sich mit ca. 10⁶km² über acht Bundesstaaten Nordostbrasilens und einen Teil des Bundesstaates Minas Gerais erstreckt (Abb. 3.1).

Etwa 82% der Fläche Piauí's und etwa 92% der Fläche Ceará's gehören zu diesem Gebiet, das durch ein semi-arides Klima mit hoher Variabilität des Niederschlags und häufig auftretenden Dürreperioden gekennzeichnet ist. Etwa 18% der Fläche von Piauí sind dagegen der Übergangszone zu dem humiden Amazonasgebiet zuzurechnen. Sie ist deshalb wesentlich feuchter als der größte Teil des Untersuchungsgebietes.

Die hohe Variabilität des Klimas wirkt sich entscheidend auf die Lebensverhältnisse im ländlichen Raum aus, wo die Mehrzahl der Bevölkerung von der Landbewirtschaftung lebt. Einkommen, Bildung und Besitzverhältnisse sind innerhalb der Bevölkerung ungleich verteilt. Die Handlungsfähigkeit weiter Teile der Bevölkerung

insbesondere auf Dürren angemessen reagieren zu können, ist stark eingeschränkt. Die Gründe hierfür sind eine unzureichende infrastrukturelle Ausstattung (u.a. fehlende Anbindung an die öffentliche Wasserversorgung) sowie fehlende Bewirtschaftungsflächen, ein geringer Technisierungsgrad und fehlendes Kapital in den landwirtschaftlichen Kleinbetrieben.



Abb. 3.1 Das „*poligono das secas*“ in Nordostbrasilien. Das Untersuchungsgebiet ist rot umrandet. Eine detailliertere Karte findet sich im Anhang Abb. A1.1.

In Dürrejahren kommt es durch die Verknappung von Nahrungsmitteln und Wasser in ländlichen Gebieten häufig zu Einschränkungen bei der lokalen Versorgung. Weite Teile der Bevölkerung sind in dieser Zeit von staatlichen Not-
hilfeprogrammen abhängig. Diese Programme können allerdings nicht verhindern, dass sich in solchen Jahren aufgrund der Einschränkungen bei der Grundversorgung der Menschen die Migration vom ruralen Hinterland in die urbanen Zentren erhöht.

Bevölkerungswachstum, Veränderungen der Umwelt durch Landnutzung wie etwa Ackerbau und andere menschliche Aktivitäten bedrohen langfristig die natürlichen Ressourcenvorkommen in Ceará und Piauí. So sind etwa die Verfügbarkeit fruchtbarer Böden durch Erosionsprozesse und die Verfügbarkeit von Grundwasser durch übermäßigen Verbrauch gefährdet (MAGALHÃES ET AL., 1988).

Die natürliche Klimavariabilität wirkt sich entscheidend sowohl auf die ökonomische und natürliche Lebensbasis (objektive Lebensqualität) als auch auf das soziale Wohlbefinden (subjektiv empfundene Lebensqualität) großer

Teile der Bevölkerung aus. Dürren können in extremen Jahren verheerende Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion und die Wasserversorgung haben. Im Extremfall sind Hungersnöte möglich, die wiederum zu Migration in die Slums der Städte führen können. So stieg als Folge der Dürre von 1983 die Bevölkerung der Favelas von Fortaleza von etwa 300000 auf etwa 650000 Personen an. Dabei kamen täglich ca. 5000 Flüchtlinge in die Bundeshauptstadt (VILLA, 2000).

Um die für die Fragestellung wichtigsten Prozesse modellieren zu können, bedarf es der Definition einzelner relevanter Teilsysteme und der Beschreibung ihrer Wechselwirkungen (vgl. Kap.2.2). Nachfolgend werden die Systemkomplexe Klima, Wasser, Naturraum, Landwirtschaft, Ökonomie sowie Soziale Systeme beschrieben, wobei Teile der folgenden Ausführungen auf Arbeiten anderer Gruppen im Rahmen des Waves-Projektes aufbauen und deren Ergebnisse hier teilweise in konzentrierter Form zusammenfassen (vgl. den Endbericht zum WAVES-Projekt, UNIVERSITÄT HOHENHEIM ET AL., 2000).

3.2 Klima

Im semi-ariden Nordosten Brasiliens ist die wesentliche klimatologische Größe der Niederschlag. Der jährliche Klimazyklus im Untersuchungsgebiet ist durch zwei Jahreszeiten, eine Regen- (ca. Januar-Mai) und eine Trockenzeit (ca. Juni-Dezember), geprägt (WERNER UND GERSTENGARBE, 2003). Die durchschnittliche jährliche Summe des Niederschlags und die Länge der Regen- und Trockenzeit wird durch folgende Einflussgrößen bestimmt (MAGALHÃES ET AL., 1988):

- Von maßgeblicher Bedeutung sind zu-
vor-
derst die großräumigen Zirkulationsverhältnisse im tropischen Atlantik, die in
Abbildung 3.2. dargestellt sind. Die Position

der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ)

ist dabei von erheblicher Relevanz. Die ITCZ verschiebt sich jährlich sowohl nordwärts als auch südwärts. In dem Untersuchungsgebiet kommt es zu einem verstärkten Niederschlag, wenn sich die ITCZ nahe dem Gebiet befindet. In Dürrejahren erreicht die ITCZ das Untersuchungsgebiet normalerweise nicht (PARRY ET AL. 1988, NOBRE ET AL., 1984).

Die Position der ITCZ richtet sich maßgeblich nach den nordatlantischen bzw. südatlantischen Hochdruckgebieten, die wiederum von der jeweiligen Meeresoberflächentemperatur (SST) abhängig sind.

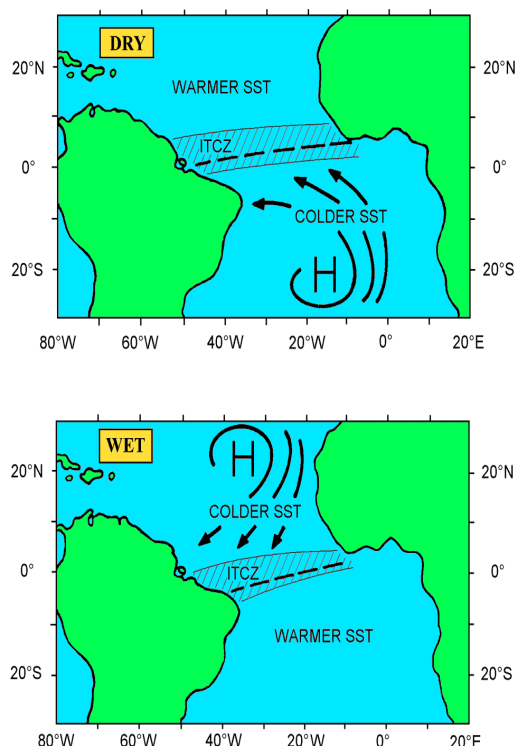


Abb. 3.2 Schematische Darstellung der großräumigen Zirkulationsverhältnisse im tropischen Atlantik (Werner und Gerstengarbe, 2003)

Verschiebt sich infolge dieser Zusammenhänge die ITCZ nicht weit genug nach Süden, kann es zu einer Abschwächung der Niederschlagsintensität in der Regenzeit kommen, die in eine Dürre münden kann (HASTENRATH, 1991, WERNER UND GERSTENGARBE, 2003).

- **Kaltfronten**, die von hohen südlichen Breitengraden nordwärts ziehen, können die Niederschlagsmengen von November bis Februar vergrößern und sind verbunden mit höheren Niederschlägen an der Küste (KOUSKY, 1979).
- **Mesoskalige Einflussfaktoren** wie kalte Wirbel in der oberen Troposphäre, Zirkulationen durch die topographischen Gegebenheiten oder Land-See-Zirkulationsmechanismen spielen eine Rolle (KOUSKY, 1980, KOUSKY UND GAN, 1981, RAMOS, 1975).

- **Auf lokaler Ebene** können Einflussfaktoren wie die Aufheizung der terrestrischen Oberfläche während des Tages Feuchtigkeitskonvektionen und somit Niederschläge bewirken, wenn Einflüsse grösserer Skalen es nicht verhindern.

Ein gesondert zu betrachtendes Phänomen sind die El Nino-Ereignisse. Viele Anzeichen sprechen dafür, dass El-Nino-Ereignisse in direktem Zusammenhang mit Dürren im Untersuchungsgebiet stehen. Teilweise kam es in El-Nino-Jahren aber auch zu einer Verstärkung der Niederschlagsmenge kommen (HASTENRATH UND GREISCHAR, 1993, PARRY ET AL., 1988).

Niederschlag

Die Regenzeit erstreckt sich in etwa über die Monate Dezember bis Mai, die Trockenzeit über die Monate Juni bis November. Nahezu der gesamte Jahresniederschlag von durchschnittlich etwa 900 mm fällt in der Regenzeit (WERNER UND GERSTENGARBE, 2003).

Das räumliche Muster der Niederschlagsverteilung stellt sich wie folgt dar (Abb. 3.3): Der Niederschlag nimmt von der Küste zum Landesinneren hin ab. Der Westen der Region weist höhere Niederschlagsraten auf als der Osten. In den Gebirgsregionen ist der Niederschlag in der Regel höher als in den anderen Gebieten. Sehr hohe Werte werden in der Serra da Ibiapaba, einer Gebirgsregion im Nordwesten Cearás (vgl. die detaillierte Karte im Anhang, Abb. A1.1), erreicht, wo der Niederschlag bis zu 2000 mm pro Jahr betragen kann. Sehr niedrige Werte zwischen 500-600 mm pro Jahr werden dagegen in dem Gebiet südlich der Serra do Machado gemessen. Auffällig ist, dass im mittleren und westlichen Teil Piauí die Niederschläge nach der Trockenzeit früher einsetzen als im übrigen Untersuchungsgebiet.

Für das Untersuchungsgebiet ist eine sehr hohe interannuelle Variabilität des Nieder-

schlags feststellbar. Das Flächenmittel des Niederschlags schwankt für die Untersuchungsregion zwischen 400 mm (1958) und 1500 mm (1974). Außerdem unterliegen die Länge und der Zeitpunkt des Eintritts von Regen- und Trockenzeiten starken Schwankungen. So kann eine Trockenzeit zwischen ca. 50 und 270 Tagen dauern. Auch tendenzielle Entwicklungen über längere Zeiträume sind sichtbar, beispielsweise ein späterer Beginn und damit eine Verkürzung der Trockenzeit.

Während der Regenzeit kann es auch zu „Veránicos“, Zwischentrockenzeiten von mindestens einer Woche, kommen. Diese haben einen großen sozio-ökonomischen Einfluss, da dann auch in niederschlagsreichen Jahren Ernteverluste auftreten können.

Weitere meteorologische Parameter

Andere klimatologische Größen haben eine räumlich und zeitlich wesentlich geringere Variationsbreite als die Größe Niederschlag. Die räumliche Verteilung der jährlichen mittleren Temperatur innerhalb der Bundesstaaten hat eine Schwankungsbreite von maximal 7 K. (WERNER UND GERSTENGARBE, 2003).

Ähnlich verhält es sich mit dem Jahresgang der Temperatur, die eine Amplitude < 3 K um die Durchschnittstemperatur von 25°C im Mittel nicht überschreitet. Ein Vergleich der Globalstrahlung beider Bundesstaaten zeigt, dass die Werte räumlich nicht sehr schwanken; sie variieren zwischen $240\text{--}246\text{ W/m}^2$ (gemittelte Jahreswerte). Zeitlich ergeben sich grössere Unterschiede; innerhalb eines Jahres schwanken die Werte der Globalstrahlung um ca. 75 W/m^2 .

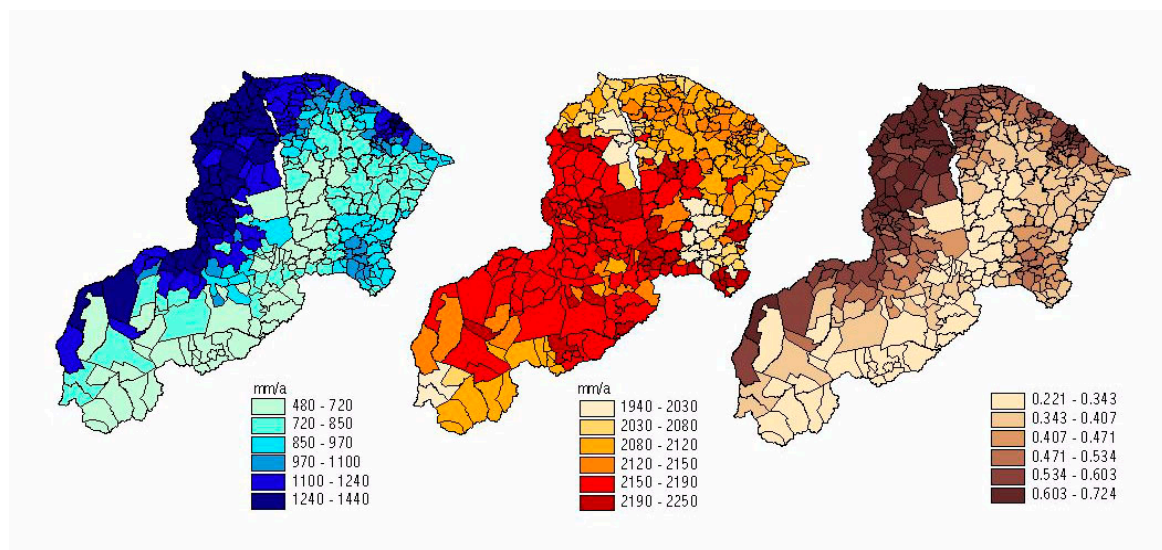


Abb. 3.3 Niederschlag, potentielle Verdunstung (berechnet nach Penman-Monteith), Verhältnis zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung, langjährige Jahresmittelwerte 1921-1998.

3.3 Hydrologie

3.3.1 Wasserverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Wasser wird in beiden Bundesstaaten maßgeblich durch das Verhältnis zwischen Niederschlag und jährlicher potentieller Verdunstung bestimmt (Abb. 3.3). Ein

Großteil des Niederschlages verdunstet, wobei die Abflussraten (d.h. das Verhältnis von Abfluss und Niederschlag) in den kristallinen Gebieten mit flachen Böden und einer niedrigen Durchlässigkeit generell höher sind als in den sedimentären Gebieten mit durchlässigen

Böden. Allerdings wird dieses Muster durch das Ausmaß der jährlichen Verdunstung verändert. Die Abflussraten in Ceará betragen auf Munizipebene (Verwaltungseinheit) je nach Bodentyp 10-20% des Niederschlags. Abflussraten von 10% finden sich für die trockenen kristallinen Gebiete, Abflussraten von 20% und mehr für die stärker humiden Gebiete (CADIER, 1996).

Nur wenige Flüsse führen ganzjährig Wasser, was eine konstante Wasserversorgung erschwert. Durch den Bau zahlreicher Staudämme erhöht sich aber ihre Anzahl.

Eine wichtige Einflussgröße der Wasserversorgung ist die Verfügbarkeit von Grundwasser. Ergiebige sedimentäre Grundwasserleiter gibt es nur auf 20% der Fläche, 67% des gesamten Grundwasservorkommens befindet sich in den schwer erschließbaren kristallinen Gebieten. Das Grundwasser ist häufig salzig, weswegen die Gewinnung und Aufbereitung sehr teuer ist. Zwar gelangt in Ceará mehr Niederschlag zum Abfluss als in Piauí. Die aktuelle Evapotranspiration und die Grundwasserneubildung fällt aber aufgrund der geringen Durchlässigkeit der kristallinen Böden geringer aus als in Piauí (FRISCHKORN ET AL., 2003).

In Piauí ist die Verfügbarkeit von Grundwasser aufgrund des zumeist sedimentären Ausgangsgesteins besser. Große Grundwasservorkommen ($2 \times 10^{12} \text{ m}^3$) befinden sich im Maranhão-Becken. Die Durchlässigkeit der Böden führt zusammen mit den durchschnittlich höheren Niederschlägen zu einer höheren Rate der Grundwasserneubildung als in Ceará. Teilweise befinden sich die Vorkommen aber in Tiefen, die teure Brunnenbohrungen erfordern, für die kein Geld vorhanden ist.

Die Wasserverfügbarkeit ist deshalb in beiden Staaten als gering einzustufen (FRISCHKORN ET AL., 2003).

3.3.2 Wassernutzung und -management

Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit von Grundwasser erfolgt die Wasserversorgung in Ceará zu 91% mit Oberflächenwasser aus Stauseen. In Piauí basiert die Wasserversorgung dagegen vorrangig auf der Entnahme von Grundwasser, in den Städten vollständig. Die Wasserversorgung auf dem Land erfolgt in beiden Bundesstaaten in einer jeweils lokal und saisonal unterschiedlichen Kombination von Grundwasser, Oberflächen- und in Zisternen gesammeltem Regenwasser.

Angaben zum Wasserbedarf sind nur durch Modellrechnungen möglich (HAUSCHILD UND DÖLL, 2000). Diese zeigen bezogen auf die Fläche einen viermal höheren Wasserbedarf Ceará gegenüber Piauí. Die Landwirtschaft benötigt in beiden Staaten am meisten Wasser. Da ein flächendeckendes Nutzerkataster bislang fehlt, können keine gesicherten Angaben zu der Größe der einzelnen Bewässerungsflächen, ihrer Zusammensetzung und den jährlichen Änderungsraten getroffen werden. Derartige Angaben gibt es nur für einzelne wichtige Gebiete, erfasst z.B. durch die COGERH (*Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos*). Die in Tabelle 3.1 angegebenen Werte zu den Flächengrößen beruhen daher auf Schätzwerten von Experten, die sich von anderen Datenquellen deutlich unterscheiden (zur Diskussion der Daten vgl. Kap.5.2.1).

An zweiter Stelle folgt der Verbrauch privater Haushalte und an dritter Stelle wieder die Landwirtschaft mit ihrem Wasserbedarf in der Viehzucht. Industrie und Tourismus spielen gegenüber diesen beiden Sektoren im Durchschnitt eine untergeordnete Rolle, in den Municipien (vgl. Kap.4.2.1), in denen sie stark konzentriert sind (z.B. in den Küstenmunicipien) aber eine wichtige Rolle (HAUSCHILD UND DÖLL, 2000).

In der Trockenzeit kommt es leicht dazu, dass in einigen Munizipien die Wassernachfrage nicht mehr gedeckt werden kann.

Auf den steigenden Wasserbedarf aufgrund von Bevölkerungswachstum und Wachstum der Industrie, der industriellen Landwirtschaft und des Tourismussektors wurde in Ceará und Piauí in der Vergangenheit mit dem weiteren Ausbau der Wasserinfrastruktur reagiert. Damit wurde das Ziel verfolgt, die Kontinuität der Bewässerungsprozesse und der Versorgung der Bevölkerung zu jeder Jahreszeit zu ermöglichen. Seit den Fünfzigerjahren wurden verstärkt Stauseen gebaut und insgesamt an die 50.000 Brunnen im gesamten Nordosten Brasiliens gebohrt. Ab den Siebzigerjahren wurde mit großen Bewässerungsprojekten begonnen; in jüngerer Zeit wurden verstärkt einzelne Stauseen durch Kanäle verbunden. Gegenwärtig gibt es 37 Stauseen mit mehr als 50 Mio. m³ Speichervolumen in Ceará und fünf Stauseen in Piauí. Die Anzahl der aktiv genutzten Brunnen beträgt in Ceará 7581 und in Piauí 6080. Hinzu kommen mehrere Tausend kleine Stauseen (Açudes) (Tabelle 3.1). Die Zahl der Açudes ist aufgrund der klimatischen und der geologischen Voraussetzungen in Ceará größer als in Piauí.

Die Ausbaumaßnahmen der Vergangenheit haben nicht dazu beigetragen, das Problem der geringen Wasserverfügbarkeit für die gesamte Bevölkerung zu lösen. In beiden Bundesstaaten hat nur rund die Hälfte der Gesamtbevölkerung Zugang zur öffentlichen Wasserversorgung (vgl. Tabelle 3.1). Die öffentliche Wasserversorgung erfasst fast ausschließlich die Muniziphauptstädte. Hier sind etwa 66% der Bevölkerung in Ceará und 93% der Bevölkerung in Piauí angeschlossen. Dagegen ist in ländlichen Gebieten eine sichere Wasserversorgung selten gewährleistet (vgl. Tabelle 3.1).

Die Wasserversorgung ist vor allem auf Wasser aus den größeren Stauseen, das während der Regenzeit gespeichert wird, und auf

	Ceará	Piauí
Gesamtvolumen aller Stauseen (10⁹ m³)	11.6	6.0
Anzahl großer Stauseen (Volumen > 50 10⁶ m³)	37	5
mittlere Anzahl von Stauseen je 1000 km²	47.7	0.7
Anzahl aktiver Brunnen	7581	6080
Anschluss an öffentl. Wasserversorgung [%]	46	54
Anschluss der urbanen Bevölkerung an öffentl. Wasserversorgung [%]	66	93
Anschluss an die Kanalisation [%]	20	2
Bewässerungsfläche [ha]	43096	13170

Tabelle 3.1: Infrastruktur der Wasserversorgung in Ceará und Piauí (HYDROISOTOP, 2002).

Grundwasser angewiesen, welches jedoch oft aus größerer Entfernung herbeigeleitet werden muss. In der Trockenzeit kommt es trotzdem oft zu Engpässen, die zusätzliche Maßnahmen des Wassermanagements erfordern. In den bedürftigen Munizipien wird die ländliche Bevölkerung zeitweilig mit Wasser aus Tankwagen („carro pipa“) versorgt. In Ceará werden jährlich in bis zur Hälfte aller Munizipien Wassertankwagen eingesetzt. Eine andere Möglichkeit, die Wasserversorgung zu gewährleisten, sind „desalinisadores“, d.h. Entsalzungseinrichtungen für Brunnen in Gebieten von schlechter Grundwasserqualität.

Ein wichtiges technisches Problem stellt sich in beiden Bundesstaaten in Form großer Verlusten durch die hohe Evaporation bei Stauseen, die sich auf durchschnittlich 2000 bis 2500 mm pro Jahr beläuft (30 bis 40% Verlust an jährlich zufließenden Wasser) (HYDROISOTOP, 2002). Bei kleineren flachen Stauseen fällt die Rate noch ungünstiger aus. Ein weiteres Problem betrifft die Versalzung von Brunnen. Während es in Ceará fast dop-

pelt so viele Brunnen wie in Piauí gibt, werden wegen der Versalzungsproblematik gegenwärtig nur etwa 57% der Brunnen in Ceará gegenüber 86% der Brunnen in Piauí tatsächlich auch genutzt. Allerdings ist die Datenlage zu dieser Problematik nicht umfassend, sodass keine regionalen Bezüge hergestellt werden können.

Gegenwärtig besteht nur für 20% der ländlichen Bevölkerung in Ceará und für 2% in Piauí ein Anschluss an die Kanalisation. Der größte Teil der Abwässer fließt damit ungeklärt in Fließgewässer oder Böden. Welche Auswirkungen entsprechende Sickerprozesse von häuslichen Abwässern, Viehausscheidungen oder chemischen Landwirtschaftsdüngern auf das Grundwasser haben, ist nicht genau bekannt. Eine durchaus erhebliche Belastung kann aber nicht ausgeschlossen werden.

Neben diesen eher technischen Problemen entstehen weitere Probleme durch eine unzureichende Planung und Verwaltung des Wassermanagements. Nutzung und Schutz der Ressource Wasser sind im brasilianischen Wassergesetz geregelt, das durch Gesetze der einzelnen Bundesstaaten konkretisiert wird. Um eine nachhaltige und bedarfsgerechte Nutzung der Ressource Wasser sicherzustellen, obliegt das Wassermanagement in den Wassereinzugsgebieten der regionalen Verwaltung. Nutzer und Gemeinden sind dabei zu beteiligen (VOERKELIUS ET AL., 2000).

In der Realität sind die Voraussetzungen hierfür nur bedingt gegeben. Die Verwaltung zur Koordinierung der Wasserversorgung ist in Piauí noch im Aufbau begriffen. Die großen Stauseen werden nicht zentral verwaltet und ein Landeswassergesetz gibt es nicht. In Ceará ist dagegen im Jahr 1992 ein Wassergesetz verabschiedet worden. Das Wassermanagement erfolgt durch eine Reihe von Institutionen, die vom Wasserministerium SRH (*Secretaria dos Recursos Hídricos*) koordiniert

werden. Der Betrieb der großen Stauseen wird zentral von der COGERH geleitet.

Trotzdem finden sich in Ceará ähnliche Nutzungsmuster wie in Piauí: Die Nutzung des Wassers aus Stauseen erfolgt je nach Besitz, Zugänglichkeit und Management der Reservoirs. Wasserwerke und großindustrielle Abnehmer decken einen größeren Teil ihres Wasserbedarfs durch den Ankauf von Rohwasser aus den Açudes. Die Wasserversorgung im Großraum Fortaleza genießt Priorität, wobei ein Großteil des Wassers über den „*Canal do Trabalhador*“ aus dem Jaguaribe-Einzugsgebiet herübergeleitet wird. Ein bestimmter Anteil des gespeicherten Wassers wird für die ganzjährige Bewässerung in einzelnen Flussabschnitten abgegeben. Aufgrund einer fehlenden Planung kommt es dabei häufig zu Problemen bei der Bewirtschaftung von Stauseen und sich daran anschließender Bewässerungsprojekte. Eine gezielte Bewirtschaftung mit Kontrollen findet nur vereinzelt statt. Im Fall der unkontrollierten Wasserentnahme sind ökologische Probleme durch Grundwasserabsenkung und soziale Spannungen absehbar. Als Ursachen der unzureichenden Planung sind zu nennen:

- die unklare Verteilung der Zuständigkeiten zwischen den Behörden,
- häufige Änderungen in der Organisationsstruktur und den Zuständigkeiten,
- nicht geklärte Finanzierung der Folge- und Betriebskosten und
- nicht geklärte Eigentumsfragen.

Erst allmählich wird erkannt, dass für eine angemessene Wasserversorgung auch ein bedarfsorientiertes Wassermanagement wichtig ist. In Ceará werden mittlerweile Nutzergruppen an der Planung der Wasserversorgung in Komitees in Wassereinzugsgebieten beteiligt. Ebenso werden Nutzerkataster erstellt und Wasserrechte vergeben.

3.4 Naturräumliche Grundlagen

3.4.1 Geologie

Das Untersuchungsgebiet ist durch zwei geologische Hauptbereiche gekennzeichnet:

- (a) das sedimentäre Gestein des Parnaíba-Beckens, das ca. 80% der Landesfläche Piauí ausmacht und sich leicht nach Westen auf den Grenzfluss Parnaíba zuneigt und
- (b) den kristallinen Sockel, der den größten Teil der Landesfläche (ca. 80%) Ceará's prägt.

Im sedimentären Bereich findet sich eine klassische Schichtstufenlandschaft mit Gebirgsketten (*Serras*) und Hochflächen (*Chapadas*) sowie zum Teil grundwassernahen Tälern, die durch rückschreitende Erosionsprozesse entstanden ist. Der Südosten Piauí's ist dagegen, wie Ceará, von kristallinem Grundgebirge geprägt, welches morphologisch leicht gewellte Ebenen ausbildet, die durch einzelne Bergketten oder Inselberge unterbrochen sind.

3.4.2 Natürliche Vegetation

Beide Bundesstaaten weisen mit 82.9% in Ceará und 92.3% in Piauí einen hohen Anteil an natürlicher Vegetation auf, die allerdings teilweise einer Nutzung durch extensive Weidewirtschaft unterliegt. Die übrige Flächennutzung entfällt hauptsächlich auf den Ackerbau (Tabelle 3.2).

	Natürliche Vegetation	Ackerbau- fläche	Wasser- fläche	versiegelte Fläche
Ceará	82.9	15.9	<1	1
Piauí	93.3	6.6	<1	<1

Tabelle 3.2: Prozentuale Verteilung der Flächennutzung in Piauí und Ceará (IBGE, 1998a, 1998b)

Die für diese Region typischen Vegetationsformen sind die *Caatinga* und der *Cerrado*.

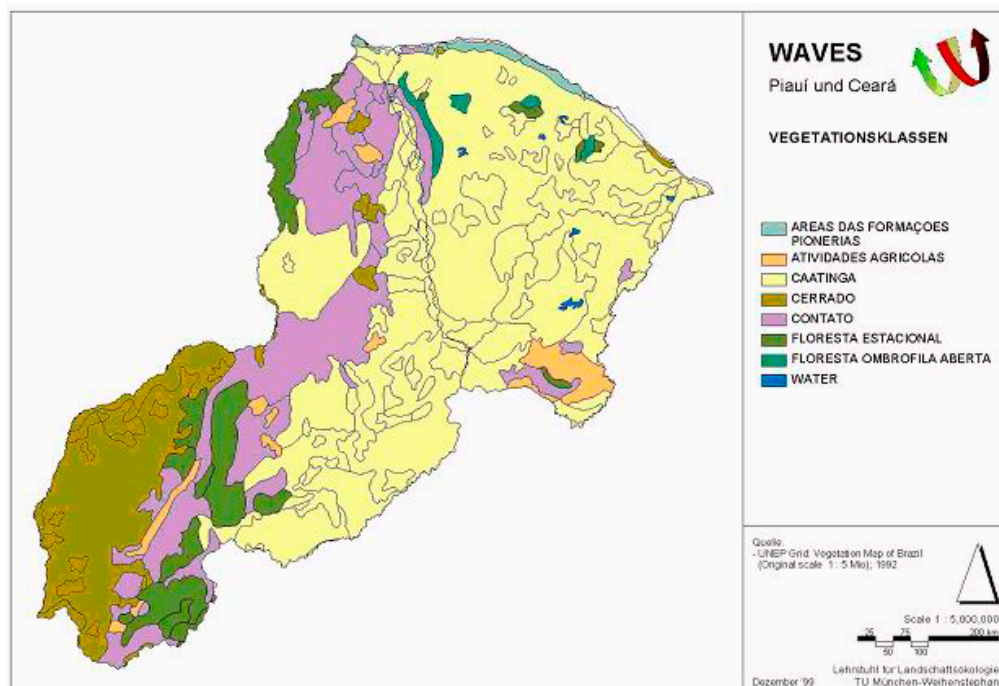


Abb. 3.4 Verteilung der Vegetationsformen innerhalb des Untersuchungsgebietes. Quelle: UNEP Grid Vegetation Map of Brazil. Bearbeitung durch TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Landschaftsökologie

Der Cerrado weist wegen der stark verwitterten Böden (mit hohem Anteil an freiem Aluminium) und den häufig auftretenden Waldbränden zu meist eine geringe Baumdichte mit einem hohen Unterwuchs an Gräsern auf. Die Caatinga, d.h. der weiße Wald, so genannt, weil die Blätter in der Trockenzeit fehlen, wird von Gehölzen dominiert. Es werden zwei Grundtypen unterschieden: baumartige und strauchartige Gehölze. Maßgeblich für die Entstehung dieser Vegetationsformen war die Wechselwirkung von Klima, Relief, Ausgangsgestein und Bodenbildung bei jährlichen Niederschlägen zwischen 300 und 1500 mm (SEIBERT, 1996).

Der Cerrado findet sich überwiegend im südwestlichen Piauí, während der Trockenwald

der Caatinga im kristallinen Bereich (z.B. in Ceará) vorherrschend ist (Abb. 3.4). Zwischen diesen befinden sich verschiedene Übergangszonen, wie z.B. Cerrado/Caatinga oder Cerrado/Wald (CASTRO ET AL., 2003). In den niederschlagsreicheren Gebirgsregionen und Küstengebieten finden sich auch andere Vegetationsformen, z.B. Dünen oder Mangroven, die aber nur einen geringen prozentualen Anteil an der Gesamtfläche einnehmen (BEZERRA ET AL. 2003, FERNANDES, 1990). Aufgrund der intensiven Landnutzung werden gegenwärtig schon etwa 30% des „*poligono das secas*“ als von starker Degradierung betroffen eingestuft (GAESE, 2003).

3.5 Ökonomie

3.5.1 Gesamtwirtschaftliche Rahmendaten

Die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung beeinflusst die Auswirkungen von globalen Wandelprozessen auf regionaler Ebene. Ein stärkeres Wirtschaftswachstum kann zu einer verstärkten Nachfrage nach natürlichen Ressourcen führen und damit die Anfälligkeit gegenüber Variabilitäten des Klimas und ihren Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Ressourcen erhöhen. Andererseits kann ein industrieller Strukturwandel vom Agrarsektor hin zum Industrie- und Dienstleistungssektor die Bedeutung des Agrarsektors mindern, der am anfälligsten gegenüber Klimavariabilitäten ist.

Die nordöstlichen Staaten gehören zu den ärmsten Bundesstaaten Brasiliens. 1995 wiesen alle neun nordöstlichen Bundesstaaten (einschließlich Minas Gerais) zusammen einen Anteil von 15% am brasilianischen Bruttoinlandsprodukt (BIP) auf. 2.2% des brasilianischen BIP entfielen auf Ceará und nur 0.5% auf Piauí. Das BIP/Kopf in Ceará und Piauí lag

stets deutlich unter dem gesamtbrasilianischen BIP/Kopf (Abb. 3.5). Es betrug 1995 mit

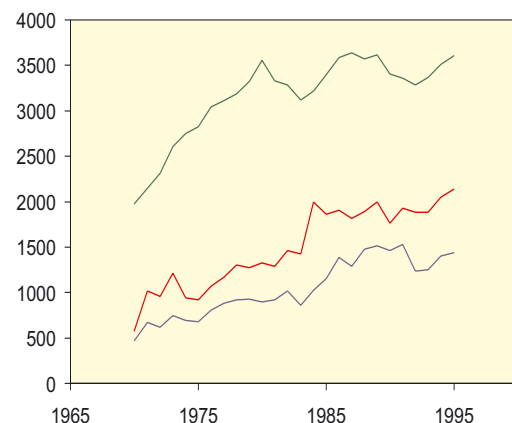


Abb. 3.5 Historische Entwicklung des BIP [10^6 US\$1995] von Brasilien (grün), Ceará (rot), Piauí (blau). Quelle: IPEA, 2002

2136 US-Dollar nur die Hälfte des brasilianischen Mittelwertes, der piauiensische Wert lag mit 1435 US-Dollar noch darunter. In beiden Bundesstaaten hat der Dienstleistungssektor den höchsten Anteil am BIP (Tabelle 3.3).

BIP in 10 ⁶ U\$1995	Ceará	Piauí
total	14344	3913
Landwirtschaft	1183	975
Industrie	2862	563
Dienstleistung	10299	2375
BIP/Kopf in U\$1995	2136	1435

Tabelle 3.3: Bruttoinlandsprodukt (BIP) für Ceará und Piauí 1995 (SUDENE, 1996)

Der Anteil der Landwirtschaft am BIP fällt in beiden Staaten unterschiedlich hoch aus. In Piauí ist er wesentlich höher als in Ceará. Die Bedeutung der Landwirtschaft für die Beschäftigungsbilanz beider Staaten wird in Tabelle 3.4 sichtbar (vgl. auch Kap.3.5.2): In Piauí arbeiten hier die meisten Beschäftigten, gefolgt von dem Dienstleistungssektor. In Ceará findet sich ein umgekehrtes Verhältnis. Im Vergleich der beiden Staaten weist Ceará bessere ökonomischen Rahmendaten auf als Piauí. So erreichte 1995 das BIP/Kopf in Piauí nur in etwa 67% des BIP pro Kopf in Ceará.

Sektoren	Piauí		Ceará	
	1992	1996	1992	1996
Landwirtschaft	51.3	45.6	40.3	39.7
Industrie	10.5	13.6	16.3	15.5
Dienstleistung	37.4	40.5	42.6	43.9
sonstige	0.8	0.4	0.78	0.93

Tabelle 3.4: Beschäftigte nach Wirtschaftssektoren 1992 und 1996 [%], IBGE(1998a, 1998b)

3.5.2 Agrarökonomische Rahmendaten

Bedeutung des Agrarsektors

Seit den Fünfzigerjahren hat die Bedeutung des Agrarsektors für die brasilianische Volkswirtschaft beständig abgenommen. Wurden 1950 noch 24% des Bruttoinlandsprodukts im Agrarsektor erwirtschaftet, waren es 1985 nur

noch 13%. Mitte der Neunzigerjahre belief sich der Anteil des Agrarsektors am BIP auf ca. 10% (IBGE, 1996A). Eine ähnliche Tendenz ist auch in Ceará und Piauí feststellbar.

Trotz der rückläufigen gesamtwirtschaftlichen Bedeutung hat der Agrarsektor aufgrund der großen Zahl von Beschäftigten eine hohe Bedeutung behalten. Dies gilt insbesondere für das Untersuchungsgebiet. Ein Grund hierfür ist, dass die wirtschaftliche Entwicklung in Ceará und Piauí weniger dynamisch verlaufen ist als die gesamtwirtschaftliche Entwicklung in Brasilien. In Folge dessen hat sich z.B. der Anteil des Industrie- und des Dienstleistungssektors am BIP von Ceará im Zeitraum von 1965 bis 2000 nur moderat gesteigert (Abb. 3.6).

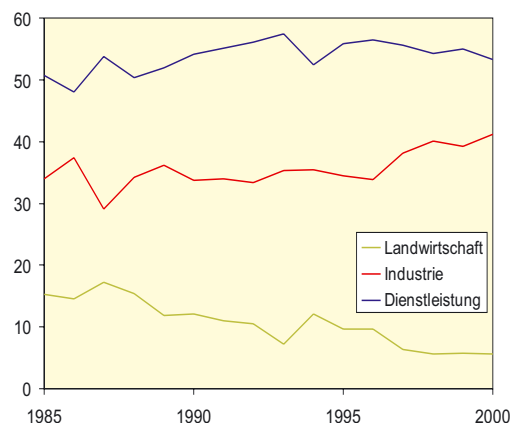


Abb. 3.6 BIP pro Sektor, Quelle: Fundação Instituto de Pesquisa e Informação do Ceará - Célula de Contas Regionais

Für die Neunzigerjahre ist in Ceará und auch in Piauí allerdings ein zunehmender industrieller Strukturwandel festzustellen. Belastbare Daten liegen aber nur für Ceará vor (vgl. Abb. 3.6). Wie sich dieser Trend über die nächsten Jahre entwickeln wird, ist gegenwärtig nicht abzuschätzen.

Einkommen und Beschäftigung

In einem Missverhältnis zum eher geringen (Ceará) bzw. moderaten (Piauí) Anteil am BIP steht die Bedeutung des Agrarsektors im Ver-

gleich der Beschäftigung nach Wirtschaftssektoren. Etwa 42% der erwerbstätigen Bevölkerung Cearás und Piauí sind im Agrarsektor beschäftigt (Tabelle 3.4). Dieser Wert liegt deutlich über dem Durchschnittswert für ganz Brasilien (29%) (IBGE, 1996c). Die meisten der Erwerbstätigen sind in Kleinbetrieben beschäftigt, die fast ausnahmslos subsistenzorientiert saisonale Grundnahrungsmittel wie Bohnen, Mais und Maniok in Mischkultur anbauen. Die Mechanisierung industrieller Fertigungsprozesse und die Erhöhung der Arbeitsproduktivität haben in den letzten Jahrzehnten zu kontinuierlichen Betriebsschließungen und Entlassungen im Agrarsektor geführt. Die Anzahl der Erwerbstätigen ging zwischen 1985 und 1995 in Ceará und Piauí um 12%, die Anzahl der Betriebe um 8% zurück (IBGE, 1996c).

In beiden Ländern fällt aufgrund des geringen Anteils am BIP das Pro-Kopf-Einkommen der in der Landwirtschaft Tätigen im Vergleich der einzelnen Branchen gering aus (Piauí 50.4 R\$ und Ceará 55.1 R\$ pro Monat). Die Einkommen aus der Landwirtschaft sind an sich und im Vergleich mit den Verdienstmöglichkeiten in anderen Sektoren sehr niedrig. Ein erheblicher Teil der Beschäftigungsverhältnisse in der Landwirtschaft wird darüber hinaus nicht monetär, sondern auf der Basis eines Naturalienentgelts vergütet. Valide Daten liegen hierzu aber nicht vor. In Piauí und Ceará waren 1996 die Beschäftigten ohne geldwertes Einkommen zu 85% in der Landwirtschaft tätig. Umfragen zeigen, dass von der ländlichen Bevölkerung zunehmend ein monetäres Einkommen angestrebt wird (FUHR ET AL., 2003).

Die höheren Pro-Kopf-Einkommen in Ceará deuten darauf hin, dass hier die Verdienstmöglichkeiten besser sind als in Piauí. Eine Erklärung hierfür könnte die stärkere Entwicklung des Industrie- und Dienstleistungssektors sein. Allerdings sagt das Pro-Kopf-Einkommen nichts über die Verteilung der Einkommen aus.

Die Migrationsprozesse von Arbeitskräften zwischen beiden Staaten zeigen, dass kein deutlicher einseitiger Abwanderungstrend von Piauí nach Ceará aufgrund der dortigen besseren Verdienstmöglichkeiten existiert. Zwischen 1991 und 1996 wanderten von Piauí rund 8.000 Menschen nach Ceará ab, während in umgekehrter Richtung nur 6.400 Menschen wanderten (IBGE, 1997b).

Preisentwicklung

Die Preise für Agrarprodukte unterliegen saisonalen Schwankungen. Die Preise für ausschließlich regional vermarktete Grundnahrungsmittel wie Mais und Bohnen sind unmittelbar nach der Ernte am niedrigsten. Die Landwirte sind aufgrund der Schwankungen der Produzentenpreise einem hohen Produktionsrisiko ausgesetzt. Dürrebedingte Produktionsausfälle haben erheblichen Einfluss auf die Produzentenpreise, die dann stark ansteigen, wie dies 1989 und 1998 Fall war. Dies gilt vor allem für die vorrangig regional vermarkteten Produkte (Abb. 3.7) (GAESE UND HINTERTHÜR, 2000). In Trockenjahren kann es hier aber zu einer teilweisen Abdämpfung kommen.

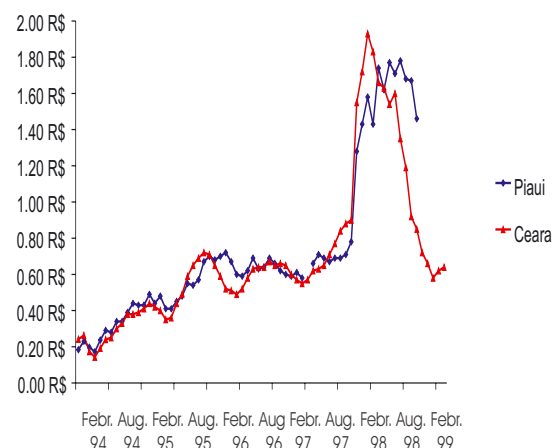


Abb. 3.7 Preisentwicklung der Produzentenpreise von Bohnen in Ceará und Piauí.
Quelle: Fundação Getúlio Vargas, in Gaese und Hinterthür, 2000

3.6 Landwirtschaft

3.6.1 Ackerbaukulturen und Anbaumethoden

Die ackerbaulich genutzte Fläche beträgt in Ceará 15.9% und in Piauí 6.6% der Gesamtfläche (Tabelle 3.2). Da zusätzlich Flächen der natürlichen Vegetation z.T. extensiv als Weideflächen genutzt werden, fällt der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen an der Gesamtfläche tatsächlich höher aus. Im Hinblick auf die klimatischen und geologischen Gegebenheiten können vier agro-ökologische Großregionen in Ceará und Piauí unterschieden werden. Die Voraussetzungen für die Landwirtschaft in diesen Regionen fallen je nach den durchschnittlichen Jahresniederschlägen und den standörtlichen Bodenbedingungen unterschiedlich aus. Hierauf wirken sich auch die unterschiedliche Ausstattung mit Infrastruktur und die Marktnähe aufgrund der jeweiligen Bevölkerungsdichte aus (Abb. 3.8).

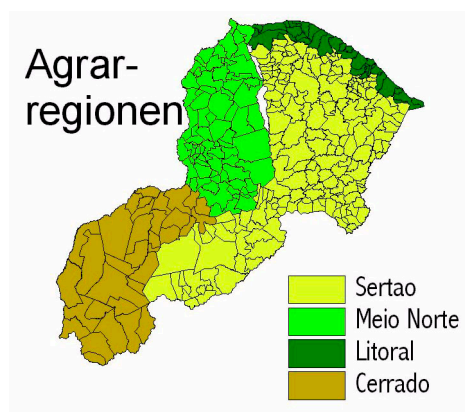


Abb. 3.8 Einteilung der Munizipien in vier Regionen, die hinsichtlich der landwirtschaftlichen Nutzung ähnlich sind

Im Küstenstreifen (*Litoral*) beträgt der durchschnittliche Jahresniederschlag 1100 mm. Bei insgesamt guten standörtlichen Eigenschaften und einer ausgebauten Infrastruktur sowie Marktnähe (höchste Bevölkerungsdichte) herrschen hier die vergleichsweise besten Produktionsbedingungen. Im Sertão fallen dagegen

nur durchschnittlich 700 mm Jahresniederschlag. Dieser geringe Niederschlag führt dazu, dass trotz vergleichsweise fruchtbarer Böden die Voraussetzungen für die Landwirtschaft relativ ungünstig sind. Dazu trägt auch bei, dass die Infrastruktur unterentwickelt und die Bevölkerungsdichte und damit die Marktnähe niedrig sind. In der Cerradoregion im Südosten von Piauí sind die Jahresniederschläge zwar vergleichbar hoch wie im Litoral (1121 mm). Die weniger fruchtbaren Böden, die schlechte Infrastruktur und die relative Marktfarbe aufgrund der niedrigeren Bevölkerungsdichte führen in diesem Gebiet aber zu erschwerten Produktionsbedingungen (GAISER ET AL. 2003B M.W.N.).

In beiden Staaten hatte die extensive Viehwirtschaft lange Zeit eine starke Bedeutung. In den letzten Jahrzehnten hat der Ackerbau dagegen an Bedeutung zugenommen und stellt insbesondere in Ceará die dominante Bewirtschaftungsform dar.

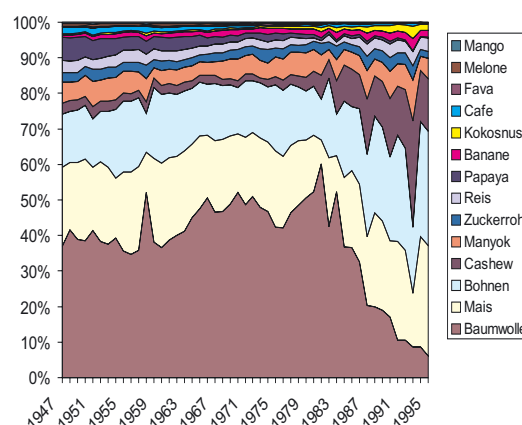


Abb. 3.9 Relativer Anteil der Anbauflächen verschiedener in Ceará angebaute Kulturpflanzen
Quelle: IPLANCE, 1996

Die flächenmäßig bedeutendsten Ackerbaukulturen sind in Ceará Mais, Bohnen, Cashew, Maniok und Baumwolle. Die Produktion von Bohnen und Cashew hat in den letzten zwei

Jahrzehnten zugenommen, wogegen die Produktion von Baumwolle vor allem aufgrund der Abnahme der Bodenfruchtbarkeit sowie von Schädlingen abgenommen hat (Abb. 3.9). Bezüglich des erwirtschafteten Preises pro Kulturpflanze dominieren neben Bohnen cashcrops wie Bananen und Zuckerrohr (Abb. 3.10).

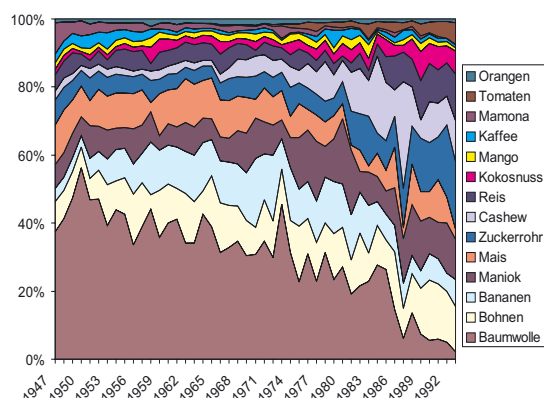


Abb. 3.10 Relativer Anteil des Produktionswertes verschiedener in Ceará angebaute Kulturpflanzen. Quelle: IPLANCE, 1996

Die Skala der Anbaumethoden reicht vom einfachen Subsistenzanbau bis hin zur intensiven Landwirtschaft. In den dünn besiedelten Gebieten wird zumeist Wanderfeldbau betrieben, wobei die Fläche zumeist nur ein bis zwei Jahre genutzt wird. In dichter besiedelten Gebieten findet zumeist Regenfeldbau mit mechanisierter Bodenvorbereitung und sowohl ohne als auch mit Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln statt. Er stellt die häufigste Bewirtschaftungsform im Untersuchungsgebiet dar. Ein geringer Anteil des Bewässerungsfeldbaus wird ohne Einsatz an Düngemitteln und meistens mit Stau- oder Furchenbewässerung betrieben. Bewässerungsfeldbau mit intensivem Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln wird von wenigen Großbetrieben und gut ausgebildeten Landwirten durchgeführt. Hier wird marktorientiert produziert, wobei sich hohe Erträge aufgrund von zwei bis drei Ernten pro Jahr ergeben (HOYNCK, 2003).

3.6.2 Strukturverteilung im Agrarsektor

Der Anteil der landwirtschaftlichen Betriebsflächen an der Gesamtfläche ist zwischen 1950 und 1985 sowohl in Ceará als auch in Piauí gestiegen (Abb. 3.11). Maßgeblich hierfür ist, dass auf die steigende Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten durch die Bevölkerungszunahme vor allem mit der Ausweitung der Anbauflächen und nicht mit einer Intensivierung der Produktion reagiert wurde. Für den Zeitraum von 1985 und 1995 ist dagegen für beide Staaten eine Abnahme der landwirtschaftlichen Nutzflächen um 18% feststellbar. Der Rückgang fand sowohl bei den Acker- als auch bei den Weideflächen statt. Ein Grund hierfür kann der Rückgang der Baumwollproduktion (vgl. Abb. 3.10) oder die Degradation nicht-nachhaltig genutzter Flächen sein.

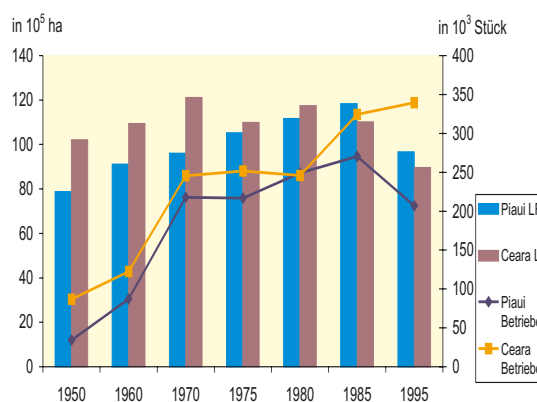


Abb. 3.11 Entwicklung der Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe und Betriebsflächen in Ceará und Piauí 1950 - 1995. Quelle: IBGE, 1998a, 1998b

Die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe hat sowohl in Ceará als auch in Piauí von 1950 bis 1995 stark zugenommen; seit den Achtzigerjahren ist sie aber in Piauí rückläufig (vgl. Abb. 3.11, FUHR ET AL., 2000). Die durchschnittliche Betriebsgröße betrug 1995/96 in Piauí 47ha und in Ceará 26ha. Dieser Unterschied von knapp 40% entspricht in etwa dem

Unterschied zwischen beiden Staaten im Jahr 1950. Auffällig ist, dass zu diesem Zeitpunkt die durchschnittliche Betriebsgröße bedeutend größer war (vgl. Abb. 3.12). 70% aller Betriebe im Jahr 1995/96 waren Betriebe mit einer Betriebsfläche von weniger als 10 ha. Diese Betriebe verfügten aber nur über 5% der gesamten Betriebsfläche. Große Betriebe finden sich vor allem im Südwesten von Piauí (Cerrado-Region), wo die großflächige extensive Rinderhaltung dominiert.

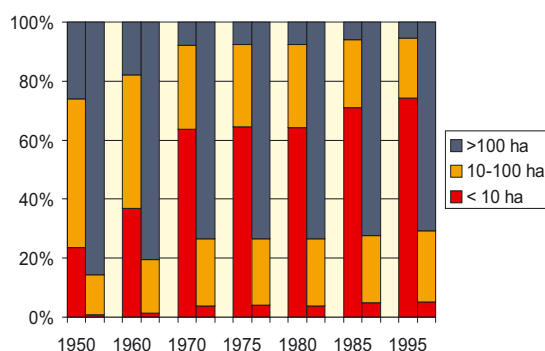


Abb. 3.12 Entwicklung der Betriebsgröße und Betriebsflächen für verschiedene Größenklassen in Ceará und Piauí 1950-1995. Quelle: IBGE, 1998a, 1998b

Eine Ursache für die Abnahme der durchschnittlichen Betriebsgröße ist das System der Erbpacht, bei dem die Betriebsfläche unter den Nachkommen aufgeteilt wird. Die geringe wirtschaftliche Dynamik führt in Kombination mit der ungleichen Flächenverteilung und den schlechten standörtlichen Bedingungen dazu, dass kleine Betriebe nur schwer expandieren können. Die Zunahme der ungleichen Verteilung von Flächen über die letzten vierzig Jahre hat sich hierauf verschärfend ausgewirkt (KRÜGER, 1978). Ein großer Anteil der bewirtschafteten Flächen entfällt auf Pächter und hier vor allem auf Pächter mit einem produktionsabhängigen Pachtsatz. Ebenso wird ein nicht unerheblicher Teil der Flächen wild, d.h. ohne Rechtstitel, besiedelt. Pacht und wilde Siedlung machen zusammen über die Hälfte der

Betriebsformen aus. Sie verfügen aber zusammen nur über 9% der gesamten Betriebsfläche.

3.6.3 Hauptprobleme der Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist durch eine Reihe von Problemen gekennzeichnet, die ihre Ursachen u.a. in der hohen Variabilität der Niederschläge bei unterschiedlichen standörtlichen und agrarstrukturellen Bedingungen haben (HÖYNCK, 2003, GAESE UND HINTERTHÜR, 2000):

- die hohe Variabilität der Niederschläge bedingt Schwankungen der Erträge aus der pflanzlichen Produktion und der natürlichen Vegetation, was die Futtergrundlage für die Tierhaltung gefährdet. Großbetriebe sind hiervon weniger betroffen, da sie häufig über eine eigene Wasserversorgung in Form kleiner Stauseen verfügen, die sie auch als Viehtränke nutzen können, und zudem überregional Futtermittel zukaufen.
- die Produktivität der landwirtschaftlichen Produktion ist aufgrund unzureichender Technisierung und Kapitalarmut in den meisten Betrieben gering.
- viele Kleinbetriebe leiden unter Landknappheit, sind aber dazu gezwungen, jedes Jahr möglichst viel Fläche zu bestellen und übernutzen deshalb ihre knappen Flächen. Durch den Nährstoffentzug verringert sich die Fruchtbarkeit der Böden, wodurch Flächenproduktivität und Erträge sinken, was die Flächenverfügbarkeit wieder begrenzt.
- ein großer Anteil der Betriebsflächen von Großbetrieben bleibt ungenutzt. Der Anteil von eigentlich produktiven Flächen, die länger als vier Jahre ungenutzt sind, an der gesamten Betriebsfläche steigt mit der jeweiligen Betriebsgröße (IBGE, 1996c). Die Umverteilung von Land wird deshalb oft als die wichtigste Maßnahme zur Armutsbekämpfung genannt (HEES, 1996, TAVARES, 1995). In anderen Großregionen Brasiliens

- ist trotz einer ähnlichen Landkonzentration die Lage nicht so prekär (VELOSO, 1988).
- der verringerten Bodenfruchtbarkeit kann kaum durch chemische Düngemittel begegnet werden, da den Kleinbetrieben hierfür das Geld fehlt. Die Möglichkeiten zur natürlichen Regeneration der Böden sind limitiert, da die Pflanzenreste für die Tierernährung verwendet und auch keine Fruchtfolgenwechsel durchgeführt werden.
 - zu hohe Bestockungszahlen in der extensiven Rinderwirtschaft der Großbetriebe führen zu der Degradation einer zunehmenden Zahl von Weideflächen.
 - die häufige Rechtsunsicherheit von oftmals mündlich vereinbarten Pachtverträgen bedeutet für die Kleinpächter eine starke Abhängigkeit von den Großgrundbesitzern, die die Pachtflächen zur Verfügung stellen. Probleme ergeben sich insbesondere dann, wenn die Ernte des Pächters zu gering ist oder ganz ausfällt (BRÜHL, 1989).
 - die Nachfrage nach Arbeitskräften in der Landwirtschaft fällt in Abhängigkeit von der Jahreszeit sehr unterschiedlich aus. In der Regenzeit kommt es zumeist zu einer vollständigen Arbeitsauslastung, in der Trockenzeit herrscht Unterbeschäftigung. Die Einstellung nach Bedarf und Saisonverlauf setzt Gelegenheits- und Saisonarbeiter dem Risiko aus, in Dürrejahren keine Arbeit zu finden. Diese Gruppe weist ein überdurchschnittlich hohes Migrationspotential auf.

3.7 Soziokultureller Rahmen

3.7.1 Demographie

Ceará weist bei einer Einwohnerzahl von etwas mehr als 7.4 Millionen eine Bevölkerungsdichte von durchschnittlich 46 Einwohnern pro km² auf. Piauí ist mit rund 9 Einwohnern pro km² bei einer Gesamteinwohnerzahl von etwas mehr als 2.8 Mio. weniger dicht besiedelt (IBGE, 2002). Zu den am dichtest besiedelten Gebieten im Untersuchungsgebiet gehören die Hauptstadt von Ceará, Fortaleza, und die umliegenden Munizipien. Die Küste und der Südosten sind ebenfalls dicht besiedelt. Die dünner besiedelten Munizipien liegen in der Sertão-Region und im Süden von Piauí.

Ein niedriger Altersdurchschnitt, eher hohe Geburtenraten und eher niedrige Zuwachsraten beim Bevölkerungswachstum kennzeichnen die Bevölkerungsstruktur beider Staaten. 1996 lag der Alterdurchschnitt der Bevölkerung in Ceará bei 26.1 Jahren und in Piauí bei 25.4 Jahren. Das Durchschnittsalter in ganz Brasilien belief sich 1996 auf 27.2 Jahre. Die Gebur-

tenrate lag 1996 (IBGE, 1997b) mit 25.3 Geburten in Piauí und 27.5 in Ceará je tausend Einwohner über dem brasilianischen Durchschnitt von 19.7. Die Zuwachsraten der Bevölkerung sind trotz der hohen Fertilität aber nicht überdurchschnittlich hoch. Eine Ursache können Migrationsprozesse sein. Hierfür liegen aber keine gesicherten Erkenntnisse vor. Das jährliche Bevölkerungswachstum im Zeitraum von 1991 - 1996 belief sich in Ceará auf 1.35% und entspricht damit in etwa dem brasilianischen Durchschnitt (1.42%). In Piauí fällt es mit 0.69% deutlich geringer aus (IBGE, 1997).

3.7.2 Migration

Lebensqualität

Es besteht keine allseits akzeptierte Definition von Lebensqualität. Lebensqualität kann unterschieden werden in eine objektiv und eine subjektiv erfahrbare Lebensqualität: Während sich die objektive Lebensqualität auf den Zustand der natürlichen Umwelt und ihrer Ent-

wicklung, auf das gesellschaftliche Umfeld und die ökonomische Leistungsfähigkeit der Volkswirtschaft und des politischen Systems bezieht, bezeichnet die subjektive Lebensqualität das Ausmaß der individuell erfahrenen Zufriedenheit hinsichtlich der Erfüllung und Erfüllbarkeit spezifischer Lebensbedürfnisse. Der Grad der Zufriedenheit richtet sich nicht nur nach den verfügbaren potentiell nutzbaren Ressourcen, sondern auch nach den eigenen Ansprüchen und Kompetenzen. Bei hohen Ansprüchen kann eine gute Lebensqualität dennoch als negativ empfunden werden (FUHR ET AL., 2003)

Eine konkrete Operationalisierung und Messung in der Praxis ist schwierig. Lebensqualität ist in diesem Sinne ein Konstrukt. Hilfsweise werden Indikatoren verwendet, die beschreiben, welche Ressourcen Individuen (potentiell) zur Realisierung von Ansprüchen an (subjektive) Lebensqualität zur Verfügung stehen. Hierzu sind etwa Einkommen, Bildungsgrad, medizinische Versorgung, Analphabetenrate oder Armut zu zählen. Lassen sich die Ansprüche an Lebensqualität mit den vorhandenen Mitteln bzw. im Rahmen der Bedingungen vor Ort nicht erfüllen, kann die Migration eine Strategie zur Befriedigung der eigenen Ansprüche sein.

Die entsprechende Datenlage ist nicht sehr umfangreich. Begrenzte Datensätze für die Munizipebene stehen durch den *Índice de Desenvolvimento Humano* (IDH, 1998) zur Verfügung.

Bezogen auf das Jahr 1991 zeigt sich für das durchschnittliche Familieneinkommen pro Kopf eine große Bandbreite von 14% des Mindestlohns (*Salario Mínimo*/SM) bis zu 133% (in Fortaleza) (vgl. Abb. 3.13).

Das *Familieneinkommen pro Kopf* stieg zwischen 1970 und 1980 auf ungefähr das Doppelte, stagnierte dann aber zwischen 1980 und 1991 aufgrund der schlechten gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Dabei zeigen sich Diskrepanzen zwischen den metropolitanen

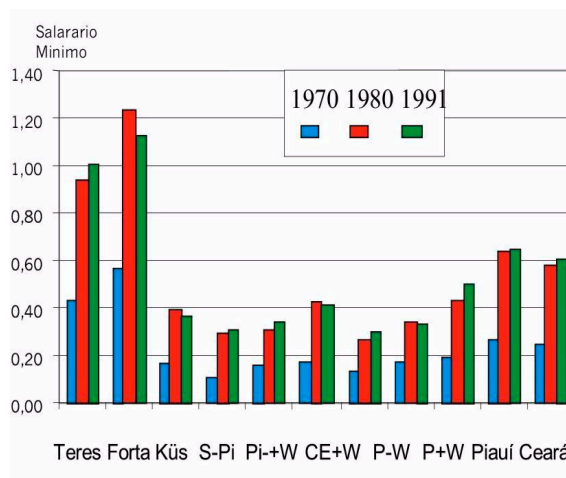


Abb. 3.13 Durchschnittliches pro Kopf Einkommen in *Salario Mínimo* (1991) in verschiedenen Regionen (inflationsbereinigt) (PNUD et al., 1998); zur Definition der Regionen siehe Kapitel 4.2.1.1, Abb. 4.2)

Ballungsräumen und den ländlichen Räumen. Im Großraum Fortaleza lag das Familieneinkommen pro Kopf im Jahr 1991 um ca. 10% höher als in Teresina; die anderen Regionen kamen nur auf 30-40% dieses Wertes.

Als Maß für den Anteil der Bevölkerung mit einem vergleichsweise *geringen Einkommen* wird hier der Anteil der Personen an der Gesamtbevölkerung verwandt, die weniger als die Hälfte des Mindesteinkommens zur Verfügung haben. Dabei zeigen sich ebenfalls erhebliche Unterschiede zwischen Stadt und Land. Der Anteil der Bevölkerung, der nur über ein unzureichendes Einkommen verfügt, variiert auf regionaler Ebene im Jahr 1991 zwischen 48% (Fortaleza), 56% (Teresina) und 85% (Sertão, Süd Piauí). Eine Verringerung der Armut ist vor allem in den großen Städten gelungen. So sank der Armutsgrad in Fortaleza auf 60% und in Teresina auf 70% des Wertes von 1970. In den ländlichen Regionen konnte er dagegen nur auf 85-90% des Wertes von 1970 gesenkt werden.

Der Index, der die *Bildungsversorgung* der Bevölkerung über alle Schulangebote beschreibt, weist für das Jahr 1996 Werte zwi-

schen 0.43 und 1 auf. Über alle Regionen hinweg liegt er bei ca. 0.75 (IBGE, 1997A). Ein potentieller Zugang zum Bildungssystem und damit die Möglichkeit einer Verbesserung des durchschnittlichen Bildungsstands kann nicht ausgeschlossen werden. Hierzu passt, dass die Analphabetenrate bei den über 17-jährigen in Ceará von 37.4% (1991) auf 26.5% (1995) gesenkt werden konnte. Auf dem Land ist sie aber weiter hoch, bei teilweise 55%.

Valide Daten zum Versorgungsgrad mit *Gesundheitsreinrichtungen* liegen nur für Ceará vor. Dieser liegt für Ceará bei 0.4 Gesundheits-einrichtungen pro 1000 Einwohner. Dieser Durchschnittswert verdeckt den Umstand, dass erhebliche Unterschiede bei der Gesundheitsversorgung vor Ort bestehen können. In der Stadt Satire existiert z.B. nur eine Einrichtung für 12000 Einwohner. Wiederum sind auch hier Diskrepanzen zwischen Stadt und Land feststellbar. Die Rate der Kindersterblichkeit ist im Untersuchungsgebiet rückläufig, wobei die Daten größere Erfolge für Piauí angeben als für Ceará (PNUD ET AL., 1998). Auch hier machen sich Unterschiede zwischen Stadt und Land bemerkbar: So fallen innerhalb von Ceará die Raten im Osten (Küstengebiet, Großraum Fortaleza) weitaus niedriger aus als im Sertão und im Nordwesten des Untersuchungsgebiets.

Insgesamt verdeutlichen die Daten, dass in beiden Staaten zwar eine allgemeine Verbesserung der Lebensqualität zu beobachten ist, diese aber gleichwohl auf einem niedrigen Ausgangsniveau stattfindet und gravierende Diskrepanzen zwischen den metropolitanen Städten und dem ländlichen Raum aufweist. Der allgemeine durchschnittliche Familieneinkommens- und Bildungsgrad bleibt vergleichsweise niedrig, die Betroffenheit von Armut jedoch hoch.

Für nahezu alle Bereiche fällt für Ceará ein ausgeprägtes Gefälle zwischen dem Osten und dem Westen (Sertão) auf. Der Osten er-

scheint bei weitem entwickelter. Dies legen eine bessere Gesundheitsversorgung, eine niedrigere Analphabetenquote und eine bessere infrastrukturelle Ausstattung insbesondere in den Bereichen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sowie Energieversorgung nahe. Gleiches gilt für die Kommunikationsinfrastruktur. Ebenso gestalten sich die wirtschaftlichen Strukturindikatoren und öffentlichen Finanzen im Osten besser als im Westen.

Ein weiteres Gefälle ist zwischen allen Küstenstreifen und dem Landesinnern festzustellen. Dies fällt insbesondere bei den wirtschaftlichen Indikatoren, welche die Wohnsituation beschreiben, ins Auge. Sie sind in den Küstenregionen deutlich höher. Im Vergleich von Ceará und Piauí schneidet Ceará in den meisten genannten Bereichen besser ab. Hier ist ein Zusammenhang zwischen den höheren Pro-Kopf-Einkommen und den genannten Indikatoren von Lebensqualität feststellbar.

Migration im Untersuchungsgebiet

Die Betrachtung der Migrationsprozesse im letzten Jahrhundert zeigt eine deutliche Zunahme bei der Zahl der Menschen, die in andere Regionen Brasiliens auswanderten (Tabelle 3.5). Während der Jahre 1940-1970 verfünffachte sich die Zahl der Auswanderer. Gleichzeitig verdoppelte sich die allgemeine Bevölkerungszahl. Für die Neunzigerjahre zeigt sich eine Entspannung der Migrationsproblematik in Ceará. Zwischen 1991 und 1996 sank die Netto-Migrationsrate gegenüber dem Zeitraum 1986-1991 um rund ein Drittel. In Piauí hält die Problematik unvermindert an. Hier hat die Netto-Migrationsrate leicht zugenommen. Eine wesentliche Ursache für diese unterschiedliche Bilanz ist in den besseren ökonomischen und sozio-kulturellen Rahmenbedingungen in Ceará zu sehen. Mit der relativ hohen Netto-Migration lässt sich auch erklären, warum die Bevölkerungsentwicklung in Ceará

und Piauí trotz des jungen Aufbaus der Alterspyramide niedriger ausgefallen ist als im brasilianischen Durchschnitt (FUHR ET AL., 2003, M.W.N.).

	Einwohner [10 ⁶]	Auswanderer [10 ⁶]
1940	14.43	0.71
1950	17.97	1.02
1960	22.43	2.07
1970	28.67	3.79

Tabelle 3.5: Außerhalb der Region lebende Einwohner nordöstlicher Herkunft im Vergleich zur Bevölkerungsentwicklung (KRÜGER 1978)

Die Netto-Migration erfolgte in beiden Staaten hauptsächlich in den Südosten Brasiliens. Analysen aus dem Zeitraum zwischen 1986 und 1991 legen allerdings den Schluss nahe, dass ein Großteil der Wanderungen als Landflucht zu definieren ist. Dies bestätigt auch der Trend der Urbanisierung.

Vergleicht man die Nettomigrationsraten der einzelnen Regionen Cearás und Piaúis miteinander, so weisen nur die Hauptstädte Fortaleza und Teresina und der Großraum Fortaleza Netto-Immigration auf, während alle anderen Regionen Abwanderungen verzeichnen. Das Ausmaß der Migration innerhalb eines Gebietes ist dabei zu einem Großteil abhängig von dem Ausmaß der Vielfalt hinsichtlich günstiger und schlechterer Lebensbedingungen und Beschäftigungsmöglichkeiten. Dabei spielt auch der Schwierigkeitsgrad, räumliche Distanzen zu überwinden, eine wichtige Rolle.

Die eher kleinräumige Land-Stadt-Migration spiegelt die Schwierigkeit der Lebensbedingungen im ländlichen Raum. Deshalb versucht die ländliche Bevölkerung, sich durch Kleingewerbe und Handel in den Städten ein (zusätzliches) Einkommen zu erschließen.

Migration erfolgt häufig auch mit dem Ziel, die Versorgung der zurückbleibenden Familie sicherzustellen. Gerade in den ländlichen Gebieten ist die Bedeutung der Familie unverändert hoch. Üblicherweise überweisen Emigranten einen Teil ihres Einkommens in die Heimatregion. Die Familie stellt als Gegenleistung ein Garant dar, wenn zur Finanzierung der Abwanderung Geld geliehen werden muss. Daher kann Migration nicht als ein ausschließlich negativer Prozess verstanden werden.

Die Städte werden in Brasilien immer mehr zum Auffangbecken für die Landbevölkerung. So erhöhte sich der Urbanisierungsgrad in Brasilien zwischen 1960 und 1996 von 45% auf 78% (IBGE 1997A). Im gleichen Zeitraum nahm die Verstädterung in Piauí von 24% auf 58% zu. In Ceará lebten 1996 zwei Drittel der Bevölkerung im städtischen Raum gegenüber einem Drittel in 1960. Die 20 Munizipien mit der höchsten Zuwachsrate liegen im Umland oder in der Nähe von Fortaleza. Fast alle dieser Munizipien verzeichnen positive Wachstumsraten der Bevölkerungsentwicklung, wogegen strukturschwache Gebiete wie der Sertão negative Raten aufweisen.

Kapitel

4

Modellbeschreibung des Semi-arid Integrated Model (SIM)

4.1 Modellentwicklung

Aus den Ergebnissen der in Kap. 3 dargestellten Systemanalyse wurde ein Konzept für die integrierte Modellierung entwickelt, das den Ausgangspunkt der quantitativen Modellierung bildet. Die Systemstruktur wurde in unterschiedlichen Komplexitätsstufen entwickelt. In Abbildung 4.1 wird die entwickelte Systemstruktur in einer reduzierten Komplexitätsstufe wiedergegeben.

Die Schwerpunkte der Modellkonzeption liegen bei den Themenblöcken Wasser und Migration sowie bei den wichtigsten Zusammenhängen zwischen den beiden. Das wichtigste Bindeglied ist die Landwirtschaft. Der Schwerpunkt Wasser unterteilt sich nach den Aspekten des physischen Wasserangebots (das direkt vom Klima als externe treibende Kraft beeinflusst wird), der Wassernachfrage verschiedener Sektoren und des Wassermanagements, welches auch die Wasserinfrastruktur und ihre Steuerung beinhaltet.

Auf der anderen Seite steht der Schwerpunkt der Migrationsdynamik (als wichtigste gesellschaftliche Folge von Dürreperioden), die hauptsächlich durch eine subjektiv empfundene Verschlechterung der Lebensbedingungen im ländlichen Raum ausgelöst wird, die auch objektiv feststellbar ist. Dieser Faktor Lebensqualität wird durch unmittelbar lebenserhaltende Faktoren wie

die Verfügbarkeit von Trinkwasser und Nahrung und durch ökonomische Faktoren wie die Erwerbstätigkeit und Einkommensverfügbarkeit sowie soziokulturelle Faktoren wie Gesundheitsversorgung oder Bildungsmöglichkeiten beeinflusst.

Der wichtigste verbindende Faktor dieser beiden Hauptthemen ist die Landwirtschaft. Einerseits ist der Agrarsektor der wichtigste Wassernutzer und damit stark von der Wasserspeicherung sowohl im Boden als auch in den Stauseen abhängig. Andererseits ist der Agrarsektor die wichtigste Quelle für Einkommen und Beschäftigung im ruralen Hinterland und versorgt die Nahrungsmittelproduktion in den zahlenmäßig dominierenden Subsistenzbetrieben.

Rückkopplungen zeigen sich in diesem System hauptsächlich zwischen Wasserdargebot und Wassernachfrage (vor allem durch die Bewässerungslandwirtschaft und die Bevölkerung) und über staatliche und private Eingriffe vor allem bei der Wasserspeicherung.

Tendenzen in demographischen Parametern (z.B. Geburten- und Sterberate), Entwicklungen der technologischen Möglichkeiten sowie Vermarktungsmöglichkeiten für Agrarprodukte sind neben der Klimavariabilität die wichtigsten externen treibenden Faktoren.

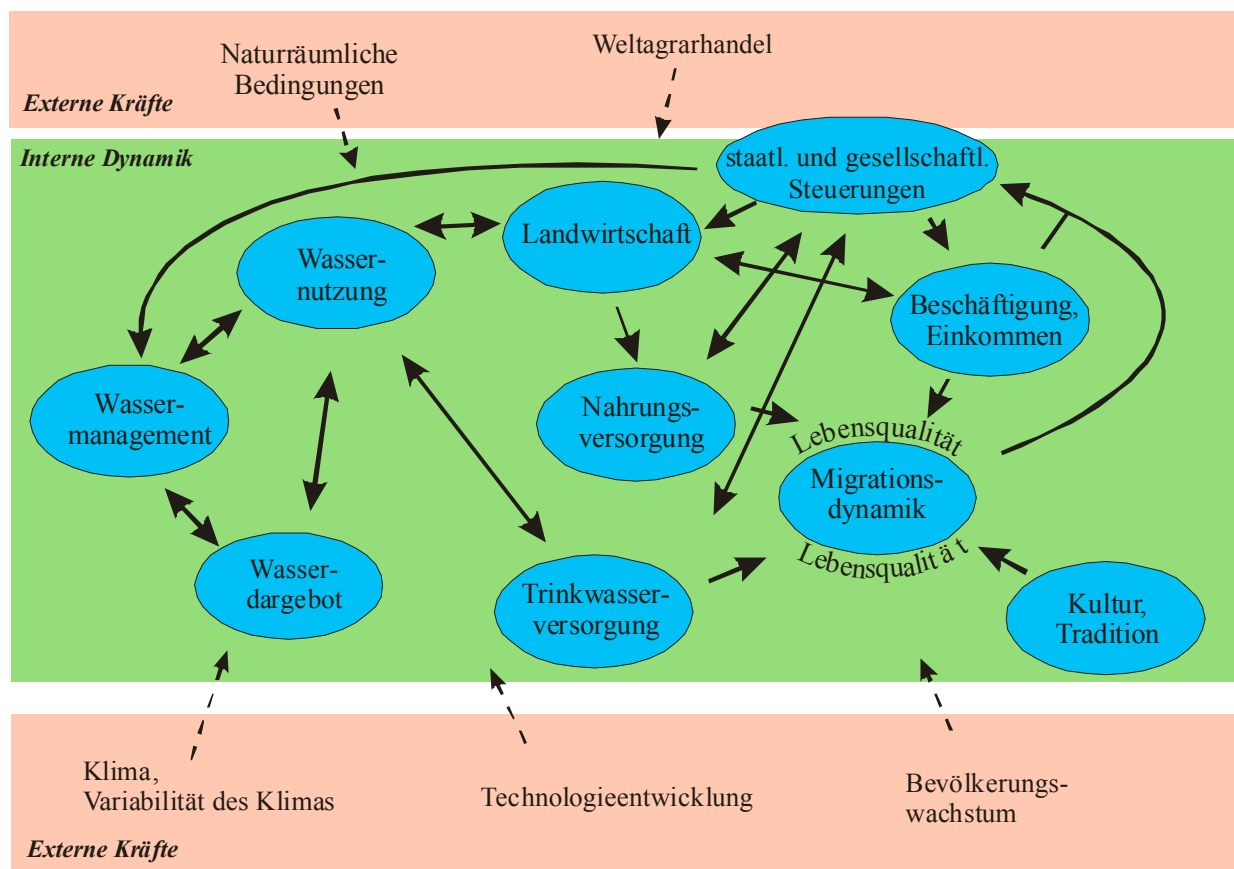


Abb. 4.1 Systemstruktur für die integrierte Modellierung, basierend auf der Leitfrage „Wasserverfügbarkeit und Migration im semi-ariden Nordosten Brasiliens“ (Krol und Bronstert, 1997)

Neben dieser Grobdarstellung wurden detailliertere Modellentwürfe entwickelt, wobei die einzelnen Variablen sowie die wichtigsten abzubildenden Prozesse identifiziert wurden. Das Resultat waren eine Matrixdarstellung der Zusammenhänge und eine graphische Darstellung in Form eines „Spaghetti-Diagramms“ (vgl. KROL UND BRONSTERT, 1997). Die Umsetzung der Systemanalyse in ein konkretes Modell erfolgte schrittweise. Zuerst wurde eine „Prototypversion“ erstellt, die die wichtigsten Systemzusammenhänge im Untersuchungsgebiet aggregiert erfasste und sich auf die gesamte zu beschreibende Kausalkette bezog.

Diese Prototypversion diente zwei Zielen. Zum einem konnte so der Gesamtentwurf des Modells getestet werden, um eventuelle Definitionsprobleme oder Lücken im System zu fin-

den. Zum anderen diente das Prototypmodell dazu, den mitarbeitenden Gruppen zu zeigen, welche Rolle die unterschiedlichen Teilkomponenten im Modell spielen. Es enthielt aber keine räumliche Differenzierung. Im späteren Verlauf wurden die einfachen unvollständigen Prozessbeschreibungen des Prototypmodells schrittweise durch detailliertere Teilmodule ersetzt. Teilweise wurden aber auch neue Teilmodule hinzugefügt. Diese Module konnten somit jeweils im Rahmen eines laufenden integrierten Modells getestet werden. Als Gesamtergebnis entstand das „Semi-arid Integrated Model“ (SIM) (vgl. Abb. 4.3, KROL ET AL., 2002).

Bei dem Ausbau der Module wurde darauf verzichtet, einen vorgeschriebenen gemeinsamen Modellierungsansatz zu benutzen, um kei-

ne Einschränkungen für die Modellierung der abzubildenden Prozesse in den Teilmodellen zu schaffen (vgl. Kapitel 2.2). Bei der Kopplung

der Teilmodelle wurden die in Kapitel 2.2 genannten Grundsätze berücksichtigt.

4.2 Modellstruktur

Das Semi-arid Integrated Model (SIM) erfasst die dynamischen Zusammenhänge der kausalen Wirkungskette Klimaänderung - Wasserverfügbarkeit - Landwirtschaft - Migration für Ceará und Piauí. Es rechnet deterministisch und in diskreten Zeitschritten. Das Modell wurde mit der Programmiersprache Fortran geschrieben und läuft unter dem Betriebssystem Unix. Abweichend hiervon wurde das Teilmodell RASMO mit Hilfe der Optimierungssoftware Gams geschrieben. Ein Überblick über die Programmstruktur und technische Realisierung findet sich im Anhang A4.

4.2.1 Skalen des Modells

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, führt ein integriertes Modell eine Vielzahl verschiedener Prozesse zusammen, die von unterschiedlichen Disziplinen auf verschiedenen Maßstabsebenen bearbeitet werden. Für die Definition und Verbindung der Skalen muss deshalb eine Kompromisslösung gefunden werden zwischen feineren Skalen, auf denen die einzelnen Prozesse ablaufen und auf denen detaillierte Feldmessungen vorgenommen werden können, und Skalen mit einer gröberen Auflösung, auf der häufig raumdeckende Sekundärdaten nur verfügbar sind, die aber allgemein aussagekräftige Ergebnisse ermöglichen und notwendig sind, um die Auswirkungen globaler Wandelprozesse abbilden zu können.

Skalenverbindungen sind ein wichtiger Bestandteil der Integration. Beim SIM-Modell wurden für die Verbindung der Skalen sowohl top-down-Analysen als auch bottom-up-Analysen einzelner wichtiger Prozessabläufe durch die

jeweiligen Disziplinen benutzt, die über die darauf aufbauenden Teilmodelle in das Gesamtmodell einfließen. Eine praktisch durchgängig genutzte Methodik war die der Klassifizierung, d.h. die Ableitung von Parametrisierungen für wenige gut studierte kleinräumige Einheiten und deren Anwendung auf ganze Teilgebiete. Dabei erfolgte die Bestimmung durch eine Klasseneinteilung, die auf Sekundärdaten beruhte. Weiter wurde die Abhängigkeit der simulierten Ergebnisse vom Aggregationsgrad der Eingabedaten untersucht, um die räumlichen und zeitlichen Skalen zu ermitteln, auf denen die Parametrisierungen gültig waren bzw. die Parameterwerte zu bestimmen, die skalenabhängig anzupassen waren.

4.2.1.1 Räumliche Skalen

Im Modell werden drei räumliche Skalenebenen unterschieden:

(1) Die 332 *Munizipien* der Bundesstaaten Ceará und Piauí dienen als gemeinsame räumliche Diskretisierungseinheit aller Module des integrierten Modells. Sie sind durchschnittlich rund 1000 km² groß und sind die kleinste Einheit, die geographisch explizit dargestellt wird; unterhalb dieser Ebenen werden prozentuale Anteile beschrieben (z.B. Anbauflächen, Böden). Die naturräumlichen Einheiten, z.B. Einzugsgebiete, müssen deshalb auf kommunaler Ebene in ihrer Darstellung an administrative Grenzen angepasst werden, wodurch die Genauigkeit des Modells sinkt.

(2) Die räumliche Ausdehnung von SIM umfasst die Ebene der beiden *Bundesstaaten*. Die Makroskala der Bundesebene erlaubt die Be-

rechnung von wichtigen Größen, wie etwa dem gespeicherten Wasser, der Agrarproduktion oder der Migration, auf Landesebene, wo diese aggregierten Größen politische Entscheidungen beeinflussen.

(3) Zusätzlich bedarf es jedoch einer dritten räumlichen Skala, einer Mesoskala, da sich einzelne Variablen oder Parameter je nach *Region* stark unterscheiden können, wie z.B. Migrationsprozesse, und viele treibende Kräfte in den Szenarien definiert werden müssen, wofür eine solche Skala notwendig ist. Die Munizipalebene ist hierfür zu fein, da die treibenden Kräfte nicht für alle Munizipien definiert werden können, wogegen die bundesstaatliche Ebene zu grob ist, da die Unterschiede nicht ausreichend korrekt abgebildet werden können.

Das Gebiet von Ceará und Piauí wurde hierfür in acht "Szenarioregionen" eingeteilt, die während des Prozesses der Szenarienerstellung definiert wurden (Abb. 4.2) (DÖLL ET AL., 2003B). Kriterien für die Abgrenzung der Regionen waren vergleichbare agrarökonomische Rahmenbedingungen, vergleichbare naturräumliche Rahmenbedingungen (Niederschlag, potentielle Wasserressourcen, Lage innerhalb des Einzugsgebiets, sedimentärer oder kristalliner Untergrund) und administrative Grenzen. Die Regionen umfassen zum einen die beiden Hauptstädte Fortaleza und Teresina, zum anderen jeweils eine Region mit viel und mit wenig Wasser in beiden Bundesstaaten sowie die Küstenregion Ceará's und den Süden Piauí's.

Eine weitere verwendete Skala sind die Agrarregionen (vgl. Kapitel 3.6.1). Diese sind jedoch von geringerer Bedeutung, da auf dieser Skala nur wenige Eingabeparameter definiert sind. Sie ist deshalb nicht zu den Hauptskalen des Modells zu zählen.

4.2.1.2 Zeitliche Skalen

Die zeitliche Auflösung reicht von einem Tag bis zu fünf Jahren entsprechend des zu

Szenarioregionen

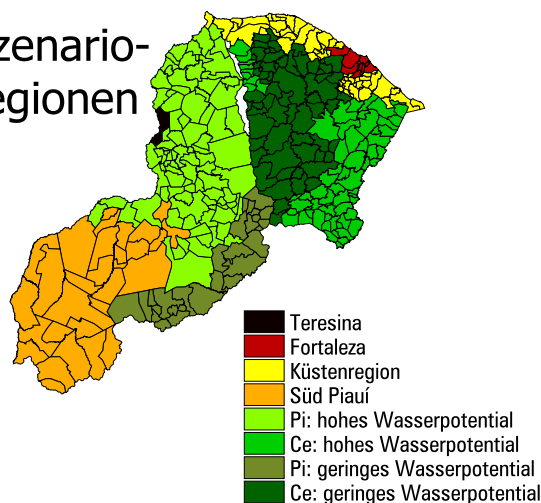


Abb. 4.2 Darstellung der Szenarioregionen

beschreibenden Prozesses. Der Zeithorizont liegt in der Größenordnung von 25 bis 50 Jahren und erlaubt somit die Analyse von Entwicklungen mit weitreichenden Auswirkungen im Untersuchungsgebiet in Szenarienstudien. Der Zeitraum entspricht den Planungszeiten für die Wasserinfrastruktur und umfasst auch die Reichweite politischer Entscheidungen über langfristige Investitionsprojekte wie z.B. Stauseen. Der gewählte Zeitraum ermöglicht es außerdem, die Folgen von globalen Änderungen abschätzen zu können, deren Signifikanz sich erst auf solchen Zeitskalen zeigt. Die Berechnung der Ausgabevariablen erfolgt hauptsächlich auf der Jahresskala, teilweise auch auf der Monatsskala (vgl. im Anhang Tabelle A4.2).

4.2.2 Aufbau des Modells

Das Modell besteht aus verschiedenen Modulen. Die Hauptteile beschreiben die Schwerpunkte Klima (CLIMO), wasserbezogene Prozesse (HYMO), Landwirtschaft (LAMO) und soziokulturelle und ökonomische Zusammenhänge (SEMO). Diese Hauptteile wiederum bestehen aus Teilmodellen und integrierenden Verbindungen, die eine konsistente Verknüpfung der Teilmodelle herstellen. Die Verknüpfung erforderte gut definierte Variablen und

Schnittstellen. Teilweise mussten verknüpfende Elemente entwickelt werden, um die verschiedenen Variablen in eine Beziehung zueinander zu setzen. Diese bilden zugleich auch die systeminternen Rückkopplungen ab, welche das langfristige Systemverhalten maßgeblich bestimmen.

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 Szenarioannahmen in die entsprechenden Teilmodelle ein (vgl. zur Erklärung von Szenarien Kapitel 6.3.1). Diese Szenarien entsprechen dabei sowohl sehr umfangreichen detaillierten Studien als auch einfachen Sensitivitätsanalysen. Die Behandlung von Akteursverhalten konnte im vorliegenden Modell nur eingeschränkt vorgenommen werden: Das Verhalten von Akteursgruppen wird nur teilweise für den landwirtschaftlichen Sektor abgebildet.

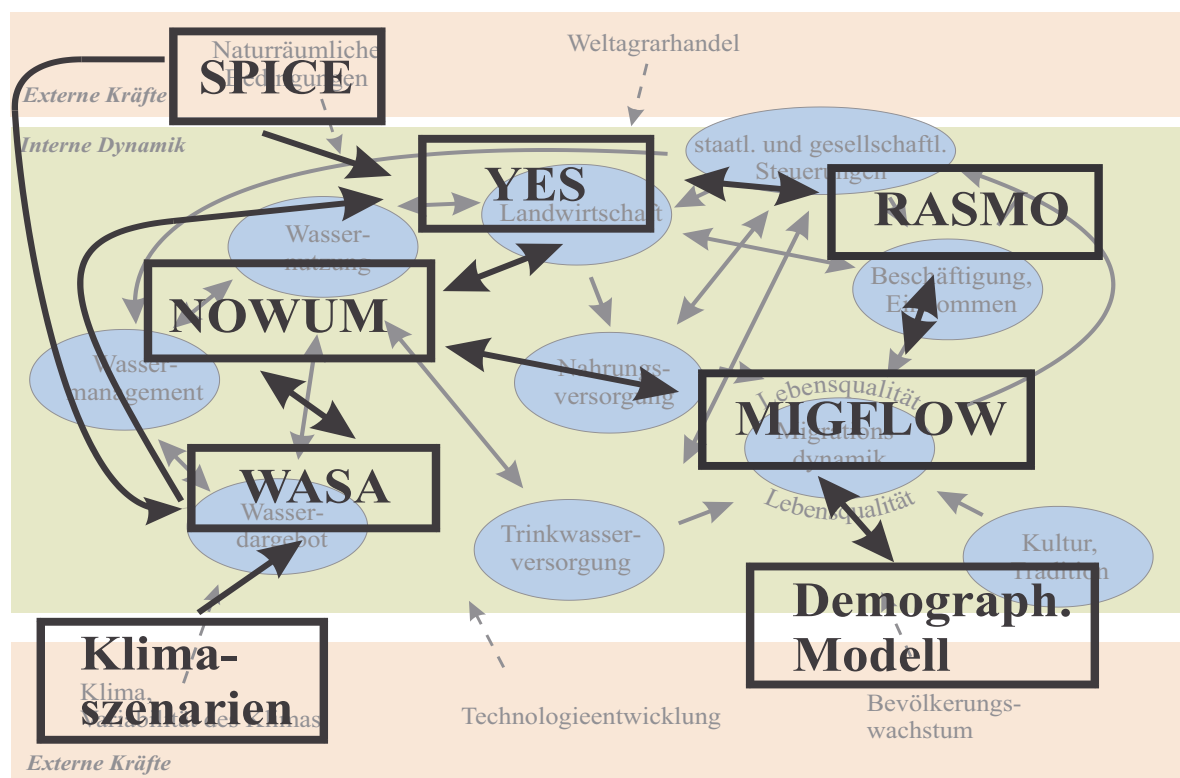


Abb. 4.3 Einordnung der Teilmodelle (Vordergrund) in die zuvor erarbeitete Systemstruktur entsprechend der Abbildung 1 (Hintergrund)

Abbildung 4.3 zeigt die Einordnung der einzelnen Teile in die zuvor erarbeitete Systemstruktur. Viele der Teilmodelle wurden von Arbeitsgruppen innerhalb des WAVES-Projektes erstellt (siehe die Erwähnung in den jeweiligen Teilabschnitten). Nachfolgend werden die einzelnen Teilmodule beschrieben.

Abschließend werden die Teilmodelle Landwirtschaft und die Kopplung von Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung ausführlicher beschrieben, weil sie hauptsächlich im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurden und von besonderer Wichtigkeit für die Erfassung von Rückkopplungseffekten sind.

4.3 Teilmodule

4.3.1 Klimamodul

Eine der wichtigsten treibenden Kräfte der betrachteten Prozesse ist das Klima. Die Variabilität des Niederschlags, die sowohl räumlich als auch zeitlich und sowohl interannuell als auch intraannuell sehr groß ist, stellt eine beträchtliche Einschränkung menschlicher Aktivitäten dar. Die Beschreibung des Klimas in SIM besteht im wesentlichen aus dem Einlesen von Klimadaten und der Berechnung der potentiellen Verdunstung.

Eine Rekonstruktion historischer Klimadaten für die 78-jährige Periode 1921-1998 und Szenarien für die Jahre 2001-2050 wurde von GERSTENGARBE UND WERNER (2003) 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 Munizipebene, d.h. auf Munizipienschwerpunkte interpoliert (vgl. SHEPARD, 1968).

Temperatur und Niederschlag der historischen Rekonstruktion sind das Ergebnis einer Analyse von 89 verfügbaren Stationsdatensätzen für Ceará, Piauí und Umgebung mit langjährigen täglichen Daten für den Zeitraum 1921-1980, sowie 55 Stationen für den Zeitraum 1981-1998.

Daten zur Strahlung und relativen Luftfeuchte wurden durch Regressionen mit den Datensätzen zur Temperatur der wenigen Klimastationen ermittelt, die alle Größen messen. Weitestgehend wurde dabei auf Messungen, die im Rahmen des WAVES-Projektes durchgeführt wurden, zurückgegriffen. Die Winddaten und der Niederschlag im Südosten des Untersuchungsgebietes wurden aus Monatsklimatologien (CRU, NEW ET AL., 1999) übernommen. In den Szenarien werden statistische Charakteristika der historischen Daten mit angenom-

menen großräumigen Klimatrends kombiniert. Diese Trends sind aus transienten Klimaänderungssimulationen von globalen Klimamodellen (ECHAM4, HADCM2) abgeleitet. Zusätzlich wurde ein Szenario ohne Klimaänderungen erstellt (vgl. Kapitel 6.2.6 für eine detailliertere Beschreibung der Herleitung).

Die potentielle Evapotranspiration, d.h. die Menge Wasser, die pro Zeit- und Flächeneinheit bei einer Annahme unbegrenzter Wasserverfügbarkeit verdunsten kann, wird mit Hilfe der Gleichung von Penman-Monteith (PENMAN, 1948, MONTEITH, 1965) berechnet. In diese Berechnungen gehen die Daten zu den Klimagrößen Temperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit ein.

4.3.2 Hydrologisches Modul

Die Wasserverfügbarkeit ist eine maßgebliche Einflussgröße der ökonomischen und gesellschaftlichen Entwicklung im untersuchten Gebiet. Dabei sind sowohl Aspekte der physischen Wasserbilanz als auch die Wassernutzung und das Wassermanagement von großer Bedeutung.

Das Modul HYMO besteht aus den Teilmodellen WASA (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments*), das die natürliche Wasserverfügbarkeit durch Abbildung der Bodenfeuchte, der Evapotranspiration, des Abflusses, der Grundwasserneubildung und der Speicherung von Wasser in Stauseen im großskaligen Maßstab auf der Ebene der beiden Bundesstaaten beschreibt, und NoWUM (*Nordeste Water Use Model*), das die Wassernachfrage für die unterschiedlichen Nutzungssektoren berechnet. Ein Teil, der die beiden Teilmodelle verbindet, komplettiert das Modul.

Die direkte Kopplung von WASA und NoWUM erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Wassernutzungsarten den unterschied-

lichen Wasserspeichern zugeordnet und anschließend die Abhängigkeit der tatsächlich entnommenen Wassermenge vom Wasserdarbot und dem Bedarf beschrieben.

WASA

WASA ist ein Niederschlags-Abflussmodell, das deterministisch und räumlich distribuiert arbeitet. Die zeitliche Auflösung umfasst Tageswerte, die räumliche Auflösung fünf hierarchische Skalen. Alle erfassten hydrologischen Prozesse können somit auf der jeweils typischen Skala abgebildet werden. Dies betrifft das Abflussrouting in Teileinzugsbieten, laterale Fließprozesse auf der Hangskala und vertikale Wasserflüsse auf der punktförmigen Skala der Bodenprofile. Die physische Wasserbilanz beschreibt die Wassermengen im Boden, in kleinen Açudes (Oberflächenwasserspeicher), in größeren Stauseen sowie in Flüssen. Einem Top-Down-Ansatz folgend wird das Untersuchungsgebiet auf den einzelnen Skalenebenen nach topographischen und bodenkundlichen Aspekten immer feiner unterschieden.

Die grundlegende Modelleinheit sind die Munizipien, auf der einzeln die größeren Wasserspeicher ($V > 50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) und die Hauptflüsse berechnet werden. Eine Verbindung der Flüsse zwischen den Munizipien vervollständigt dies. Die Einzugsgebiete werden auf der nächstfolgenden Skala in Hydrotöpfe (Landschaftseinheiten) unterschieden, wobei angenommen wird, dass diese sich hydrologisch gleich verhalten. Hier befinden sich kleinere ($V < 50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) Açudes, eingeteilt in fünf Größenklassen, die lateral miteinander verbunden sind. Auf der Ebene der Landschaftseinheiten wird der Übergang des Abflusses in die Nebenflüsse beschrieben.

Die Landschaftseinheiten werden wiederum in Terrainkomponenten unterteilt, die nicht räumlich explizit dargestellt sind und sich durch ihre Lage in der Toposequenz (Hochlage, Hang- oder Talboden), Gefälle und Bodenge-

sellschaft unterscheiden. Hier erfolgt die Berücksichtigung lateraler Fließprozesse durch die Berechnung von Oberflächen- und bodeninnerem Abfluss sowie Infiltration in tieferen Terrainkomponenten. Eine weitere Konkretisierung erfolgt auf der Ebene der Boden-Vegetationskomponenten. Auf dieser Ebene wird die Bodenfeuchte ermittelt. Auf der kleinsten Skala des Bodenprofils werden für jede Boden-Vegetationskomponente sowohl die Wasserbilanz als auch vertikale und laterale Wasserflüsse berechnet.

Das Modell besteht somit aus einer Kombination von vertikaler Wasserbilanz, lateralen Prozessen des Wasseraustauschs zwischen Terrainkomponenten einer gefälleabhängig aggregierten Landschaftsebene, einem Übergang ins Flussnetz an der Munizipebene sowie einer Beschreibung des großräumigen Flussnetzes für das Gesamtgebiet von Ceará und Piauí. Eine ausführliche Beschreibung des Teilmodells ist in GÜNTNER (2002) zu finden, der dieses Teilmodell entwickelt hat.

NoWUM

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

Bei der Berechnung des Wasserbedarfs für Bewässerungszwecke wird der Ansatz des FAO Modells CROPWAT (FAO, 1992) benutzt. Dabei werden Einflüsse wie Niederschlag, potentielle Verdunstung, aktuelle pflanzenspezifische Verdunstung und bewässerte Fläche berücksichtigt. Entsprechend der Einteilung im Agrarzensus (IBGE 1998A, 1998B)

werden verschiedene Tierarten betrachtet: Kühe, Schweine, Pferde, Esel, Kaninchen, Schafe, Ziegen, Hühner und Maultiere. Der touristische Wasserbedarf errechnet sich in Abhängigkeit von der Zahl der Touristen und der durchschnittlichen Übernachtungsdauer. Bei der Berechnung des Haushaltswasserbedarfs wird die an das Abwassersystem angeschlossene von der nicht angeschlossenen Bevölkerung, bei der nur ein Grundbedarf von 50l/d gedeckt wird (GLEICK, 1996), unterschieden. Der Wasserbedarf der Industrie wird für verschiedene Sektoren berechnet und ist eine Funktion des industriellen BIP.

Eine genaue Beschreibung findet sich in HAUSCHILD UND DÖLL (2000), die dieses Teilmodell entwickelt haben.

Kopplung

Eine Kopplung der Berechnungen des physischen Wasserdargebots und der Wassernachfrage ist aus zwei Gründen 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 über die Stauseeevolumenta auch in der Zukunft berechnet.

Für diese Kopplung ist eine Zuordnung von Wassernutzungssektoren an den unterschiedlichen verfügbaren Wasserspeichern erforderlich. Diese beschreibt, welche Teile des benötigten Wassers aus welchen Speichern (kleine und große Açudes, Flüsse, Grundwasser) entnommen werden.

Ein zweiter Kopplungsgrund ist der Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Nutzung. Wenn die Wasserverfügbarkeit die Nachfrage nicht mehr oder nicht mehr langfristig abdecken kann, wird sich die Intensität der Nutzung und somit das Volumen des genutzten Wassers ändern.

Die entnommene Wassermenge bestimmt sich somit aus dem Bedarf und wird je nach beschriebenem Sektor unterschiedlich stark re-

duziert, 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 festgelegten Richtlinien im brasilianischen Wassergesetz (vgl. Kapitel 3.3.2).

4.3.3 Landwirtschaftliches Modul

Die Landwirtschaft ist das wichtigste Bindeglied zwischen Wasserverfügbarkeit und Lebensqualität. Die Wasserverfügbarkeit stellt einen sehr wichtigen limitierenden Faktor der Landbewirtschaftung dar. Sowohl der Regenfeldaufbau als auch der Bewässerungsanbau sind in großem Maße vom Niederschlag abhängig, entweder direkt oder abgedämpft, wenn das Wasser in den Açudes gespeichert wird.

Neben den Niederschlagsbedingungen haben die Bodeneigenschaften und die Anwendung verschiedener Produktionsmethoden einen großen Einfluss auf die Erträge. Der ökonomische Erfolg der Betriebe ist stark von den Produktionsbedingungen und Produktionsmethoden abhängig. Hiervon wiederum beeinflusst wird das Einkommen der in der Landwirtschaft Erwerbstätigen und die Beschäftigung der Lohnarbeiter, aber auch die Nahrungssicherung der Subsistenzlandwirte.

YES

Im Teilmodell YES (Yield Estimation) werden die jährlichen landwirtschaftlichen Erträge und Produktionen errechnet.

Dabei wird der Einfluss von Wassermangel, Wasserüberschuss, Boden und Anbaumethode berücksichtigt. Der Einfluss von Wassermangel auf die landwirtschaftlichen Erträge wird im integrierten Modell nach einer von der FAO entwickelten Methode (FAO, 1979) berechnet. Es werden für vier phänologische Perioden des Pflanzenwachstums die Einschränkungen

durch die Wasserverfügbarkeit (über die aktuelle Verdunstung) mit der typischen Sensitivität der Pflanze in diesen Perioden kombiniert. Hieraus ergibt sich aufgrund ein relativer Ertragsverlust. Die aktuelle Verdunstung wird aus WASA für Hydrotöpfe mit landwirtschaftlicher Nutzung übernommen. Die im integrierten Modell simulierten Pflanzen sind: Bananen, Kokosnüsse, Tomaten, Kaju, Baumwolle, Mango, Cassava, Gras, Melonen, Bohnen, Zuckerrohr, Mais und Reis.

Der Einfluss der Bodenqualität auf den Ertrag wird durch einen relativen Ertragsverlustfaktor erfasst, der die Eigenschaften der Böden (z.B. Nährstoffgehalt) und deren entsprechenden Einfluss auf den Ertrag der einzelnen Böden quantifiziert. Abgeleitet wurden diese Bodeneigenschaften entsprechend der „*Land Suitability Classification*“-Methode der FAO (FAO 1983, SYS ET AL., 1991). Außerdem werden die physischen Bodeneigenschaften in WASA, also bei der Berechnung der Wasserverfügbarkeit, mit einbezogen. Es werden verschiedene Anbaumethoden berücksichtigt, die sich durch den Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden und unterschiedliche Intensitäten bei der Bewässerung unterscheiden (vgl. Kapitel 4.4.1).

RASMO

Die Agrarökonomie stellt im Modell eine weitere Schaltstelle zwischen den rein naturräumlichen Potentialen und der Nutzung dieser Potentiale als den wichtigsten Indikatoren für die Lebensqualität der ländlichen Bevölkerung dar. Die agrarökonomischen Simulationen werden im Modell RASMO (*Regional Agricultural Sector Model*) in zwei Schritten durchgeführt:

- Zuerst 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 Familienarbeitskräfte, der Kreditverfügbarkeit oder der vorhandenen

Ackerfläche, am besten den Anbau von Feldfrüchten auf ihren Flächen und die Tierproduktion einrichten könnten. Die sich hieraus ergebene Landnutzung fließt in das Modell YES ein.

- Danach wird in einem sogenannten Realisierungsmodus für jedes Jahr simuliert, welchen Einfluss die zufällig auftretenden Wetterbedingungen auf die Höhe der Gesamterträge haben und wie diese wiederum das Betriebsergebnis beeinflussen. Das jeweilige Betriebsergebnis bestimmt dann weitere Auswirkungen, wie etwa auf die Beschäftigungssituation und Nahrungsmittelversorgung.

Optimierungsteil

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 bei der Tierhaltung auch der Futterbedarf berechnet.

Restriktionen ergeben sich durch die verfügbaren Anbauflächen, die verfügbaren Futterprodukte, die verfügbare Mechanisierung, die Selbstversorgung, die stets vorrangig bedient wird und das für die Bewässerung verfügbare gespeicherte Wasser. Das Betriebsergebnis hängt von den Produktverkäufen (d.h. jener Produkte, die nicht als Nahrung oder Futter verwendet wurden) und Produktionskosten, inklusive dem Arbeitseinsatz von Nicht-Familienmitgliedern, ab. Einige der benötigten Parameter werden nicht dynamisch im integrierten Modell beschrieben, sondern gehen als Szenarienannahmen in das Modell ein (z.B. die Ausdehnung der bewässerten Fläche).

Dabei scheint ein Zeitschritt von zehn Jahren für das Auftreten von signifikanten Ände-

rungen bezüglich der Entscheidung angebracht, welche Kulturpflanzen auf welchen Flächen mit welcher Bewirtschaftungsform angebaut werden.

Realisierungsteil

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 muss, ist es noch unklar, wie hoch der Niederschlag sein wird. Die zufällig auftretenden Erträge, die maßgeblich durch die vorgegebenen Klimaverhältnisse beeinflusst sind, werden vom Teilmodell YES errechnet und fließen in die Berechnungen des Betriebsergebnisses ein. Die erzielten Gewinne dieser Erträge werden auf der Grundlage der jeweiligen Preise berechnet, von denen die Kosten abgezogen werden. Eine detailliertere Beschreibung des Modells RASMO findet sich in HOYNK (2003, M.W.N.), die das Modell entwickelt hat.

SPICE

Bodenkundliche und geomorphologische Informationen für die beiden Bundesstaaten sind in einer flächendeckenden Bodendatenbank erfasst, die verschiedenen Anwendungen, z. B. zur Erfassung der standortbedingten Abflussbildung oder der 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. die Landschaft wird nach topographischen und bodenkundlichen Gesichtspunkten hierarchisch strukturiert.

Als Basis dienten verschiedene Karten, die bodenkundliche Profilangaben sowie Informationen über Gefälle, Lage und Flächenanteile von Bodentypen und Bodengesellschaften innerhalb von Toposequenzen in der Landschaft enthalten. Auf der gesamtstaatlichen Skala

werden ca. 350 Landschaftseinheiten mit ca. 620 Geländekomponenten und 1150 Bodenkomponten unterschieden. GAISER ET AL. (2003) haben diese Datenbank entwickelt (vgl. auch <http://www.uni-hohenheim.de/spice>).

4.3.4 Soziologisches Modul

Der sozioökonomische und soziokulturelle Teil des Modells erweitert zunächst den agroökonomischen Blick auf die Gesellschaft zu einer kompletteren Beschreibung der Lebensbedingungen. Dies geschieht größtenteils über in Szenarien spezifizierten 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, die in das demographische Modell eingehen, welches die Bevölkerungsentwicklung eines bestimmten Gebietes beschreibt.

MIGFLOW

Migration wird als eine Funktion des Abwägens verschiedener Adaptationsstrategien des Akteurs zur Verwirklichung von Ansprüchen an Lebensqualität betrachtet. Sie ist der Ausdruck der Erwartung, einen Anspruch an Lebensqualität an einem anderen Ort besser verwirklichen zu können in Verbindung mit der Einschätzung, dass der Wohnort keine Perspektiven für die eigene Lebensplanung bietet.

Das Migrationsmodell MIGFLOW (Migration Flow) errechnet die Anzahl der Emigranten pro Munizip in jährlichen Zeitschritten. Als Kriterium hierfür dienen die Unterschiede in der Lebensqualität zwischen allen Munizipien in Ceará und Piauí sowie einem zusätzlichem Migrationsziel außerhalb der beiden Staaten. Ein weiteres Kriterium ist die Entfernung zwischen den Munizipien und den daraus resultierenden Kosten der Migration. Wenn die Differenz der Lebensqualitäten die Migrationskosten über-

trifft, wird ein linear davon abhängiger Migrationsfluss simuliert. So entsteht Migration zwischen Paaren von Munizipien. Mögliche Nothilfeprogramme, die für Munizipien mit hohen Ertragsverlusten in Jahren mit schlechten Erträgen durchgeführt werden, werden dabei durch eine Erhöhung des landwirtschaftlichen Einkommens berücksichtigt.

Die Lebensqualität wird in Abhängigkeit vom Indikator Pro-Kopf-Einkommen errechnet. Das landwirtschaftliche BIP wird im Teilmodell RASMO im Realisierungsmodus ermittelt, das nicht-landwirtschaftliche BIP wird als Szenarioannahme berücksichtigt. Eine Beschreibung des Teilmodells findet sich in GREBE ET AL. (2000), die das Teilmodell entwickelt haben.

Demographisches Modell

Das demographische Modell beschreibt die Bevölkerungsentwicklung, aufgelöst nach Alter (in Fünf-Jahres-Altersklassen), Geschlecht und Munizip. Dabei werden die unterschiedlichen dynamischen Prozesse (Fertilität, Mortalität,

Migration) explizit abgebildet. Die Fertilitäts- und Mortalitätsraten sind altersabhängig. Trends in den Fertilitäts- und Mortalitätsraten werden szenarioabhängig vorgeschrieben (GREBE ET AL., 2000).

In jedem Jahr werden zuerst die alters- und geschlechtsspezifischen Mortalitätsraten und die altersspezifischen Fertilitätsraten entsprechend den Szenarioannahmen aktualisiert. Durch die Multiplikation der weiblichen Bevölkerungsanteile in den einzelnen Altersklassen mit den Fertilitätsraten wird anschließend zunächst die Geburtenrate kalkuliert. Anschließend werden dann durch die Multiplikation von Alterklassen- und Geschlechtsdaten mit den Mortalitätsdaten die Todesrate und die Alterungsrate der übrigen Gesamtbevölkerung simuliert (20% einer Altersklasse werden in die nächste Altersklasse verschoben), wobei die Anzahl der emigrierten Personen abgezogen wird.

4.4 Detaillierte Beschreibung einzelner Modelle

4.4.1 YES (Yield Estimation)

Die Wahl des Modells erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren. Zunächst wurden bestehende Modelle hinsichtlich ihrer Anforderungen und ihrer Tauglichkeit im Untersuchungszusammenhang geprüft. Komplizierte Modelle wie z.B. das EPIC-Modell (USDA, 1990) oder CERES (JONES ET AL, 1996), die viele Parameter benötigen und mit vielen Variablen arbeiten, erfordern umfangreiche, detaillierte Datensätze. Aufgrund der realen Datenlage im Untersuchungsgebiet schieden solche Modelle aus. Andere Modelle sind in ihrer Ausführlichkeit zudem für andere Skalen entwickelt worden und sind deshalb auf den Untersuchungszusammenhang nicht ohne weiteres übertragbar.

Das Modell musste so konzipiert werden, dass es mit den vorliegenden Daten die zuverlässige Berechnung von möglichen Entwicklungen erlaubt. Zielführender erschienen deshalb einfachere Ansätze, die wenige Parameter benötigen, wo aber der jeweilige Einfluss, selbst wenn nur unzureichende Daten für diese Pflanzen vorhanden sind, gut abschätzbar ist. Aufbauend auf Literaturangaben wurde ein Modell entwickelt, das die für die semi-aride Region entscheidenden Einflüsse berücksichtigt und folgenden Ansprüchen entspricht:

- es bildet die Einflüsse der Klimavariabilität und möglicher Klimaänderungen (insbesondere hinsichtlich des Niederschlags) ab,
- es erlaubt eine dynamische Betrachtungsweise, d.h. ist nicht statisch konzipiert,

- die Skala ist so gewählt, dass Berechnungen von Erträgen und möglichen Entwicklungen vorgenommen werden können,
- es benötigt wenige Parameter und
- es bildet den Einfluss der Bewässerung ab.

Abbildung 4.4 gibt einen Überblick über die Struktur des Modells YES.

Im Modell werden die Erträge und die Produktion der Kulturpflanzen, die den größten Teil der Anbaufläche bzw. der Wertschöpfung ausmachen, unter Berücksichtigung verschie-

dener Einflussfaktoren und unter Kopplung mit anderen Teilmodellen berechnet. Außerdem müssen diese Größen von den anderen Teilmodellen, die direkt an YES gekoppelt sind (RASMO, NoWUM), dargestellt werden können. Zusammen ergibt dies 14 verschiedene Kulturpflanzen: Bananen, Kokosnüsse, Tomaten, Cashew, Capim, Baumwolle, Mango, Cassava, Gras, Melonen, Bohnen, Zuckerrohr, Mais und Reis (Kapitel 3.6, Abb. 3.9 und Abb. 3.10). Nachfolgend werden die Einzelteile des YES-Modells in einer themenbezogenen Form detailliert erläutert.

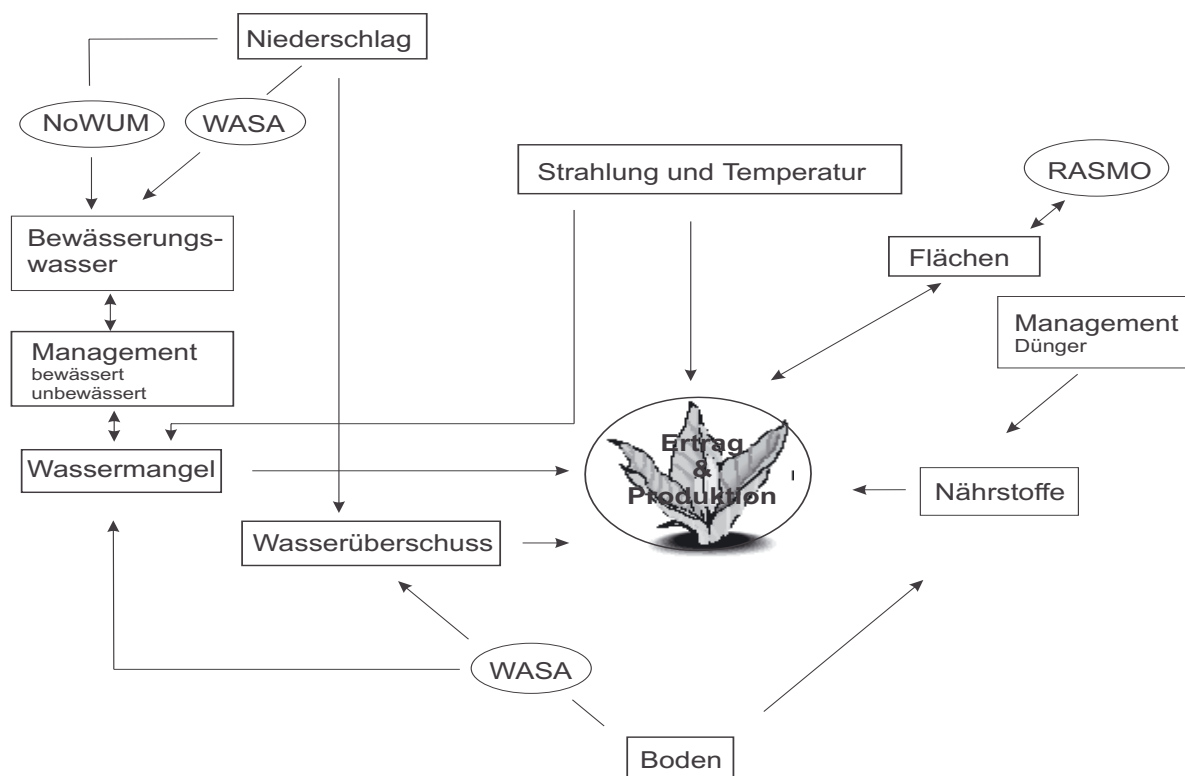


Abb. 4.4 Struktur des Ertragsmodells YES. Einflüsse auf die modellierten Erträge und Produktionen sowie Kopplung zu anderen Teilmodellen

Landwirtschaftliche Fläche

Die gesamte landwirtschaftliche Fläche geht als Szenarioannahme in das Modell ein. Ausgangspunkt ist jeweils die im Agrarzensus 1996 ausgewiesene Fläche pro Pflanze, Muni- zip und Betriebsgrößenklasse. Die Verteilung der Flächen auf die einzelnen Böden des Mu- nizips und die dabei verwendeten Produktions- verfahren werden im agrarökonomischen Teil-

modell RASMO errechnet. Dabei wird bei den mit Bewässerung angebauten Flächen die aus- reichende Wasserverfügbarkeit berücksichtigt.

Für Simulationen der historischen Periode wird entsprechend der Datenanalyse (SEPA 1947-1995) ein jährlicher Anstieg von 3% für die gesamte Agrarfläche angenommen (Abb. 4.5). Die gesamte potentielle Bewäse- rungsfläche erhöht sich stärker als die Flächen

im Regenfeldbau. Ein Anstieg zwischen 3 bis 6% pro Jahr scheint plausibel, abhängig von den einzelnen Pflanzen.

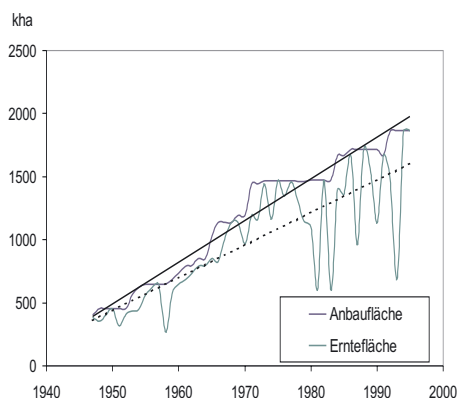


Abb. 4.5 Gesamte Erntefläche von 11 der im Modell betrachteten Pflanzen in Ceará (Quelle: IPLANCE, 1996) und geschätzte Anbaufläche

Jedes Jahr wird die aktuell tatsächlich genutzte Bewässerungsfläche berechnet, die von der Menge des zu Beginn des Jahres gespeicherten Wassers abhängig ist. Allerdings ist dabei nicht bekannt, wieviel Wasser genau zur Verfügung stehen wird, da keine genauen Vorhersagen hinsichtlich der Menge des Niederschlags und der Verdunstung möglich sind. Insgesamt wird die Bewässerungsfläche so berechnet, dass eine 90prozentige Wahrscheinlichkeit besteht, dass das benötigte Wasser tatsächlich auch verfügbar sein wird. Zur Bewässerung steht dabei vorrangig das in den großen Stauseen gespeicherte Wasser, sofern ein Munizip in der direkten Umgebung liegt, und je nach Region ein bestimmter Anteil an Grundwasser zur Verfügung.

Bestimmung des Aussaattermins

Der Tag, an dem die Pflanzungen vorgenommen werden, muss jedes Jahr abhängig von der aktuellen Niederschlagsituation bestimmt werden. WADE (1991) unterscheidet hinsichtlich der Problematik der Klimarisiken und landwirtschaftlicher Produktion drei Gruppen von Farmern:

- Landwirte, die Risiken eingehen: Sie streben eine hohe Produktivität in einem guten Jahr an und nehmen Ernteverluste in schlechten Jahren in Kauf.
 - Landwirte, die Risiken vermeiden: Sie verzichten in guten Jahren auf einen Teil der potentiellen Ernte, wenn sich dadurch das Risiko von Ernteaussfällen in schlechten Jahren vermindert.
 - Landwirte, die einen Mittelweg zwischen vollem Risiko und Risikovermeidung gehen.
- Angelehnt an diese Klassifizierung werden im Modell drei verschiedene Gruppen von Landwirten unterschieden.

- Die erste Gruppe beginnt mit den Pflanzungen, wenn mindestens zwei Regenwochen in einem spezifischen Monat waren.
- Die zweite Gruppe wartet dagegen mit den Pflanzungen. Sie beginnt erst an dem Tag, wenn mindestens eine Regenwoche im darauffolgenden Monat eingetreten ist.
- Die dritte Gruppe wartet noch länger. Sie startet die Pflanzungen erst nach zwei Regenwochen im darauffolgenden Monat.

Eine Regenwoche ist dadurch definiert, dass innerhalb von sieben Tagen an mindestens drei Tagen Niederschlag von 90mm gefallen ist. Bewässerte Flächen werden unabhängig von der aktuellen Wettersituation und somit zu zwei festen Terminen bepflanzt.

Ertragsreduktion durch Wasserstress-Kopplung WASA-YES

Knappheiten des verfügbaren Wassers sind die wichtigste Einflussgröße für die Ertragsmodellierung. Aufgrund der Variabilität der Niederschlagsmengen muss diese Einflussgröße dynamisch betrachtet werden. Dieses Teilmodul stellt die Kopplung von YES an WASA dar.

Zur Quantifizierung des Einflusses, der durch Wassermangel verursacht wird, wird ein Ansatz der FAO benutzt (FAO, 1979). Dabei wird der Ertragsverlust durch das Verhältnis der aktuellen Evapotranspiration in Relation zur maximalen Evapotranspiration bestimmt.

Gleichung 4.1 beschreibt das Verhältnis zwischen relativem Ertragsanstieg und relativem Evapotranspirationsdefizit. Der empirisch abgeleitete 'yield response factor' k_y (FAO, 1979) wird für vier verschiedene phänologische Perioden unterschieden.

$$1 - \frac{Y_{act_{icr}}}{Y_{pot_{icr}}} = \prod_{per=1}^4 k_{y_{icr,per}} \left(1 - \frac{ET_{act_{icr,soil,per}}}{ET_{max_{icr}}} \right)$$

4.1

$Y_{act_{icr}}$	jährlicher Ertrag der Pflanze <i>icr</i> [Fr/ha] bzw. [kg/ha]
$Y_{pot_{icr}}$	maximaler Ertrag der Pflanze <i>icr</i> [Fr/ha] bzw. [kg/ha]
$k_{y_{icr,per}}$	yield response factor
$ET_{act_{icr,soil,per}}$	aktuelle Evapotranspiration der Pflanze <i>icr</i> , des Bodentyps <i>soil</i> , der Wachstumsperiode <i>per</i> [mm/d]
$ET_{max_{icr}}$	maximale Evapotranspiration [mm/d]

Die täglichen Werte der aktuellen Evapotranspiration werden im hydrologischen Teilmodell WASA errechnet. Die von PENMAN MONTEITH (1965) abgeleitete Gleichung 4.2 dient als Basis zur Berechnung der potentiellen Referenzevapotranspiration (ET_{pot}). Dabei werden die Parameter für Gras zu Grunde gelegt. Ein empirisch abgeleiteter Koeffizient k_c (FAO, 1979) dient zur Umrechnung in die pflanzen-spezifische Evapotranspiration $ET_{max_{icr}}$. (Gleichung 4.2). Dieser ist von der aktuellen Wachstumsphase abhängig.

$$ET_{max_{icr}} = k_{c_{icr,per}} ET_{pot}$$

4.2

$k_{c_{icr,per}}$	Pflanzen-evapo- transpirationskoeffizient
ET_{pot}	potentielle Grasreferenz- evapotranspiration [mm/d]

Einfluss des Bodens

Der Einfluss der Bodenqualität auf den Ertrag wird durch einen relativen Ertragsverlustfaktor einbezogen, der die Eigenschaften der Böden (z.B. Nährstoffgehalt) und deren entsprechenden Einfluss auf den Ertrag der einzelnen Böden quantifiziert (GAISER ET AL., 2003B). Der Einfluss der Bodeneigenschaften variiert je nach den Ansprüchen der Pflanzen (z.B. Nährstoffe) und ihrer Angepasstheit (z.B. Wurzeltiefe) sowie der Form der Landbewirtschaftung (z.B. Düngung).

Darum werden Faktoren für die einzelnen Pflanzen 62 Bodentypen und fünf Anbaumethoden unterschieden. Abgeleitet wurden diese entsprechend der "Land Suitability Classification" Methode (FAO 1976, FAO, 1983, SYS ET AL., 1993). Die Bodenparameter werden nach den physischen Eigenschaften, der chemischen Zusammensetzung und den Säure/Base-Eigenschaften in drei Gruppen unterteilt. Den Bodeneigenschaften, wie z.B. Karbonatgehalt, eines Bodentyps wird in Abhängigkeit von der Pflanze jeweils eine Bewertungszahl zugeordnet. Aus den Bewertungszahlen einer Gruppe wird die kleinste gewählt (Gleichung 4.3). Durch anschließende Multiplikation dieser Zahlen ergibt sich für jede Pflanze ein Reduktionsfaktor.

$$sred_{icr,soil} = \prod_{g=1}^3 \text{Min}(bz_{icr,soil,g})$$

4.3

$bz_{icr,soil,g}$	Bewertungszahl der Pflanze <i>icr</i> , des Bodentyps <i>soil</i> der Gruppe <i>g</i>
$sred_{icr,soil}$	Bodenreduktionsfaktor

Dieser Faktor ist nicht dynamisch. Eine mögliche Änderung der Bodenqualität kann aber über Szenarienannahmen einbezogen werden. Der Einfluss des Bodens wird auch über die Berechnung der aktuellen Verdunstung im Modellteil WASA berücksichtigt.

Einfluss anderer klimatischer Parameter: Strahlung und Temperatur

Der direkte Einfluss der anderen klimatischen Parameter Temperatur und Strahlung über den der Wasserbilanz hinaus wird ebenfalls durch einen Reduktionsfaktor in Anlehnung an SYS ET AL. (1991) berücksichtigt. Dieser Faktor fasst verschiedene Merkmale der Temperatur (wie z.B. Minimum, Maximum, Durchschnitt) und der Strahlung zusammen und gewichtet diese mit pflanzenspezifischen Bewertungszahlen. Dabei wird ähnlich wie bei den Bodenreduktionsfaktoren vorgegangen.

$$kred_{reg, icr} = \prod_{g=1}^2 \text{Min}(bz_{icr, k, reg}) \quad 4.4$$

$bz_{icr, k, reg, g}$	Bewertungszahl der Pflanze icr , der Klimagröße k und der Region r
$kred_{reg, icr}$	Klimareduktionsfaktor

Da die räumlichen Unterschiede innerhalb des Untersuchungsgebietes bezüglich der Betrachtungsgrößen gering sind (vgl. Kapitel 3.2), ist eine Auflösung auf der Ebene der vier Agrarregionen ausreichend. Auch zeitlich (sowohl im Tages- als auch Jahresverlauf) sind die Unterschiede verglichen mit anderen Faktoren klein, sodass eine Dynamisierung nicht erforderlich ist (vgl. Kapitel 3.2).

Ertragsreduktion durch zuviel Wasser

Werden die Pflanzen zuviel gewässert, ersticken ihre Wurzeln im Wasser und die Pflanzen beginnen zu faulen (Aeropuration). Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wird ein Faktor (as) berechnet, der vom Wassergehalt in 1m Bodentiefe abhängig ist und durch das Verhältnis zwischen der Porengröße des Bodens und dem Wasservolumen bestimmt wird. Er wird täglich berechnet und als Durchschnittswert über die gesamte Wachstumsperiode gebildet. Einen negativen Einfluss auf den Ertrag

übt dieser Faktor erst bei sehr hohen Werten aus, entsprechend der exponentiellen Beschreibung. Die Gleichungen 4.5 und 4.6, die diesen Vorgang beschreiben, entsprechen der Darstellung im EPIC-Modell (USDA, 1990). Dabei bezeichnet caf den „critical aeration factor“, der für die meisten Pflanzen 0.85 beträgt.

$$as = 1 - \frac{sat}{sat + \exp(5 - 0.082 \cdot sat)} \quad 4.5$$

$$sat = 100 \left(\frac{\frac{sw}{po} - caf}{1 - caf} \right) \quad 4.6$$

as	aeration stress factor
sat	Sättigungsfaktor
sw	Bodenwassergehalt in 1 Meter [mm]
po	Porengröße in 1 Meter [mm]
caf	critical aeration factor

4.4.2 Kopplung: Wassernutzung und Wasserverfügbarkeit

Das Teilmodell WASA berechnet das zur Verfügung stehende Wasser. Der Bedarf wird im Teilmodell NoWUM errechnet. Um das tatsächlich entnommene Wasser zu bestimmen, müssen beide Teile verbunden werden. Die Berechnung erfolgt dabei täglich und auf der Ebene der Munizipien.

Der Bedarf wird für folgende Sektoren unterschieden: Bewässerungslandwirtschaft, Tierzucht, Industrie, Tourismus und private Haushalte. Dies korrespondiert zu der in NoWUM verwendeten Einteilung. Eine Wasserentnahme ist aus mehreren Quellen möglich: kleinen Açudes, großen Açudes (in den Munizipien, in denen sie vorhanden sind, und in direkt angrenzenden), Grundwasser und Flüssen. Das Wasser wird zu festen prozentualen Anteilen der jeweiligen Quelle (y) entnommen. Somit wird angenommen, dass sich die relative Entfernung zu den verschiedenen Orten der Entnahme, gemittelt über ein gesamtes Munizip,

nicht ändert. Ansonsten würde z.B. im Fall des Versiegens einer nahe gelegenen Quelle eine entferntere Quelle zum Einsatz kommen, sodass sich die Anteile verschieben würden.

Das Grundwasser wird im hydrologischem Modell als unbegrenzt verfügbar angesehen. Eine Beschränkung der Nutzbarkeit erfolgt aber durch die Anzahl der Brunnen sowie die jeweiligen Zugangsmöglichkeiten zu diesen. Diese Größen werden konstant gehalten, weswegen auch der Anteil des entnommenen Wassers vom Wasserbedarf konstant ist.

Die entnommene Menge Wasser aus allen Quellen außer Grundwasservorkommen ($extr_x$) ist eine Funktion der vorhandenen Menge ($avail_y$) und des Bedarfs. Die Entnahme aus anderen Quellen ist bei geringer Verfügbarkeit nicht mehr maximal. Das Verhältnis von entnommenem zu benötigtem Wasser wird als Exponentialfunktion in Gleichung 4.7 wie folgt beschrieben:

$$\frac{extr_{xy}}{maxextr_x} = 1 - e^{-b_x \cdot avail_y} \quad 4.7$$

$extr_{xy}$	entnommenes Wasser des Sektors x aus der Quelle y [m^3/d]
$maxextr_x$	maximal entnommenes Wasser (Wasserbedarf) [m^3/d]
b_x	Wasserkoeffizient [$1/m^3$]
$avail_y$	verfügbares Wasser in Quelle y [m^3]

Für die Quantifizierung des Wasserkoeffizienten b_x wird angenommen, dass die Entnahme von weniger Wasser aus den anderen Quellen beginnt, wenn nur noch a_x Tage lang der tägliche Bedarf gedeckt wäre. Die Anzahl der Tage ist je nach Sektor unterschiedlich. Bei Haushaltswasser wird am wenigsten gespart, weshalb a_x hier am kleinsten ist (Tabelle 4.1). Dieses entspricht sowohl den Erfahrungen im Feld als auch festgelegten Richtlinien im brasilianischen Wassergesetz (vgl Kapitel 3.3.2).

Vieh-zucht	Bewäs-serung	Indu-strie	Haus-halte	Touris-mus
20	30	30	10	15

Tabelle 4.1: Parameter a_x . Entnahme von weniger Wasser wenn für eine Anzahl a_x von Tagen der tägliche Wasserbedarf nicht mehr gedeckt ist

Dies berücksichtigend ergibt sich für b_x :

$$b_x = \frac{6,9}{a_x \cdot maxextr_x} \quad 4.8$$

a_x	Anzahl der Tage [d]
$maxextr_x$	maximal entnommenes Wasser (Wasserbedarf) [m^3/d]

Die berechnete Wasserentnahme wird anschließend, entsprechend den oben angegebenen prozentualen Mengen, von dem in den verschiedenen Quellen jeweils verfügbaren Wasservolumen abgezogen.

Teilweise wird das Wasser den Flüssen und Açudes wieder zugeführt (ret_x). Das zurückgeführte Wasser umfasst zum einen das Haushaltswasser der an das Abwassersystem angeschlossenen Bevölkerung, zum andern den Abfluss bei einigen Bewässerungsmethoden in der Landwirtschaft. Das Wasser fließt zu 1/3 in die Flüsse und zu 2/3 in die Açudes.

Auf die verschiedenen Arten von Açudes wird dieser Anteil entsprechend der entnommenen Menge prozentual aufgeteilt. Für das am Ende des Zeitschritts, also des Tages, vorhandene Volumen ergibt sich somit:

$$Vol_{ac_i} = avail_{ac_i} \left(1 + \frac{2/3 ret_{all} - extr_{ac}}{avail_{ac}} \right) \quad 4.9$$

Vol_{ac_i}	gespeichertes Volumen in den Açudes der Grössenklasse i am Ende des Zeitschritts [m^3]
$avail_{ac_i}$	verfügbares Wasser [m^3]
ret_{all}	gesamtes zurückfließendes Wasser [m^3/d]
$extr_{ac}$	entnommenes Wasser [m^3/d]

Validierung

Kapitel

5

5.1 Validierungskonzept

Eine Voraussetzung für die praktische Anwendung von Modellen ist die Beurteilung ihrer Aussagekraft und Gültigkeit. Eine formelle Bestätigung eines mathematischen Modells natürlicher Systeme als richtig ist zwar nicht möglich. Das Vertrauen in die Gültigkeit des Modells im Kontext bestimmter Problemstellungen lässt sich aber durch eine Reihe von Prüfungen erhöhen.

Der Begriff Validierung ist in der relevanten Literatur weder einheitlich definiert noch von anderen Begriffen wie etwa dem der Verifizierung klar abgegrenzt. Vielmehr herrscht hier ein Nebeneinander verschiedener Definitionen. Begriffe wie Validierung, Verifizierung oder Bewertung werden unterschiedlich verwendet (ORESQUES ET AL., 1994, SARGENT, 1999, RYKIEL 1996).

Uneinigkeit besteht vor allem dahingehend, ob, und wenn ja, bis zu welchem Maße, Modelle bzw. wissenschaftliche Theorien überhaupt auf ihre Validität geprüft werden können. Viele Autoren halten eine Validierung bzw. Verifizierung von Modellen im Sinne einer Wahrheitsbestätigung für prinzipiell möglich (LAW UND KELTON, 1991 m.w.N.). Andere Autoren widersprechen dieser Annahme. So kommen ORESQUES ET AL. (1994) zu dem Schluss, dass die Verifizierung und Validierung im Sinne einer Bestätigung der Wahrheit

von numerischen Modellen natürlicher Systeme nicht möglich sein kann, da natürliche Systeme zum einen nicht abgeschlossen sind und zum anderen unterschiedliche numerische Modelle dasselbe Ergebnis erbringen können. Somit ist lediglich eine Bestätigung (*confirmation*) der Übereinstimmung von Vorhersagen und Beobachtungen möglich (ORESQUES ET AL. 1994). Andere Autoren vertreten die Position, dass Modelle nur als invalide bestätigt werden können (HARRISON, 1990).

In einem engeren technischen Verständnis wird die Validierung oft als Abgleich der Modellergebnisse mit unabhängigen Beobachtungswerten und Daten definiert, mit dem Ziel, die Akkuratheit der Modellprognosen zu überprüfen (BRAGA 1997, DENT UND BLACKIE 1979). Ein solcher Vergleich ist zwar praktisch selten vollständig durchführbar, da insbesondere bei komplexeren Simulationsmodellen oftmals keine vollständigen Datensätze vorhanden sind und viele Modelle zudem einen so hohen Komplexitätsgrad aufweisen, dass eine vollständige Überprüfung zu kostspielig und zeitaufwendig wäre.

Vergleichende Tests können aber so lange durchgeführt werden, bis eine ausreichende Sicherheit dahingehend erreicht ist, dass der Modelloutput dem beabsichtigten Modellzweck ent-

spricht und dass das Modell dem Anwender in diesem Sinne valide Ergebnisse liefert, deren Unsicherheitsfaktor für ihn tolerabel ist.

Es besteht eine größere Zahl von Ansätzen und Methoden für die Durchführung einer Validierung. Dem Schema von SARGENT (vgl. Abb. 5.1) folgend können drei Hauptgebiete der Validierung unterschieden werden: die konzeptuelle Validierung (1), die operationelle Validierung (2) und die Modellverifizierung (3) (SARGENT, 1984).

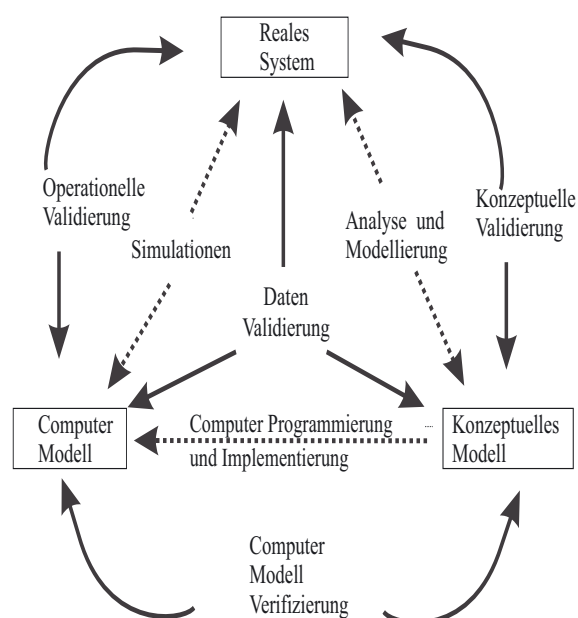


Abb. 5.1 Schema der Modellentwicklung mit Positionierung der operationellen, konzeptuellen und Datenvalidierung, modifiziert nach SARGENT, 1984.

(1) Die konzeptuelle Validierung betrifft die Untersuchung, ob die dem konzeptionellen Modell zugrunde liegenden Hypothesen korrekt, d.h. widerspruchsfrei und plausibel, und mit den bekannten Theorien des Anwendungsgebiets vereinbar sind. Zudem beinhaltet dies die Prüfung, ob die Darstellung der Problematik im Modell genauso wie der logische Strukturaufbau des Modells und die mathematischen und kausalen Zusammenhänge zweckangemessen angesichts der Modellabsichten sind. Gängige Techniken beinhalten Expertenbefragun-

gen, insbesondere hinsichtlich der Struktur- und Ablaufdiagramme, und statistische Anpassungstests.

(2) Die operationelle Validierung zielt auf die Überprüfung der aufgabenspezifischen Eigenschaften des Computermodells ab und analysiert z.B. das dynamische Modellverhalten und die Übereinstimmung von Modellergebnissen mit den empirischen Daten. Hierbei nimmt ein Vergleich von Simulationen mit erhobenen Daten eine zentrale Stellung ein. Es können verschiedene quantitative und qualitative Techniken angewendet werden (vgl. BRAGA, 1997). Eine Möglichkeit der quantitativen Validierung ist, einen oder mehrere statistische Kennwerte, wie z.B. den Mittelwert, die Varianz, den Median, das Minimum oder das Maximum der beobachteten Daten des realen Systems zu berechnen und diese mit den entsprechenden Größen des Modells zu vergleichen. Ebenso können Konfidenzintervalle für die Ergebnisdifferenz zwischen Simulationsdaten und empirischen Daten berechnet werden oder statistische Testverfahren, wie etwa Regressionsanalysen, zum Vergleich der Verteilung von Realsystem und Modell durchgeführt werden (PAGE, 1991, LAW UND KELTON, 1991).

Eine weit verbreitete qualitative Technik sind Turing-Tests oder graphische Methoden (BRAGA 1997, SWARTZMAN UND KALUZYNY, 1987), wie z.B. die Darstellung des Verlaufs von beobachteten und simulierten Ergebnissen gegenüber einer unabhängigen Variablen (zumeist der Variable Zeit) oder das gegenseitige Plotten beobachteter und simulierter Daten. Statistische Methoden scheinen zunächst objektiver zu sein als graphische Methoden, aber Einschränkungen wie die Qualität der Daten und die Auswahl der statistischen Maße lassen auch sie zu einer durch Subjektivität beeinflussten Methode werden. Da statistische Verfahren bei einer schlechten Datenlage an ihre Grenzen stoßen, ist ein ergänzender Rückgriff auf graphische Methoden oft notwendig.

Wenn ein Vergleich nur mit Teildatensätzen möglich ist, wie es vor allem in komplexeren Modellen der Fall ist, gewinnt eine Beurteilung des Verhaltens der Modellvariablen und Parameter an Bedeutung für die operationelle Validierung. Dabei angewandte Methoden umfassen zum einen Sensitivitätsanalysen und zum anderen Unsicherheitsanalysen.

Bei Sensitivitätsanalysen werden Änderungen einzelner Parameter der Modelleingabe oder der Modellstruktur durchgeführt und die Auswirkungen auf die Ausgabevariablen betrachtet. Dabei können einzelne oder gleichzeitig mehrere Parameter variiert werden. Untersucht wird, von welchen exogenen Variablen, Relationen oder Parametern die Modellergebnisse am stärksten abhängen (vgl. Kapitel 5.2). So können u.a. auch Strukturfehler aufgedeckt werden.

Mit Unsicherheitsanalysen werden bekannte Unsicherheiten untersucht sowie unbekannte Unsicherheiten identifiziert und deren Einfluss auf die Modellergebnisse analysiert. Ebenso werden Strategien zur Kontrolle bzw. Reduzierung dieser Unsicherheiten bei der Modellanwendung getestet. Unsicherheitsanalysen stellen einen wesentlichen Teil der Modellbewertung dar. Dabei werden Unsicherheiten in den Daten (z.B. Ungenauigkeit in der Erhebung oder natürliche Variabilität der Daten) von anderen Unsicherheiten im Modell (verursacht etwa durch Unsicherheit im Wissen, hohe Abstraktionsebene oder fehlerhafte Modellstruktur) unterschieden (WALLSTEN UND WHITFIELD, 1990, vgl. Kap. 5.2).

(3) Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Validierung ist die Überprüfung der Abbildung des konzeptuellen Modells auf das Computer-Modell, oft als Verifizierung oder Computermodellverifizierung bezeichnet. Dieser Vorgang findet in der Regel während des gesamten Modellbildungsprozesses statt. Für umfangreiche Modelle ist es allerdings sehr schwierig, eine vollständig korrekte und fehlerfreie Abbildung

des Modells als Modellcode vorzunehmen (RYKIEL, 1996). Deshalb muss während der Umsetzung auf eine einwandfreie Definition der Schnittstellen geachtet werden.

Für eine umfassende und aussagekräftige Validierung eines Modells sollten alle drei genannten Hauptgebiete zumindest teilweise erfüllt werden (SARGENT, 1999, PAGE 1991, M.W.N.).

Zusätzlich ist die Datenvalidierung, also die Überprüfung der Datenqualität, ein zentraler Punkt (vgl. Abb. 5.1), da unzureichende oder falsche Daten eine bedeutende Fehlerquelle darstellen können (RYKIEL 1996, ROBINSON, 1999). Hier kommen neben Expertenbefragungen auch Datenanalysemethoden und Glättungsmethoden zum Einsatz. Weiterhin können aus der Literatur folgende zusätzliche Hinweise zur Validierung abgeleitet werden:

- Teilweise wird die Kalibrierung, also die Eichung des Modells, als ein weiterer Bestandteil der Validierung genannt (RYKIEL, 1996).
- Alle kritischen Parameter, die das Modellverhalten beeinflussen, sollten erfasst werden. BECK UND CHEN (2000) definieren wichtige und unwichtige Parameter bezüglich einer Aufgabe, u.a. durch einen Vergleich der Sensitivitätskoeffizienten, und schlussfolgern, dass bei validen Modellen der Quotient von wichtigen zu unwichtigen Parametern maximal sein soll, da ansonsten das Modell durch Randbedingungen definiert ist.
- Zu berücksichtigen ist auch, dass Aussagen über die Modellqualität nur im Zusammenhang mit einem definierten Modellzweck sinnvoll getroffen werden können (ROBINSON, 1999). Wird der Modellzweck geändert, muss auch die Validierung erneut durchgeführt werden.

In diesem Kapitel wird zunächst eine Datenvalidierung durchgeführt. Anschließend wird mit dem Vergleich der simulierten Daten mit er-

hobenen Daten ein Teil der operationellen Validierung durchgeführt. In Kapitel 6.2 werden eine Sensitivitätsanalyse und eine Unsicherheitsanalyse beschrieben, die teilweise auch Bestandteil der operationellen Validierung sind.

Während des Modellbildungsprozesses wurde eine kontinuierliche konzeptuelle Validierung des Modells u.a. durch die enge Zusam-

menarbeit mit den jeweiligen disziplinären Arbeitsgruppen sichergestellt. Zusätzlich fand eine Validierung von konzeptionellen Teilaspekten mit Hilfe von Szenarioanalysen statt, indem einige der in den Szenarien definierten Variablen auch im Modell errechnet und miteinander verglichen wurden.

5.2 Analyse der Daten zur Validierung

Wie im Abschnitt 5.1 erläutert ist die Beschreibung der Ungenauigkeit in den Daten ein notwendiger Bestandteil der Validierung (ROBINSON, 1999). Sowohl für die Modellentwicklung als auch für die Modellvalidierung sind empirische Daten erforderlich. Daher müssen aus dem verfügbaren Datenbestand zwei Mengen unterschieden und analysiert werden, die jeweils unabhängig voneinander für die Modellkalibrierung und Modellvalidierung eingesetzt werden.

Außerdem werden die Inputdaten untersucht, die zur Erklärung der Validierungsergebnisse wichtig sind, da sie Ungenauigkeiten in den Ergebnissen verursachen können. Dabei werden einige Inputdaten, die an anderer Stelle behandelt werden, nicht explizit berücksichtigt. Dies betrifft z.B. die Klimadaten (siehe hierzu GERSTENGARBE UND WERNER, 2003, 1997).

5.2.1 Landwirtschaft

Für das Untersuchungsgebiet liegen folgende historische Daten für die Landwirtschaft vor, die für die Validierung genutzt werden können:

- Von der SEPA (IPLANCE, 1998) sind Datenreihen für die jährliche Produktion und die Ernteflächen von zwölf der im Modell berücksichtigten Pflanzen (Baumwolle, Reis, Bananen, Cashew, Zuckerrohr, Kokosnuss, Bohnen, Maniok, Mango, Melone,

Mais und Tomaten) für den Zeitraum 1947-1995 für ganz Ceará verfügbar. Diese werden im folgenden als SEPA-Daten bezeichnet.

- Räumlich höher aufgelöste Datenreihen, d.h. auf kommunaler Ebene, liegen für Ceará und für Piauí für den Zeitraum 1975-1999 mit den PAM-Daten vor (*Produção Agrícola Municipal*, IBGE, 1996B), die ebenfalls die Produktion und Ernteflächen und ab 1990 auch die Anbauflächen fast aller der im Modell berechneten Pflanzen beinhalten.
- Zudem wurden in den Jahren 1985 und 1996 detaillierte Befragungen aller landwirtschaftlichen Betriebe durchgeführt, die im Censo Agropecuario zusammengefasst sind, sodass für diesen Zeitraum ausführlichere Daten zur Verfügung stehen (IBGE, 1998A, 1998B).

Die für die Validierung verfügbaren Daten sind mit entsprechenden Quellenangaben im Anhang der Arbeit in Tabelle A2.1 zusammengefasst.

Die Datenlage erlaubt keine umfassende Validierung des landwirtschaftlichen Modells. So gibt es zwar Daten u.a. für Ernteflächen, Bewässerungsflächen und Produktion pro Monat sowohl auf kommunaler als auch auf Betriebsklassenebene. Diese sind aber nicht miteinander verknüpft. Für eine umfassende Vali-

dierung fehlen vor allem Daten für die Anbauflächen, für monatlich aufgelöste Produktionszahlen (außer für 1985) und Daten zu den Bewässerungsflächen und unterschiedlichen Anbaumethoden. Ferner fehlen auch Daten für den Zeitraum vor 1975 für Piauí und räumlich aufgelöste Daten für Ceará. Trotzdem können mit den vorhandenen Datensätzen wesentliche Modellergebnisse gut bewertet werden.

Außer den für die Validierung notwendigen Daten fehlen einige für das Modell benötigte Eingangsdaten, vor allem Angaben über die Bodenverhältnisse pro Anbauflächen oder das Management, genauere Angaben zu Klimadaten für Süd-Piauí, zu Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte sowie Boden und Strahlungsdaten.

Anzahl und der **Zuschnitt der Municipien** haben sich aufgrund zahlreicher Reformen häufig geändert. Entsprechende Angaben müssen somit auf die im Modell verwendete räumliche Ebene der Municipiengrenzen von 1996 umgerechnet werden, ohne das geographische Angaben unterhalb der Ebene der Municipien vorliegen. Die Annahme einer Homogenität beim Verschneiden ergibt eine Verschlechterung der Datenqualität. Dennoch kann auf kommunizipaler Ebene ein Vergleich auf der Grundlage von über Jahre gemittelten Werten vorgenommen werden.

Die verfügbaren Datenreihen sind nicht immer konsistent. Bei Daten aus verschiedenen Quellen sind teilweise merkliche Abweichungen festzustellen. Die Gesamtgröße der **Bewässerungsflächen**, die von COGERH (1998) erhoben wurden, ist mit $43 \cdot 10^3$ ha wesentlich geringer als die von SEAGRI (2000) erhobenen Größen von $55.9 \cdot 10^3$ ha. Noch größere Unterschiede finden sich beim Vergleich mit den vom IBGE im Agrarzensus 1996 ermittelten Daten. Diese geben eine mehr als doppelt so große Fläche ($136.7 \cdot 10^3$ ha) an, wobei hierbei erwiesenermaßen auch teilweise Flächen von geplanten, aber noch gar nicht exi-

stierenden Bewässerungsprojekten mitgezählt wurden (IBGE, 1998A, 1998B).

Eine mögliche Ursache für diese Diskrepanz der Daten ist außerdem, dass Flächen, auf denen mehrmals pro Jahr geerntet wird, teilweise doppelt gezählt werden. Hierzu liegen aber keine gesicherten Erkenntnisse vor. Zur Größenbestimmung der Bewässerungsflächen wurden daher auch Befragungen von Experten benutzt.

Ein **Vergleich** zwischen den sich überlappenden **Daten** von PAM und SEPA für die Jahre 1975 bis 1995 weist für die Landesebene vergleichsweise geringe Unterschiede von durchschnittlich nur 2%, in einzelnen Fällen aber auch Abweichungen bis zu 15% auf. Vergleicht man diese Daten mit den für 1996 detailliert erhobenen Daten des Censo Agropecuario, so ergeben sich wesentlich größere Unterschiede: Auf gesamtstaatlicher Ebene sind Differenzen zwischen 3 und 40% feststellbar. Auf kommunizipaler Ebene belaufen sich die Differenzen teilweise sogar auf den vierfachen Wert.

Mitunter enthalten die Datenbeschreibungen unklare Angaben zu den **Einheiten**. So werden z.B. Mengen für Bananen meist in „cachos“ (Bündeln) angegeben. Dabei werden jedoch keine Aussagen darüber gemacht, wieviel ein solches Bündel wiegt. Literaturangaben darüber schwanken zwischen 6,5 kg (SEPA) und 15 kg (EMBRAPA). Bei den Angaben für Cashew ist nicht immer klar ersichtlich, ob sich die Daten auf die Nüsse oder die Früchte beziehen, die beide in den Datenreihen gemeinsam erfasst werden. Umrechnungen sind in diesem Fall aufgrund der gemeinsamen Verwendung nicht möglich. Dies zeigen die Daten für 1996, wo für beide Verwendungen Angaben vorliegen.

Weiter bestehen teilweise **Fehlwerte** in den Datenreihen (z.B. der SEPA für Melonen) oder aber die (fünfstelligen) Werte aufeinanderfolgender Jahre gleichen sich exakt, was wohl

nur auf eine hohe Phantasie des Bearbeiters zurückzuführen ist.

In den längeren Zeitreihen (SEPA) findet sich auch ein **Bruch in den Datenreihen** für unbewässert angebaute Pflanzen, wenn die Änderungen in der linearen Regression für die Daten vorher und nachher betrachtet werden. Davon ausgehend, dass es einen Punkt gibt, an dem die Regression sich ändert, lassen sich solche Jahre nachweisen. Beispielhaft sind die Erträge für Maniok in Abbildung 5.2 dargestellt.

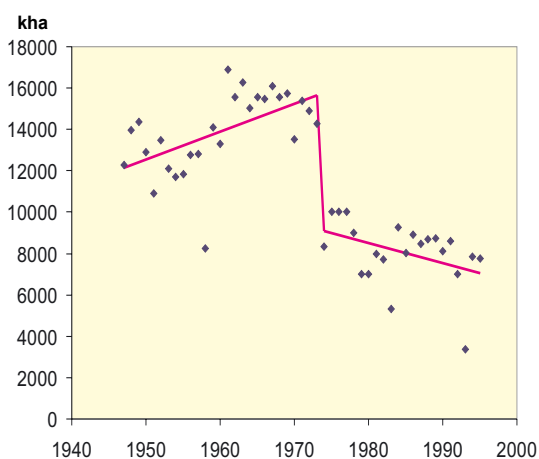


Abb. 5.2 Erträge (Quelle: IPLANCE, 1996) für Maniok (blau) und die jeweils beste Regression für Daten vor und nach 1973 (rosa)

Dieser Punkt tritt oft in den gleichen Jahren (1973 oder 1978) auf. Da keine natürlichen Ursachen dafür bekannt sind, ist die Möglichkeit einer anderen Methode der Datenerhebung als Ursache wahrscheinlich. Ebenfalls lassen sich zum gleichen Zeitpunkt Unterschiede in der Variabilität erkennen, die auch für diese Annahme sprechen. Demzufolge ist die Validierung nach diesem Zeitpunkt, also ab 1973/78, aussagekräftiger. Diese Daten werden deshalb für die Modellbewertung vorzugsweise eingesetzt.

Ab 1990 gibt es Daten für **Anbauflächen**. Sämtliche ältere Angaben über Flächen und somit auch über die entsprechenden Erträge

beziehen sich auf die Fläche, von der tatsächlich geerntet worden ist, und berücksichtigen nicht die Fläche, auf der ein Anbau von Pflanzen erfolgte, wo diese aufgrund schlechter Umweltbedingungen aber keine Erträge liefern konnten. Letztere werden allerdings im Modell benutzt.

Eine hilfreiche Abschätzung wurde durchgeführt, wobei angenommen wurde, dass das Maximum der Erntefläche aus drei Jahren der Anbaufläche entspricht, d.h. dass es innerhalb von drei Jahren mindestens einmal keine kompletten Ernteverluste auf Teilflächen gab (vgl. Abb. 4.5). Ein Vergleich der so errechneten Flächen für die Periode von 1990 bis 1998, in der Daten sowohl für die Ernte- als auch für die Anbauflächen vorliegen, zeigt, dass diese Methode zur Modellierung der Anbauflächen geeignet ist. Allerdings gilt es dabei zu berücksichtigen, dass lediglich die Daten für neun Jahre als Grundlage für den Vergleich zur Verfügung standen (Abb. 5.3).

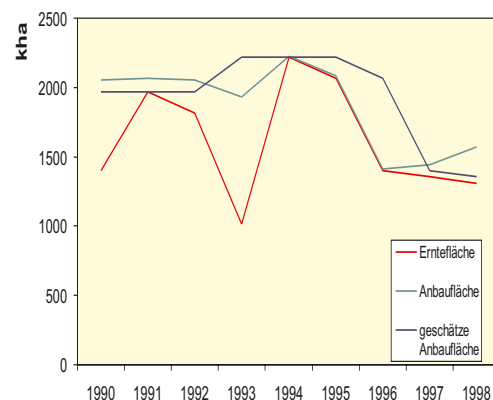


Abb. 5.3 Vergleich der Erntefläche, der Anbaufläche und der berechneten Anbaufläche in Ceará für 12 Kulturpflanzen. Quelle: IBGE, 1996B

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die verfügbaren Daten zum Bereich der Landwirtschaft teilweise qualitativ mangelhaft sind. Ein Vergleich zwischen simulierten und empirischen Werten ist dennoch möglich. Dabei ist aber zu beachten, dass die qualitativ höher-

wertigen Daten für den Vergleich benutzt werden. Deshalb werden die nach 1975 bzw. 1978 erhobenen Werte bevorzugt verwendet. Außerdem müssen die Ergebnisse, bei denen unsichere Eingangsdaten eine große Rolle spielen, in ihrer Bedeutung abgewichtet werden.

5.2.2 Hydrologie

Abflussdaten für 23 verschiedene Stationen (Ceará) und Angaben zum Volumen des gespeicherten Wassers einiger Stauseen (22 in Ceará) stehen zur Verfügung, die meisten in monatlicher, einige in täglicher Auflösung. Sie wurden im Rahmen des WAVES-Projektes aus verschiedenen internationalen und nationalen Quellen (GRDC, WMO, BfG, FUNCEME, COGERH, SUDENE) zusammengetragen. Die Länge der Datenreihen und der jeweils abgedeckte Zeitraum sind sehr unterschiedlich.

Problematisch sind die oft kurzen Zeitreihen. Die Abflussmessungen sind außerdem teilweise sehr ungenau, was eine Validierung ebenfalls erschwert. Ausführliche Angaben zur Datenlage sowie eine Validierung des hydrologischen Modells zur Beschreibung der natürlichen Wasserverfügbarkeit (WASA) sind in GÜNTNER, (2002) dargelegt.

5.2.3 Demographie

Die Tabelle im Anhang A3.1 gibt einen Überblick über die demographischen Daten,

die für die Validierung zur Verfügung stehen. Angaben zur Bevölkerung, teilweise aufgelöst nach Alter (jeweils 5-10 Jahresgruppen), und teilweise nach Munizipien, sind darin enthalten.

Ein Vergleich zwischen Daten verschiedener Quellen (IBGE, 1996A und SUDENE, 1989) ergibt geringe Unterschiede von durchschnittlich 3%. Die Qualität der Datenreihen zu den Einwohnerzahlen ist deutlich besser als die der landwirtschaftlichen Datenreihen. Eine Änderung der linearen Regression oder Variabilität, wie sie bei den landwirtschaftlichen Daten auftraten, konnte hier nicht festgestellt werden.

Ein Grund für die bessere Qualität der Daten besteht darin, dass demographische Daten bereits in früheren Jahren relativ einfach über das Geburtenregister erhoben werden konnten. Auf kommunaler Ebene ergeben sich bei älteren Daten aber wiederum Umrechnungsfehler aufgrund der Veränderung der Grenzen einzelner Munizipien im Laufe der Jahre.

Nur wenige nutzbare Daten liegen zum Bereich der Migration vor. Hier waren Angaben über außerhalb von Nordostbrasilien lebende Personen, die in anderen Bundesstaaten (Ceará, Piauí) geboren sind, auffindbar (IBGE, 1996c). Die Geburten- und Sterberaten sind nur indirekt bestimmbar, da die Rate der angemeldeten Geburten- und Sterbefälle nicht mit der sich daraus ergebenden Altersverteilung übereinstimmt.

5.3 Vergleich der Simulationsergebnisse mit historischen Daten

Zur quantitativen und qualitativen Einschätzung der Aussagemöglichkeiten des Modells wurden die Simulationsergebnisse mit den entsprechenden historischen Daten verglichen.

Das Modell weist mit seinen einzelnen Teilen eine umfangreiche Komplexität auf. Deshalb waren nicht alle Teile auf diese Art vali-

dierbar. Die vergleichbaren Modellteile sind entsprechend der Datenlage auf die Bereiche der Landwirtschaft, der Hydrologie und der Demographie beschränkt.

5.3.1 Landwirtschaft

Das landwirtschaftliche Ertragsmodell YES wurde nicht kalibriert. Hierfür standen nicht genügend Daten zur Verfügung, als dass nach der Kalibrierung noch entsprechend ausreichende Daten für die Validierung vorhanden gewesen wären. Darüber hinaus sind, wie dargestellt, die Daten nicht von einer solchen ausreichenden Qualität, als dass eine Kalibrierung mit diesen Daten sinnvoll gewesen wäre.

Das agrarökonomischen Modell RASMO wurde dagegen kalibriert. Hierfür wurden die detaillierten Daten des Agrarzensus (u.a. auch Produktionsdaten) 1996 benutzt. Es errechnet die Flächenverteilung der produzierten Pflanzen pro Munizip, pro Intensitätsstufe des Anbaus und pro Boden. Die Größe geht als Ausgangsfläche für das Jahr 1996 in das Modell YES ein. Die errechnete Größe entspricht nicht der tatsächlichen Flächenverteilung des Jahres 1996. Zur Errechnung wurden aber die Daten von 1996 benutzt. Außerdem wurden die Daten zu den bewässerten Flächen einiger Regionen, die für das Jahr 2000 von SEAGRI und für das Jahr 1985 von IBGE (1987b) zur Verfügung standen, zum Abgleich mit den von RASMO errechneten Daten verwendet.

5.3.1.1 Zeitlicher Verlauf von Ertrag und Produktion

Für die zeitliche Validierung des Ertrags und der Produktion stehen Datenreihen für den Zeitraum 1947-1995 (SEPA) für Ceará bzw. für den Zeitraum 1975-1998 für beide Bundesstaaten zur Verfügung. Der Vergleich der empirischen Daten mit den Simulationsdaten erfolgt sowohl qualitativ mittels graphischer Darstellung (siehe Abbildungen 5.4 und 5.5) als auch quantitativ mittels statistischer Verfahren (siehe Tabellen 5.1-5.4). Bei der quantitativen Validierung werden die Abweichung der Mittelwerte von Erträgen und Produktion, die Abweichungen der Variationskoeffizienten sowie die Kor-

relationskoeffizienten dargestellt. Unterschieden wird dabei zwischen den beiden Bundesstaaten. Für Ceará findet zudem ein Vergleich der SEPA- und PAM-Daten und auch ein Vergleich von zwei verschiedenen Zeitperioden statt (1947-1998 bzw. 1975-1998).

Folgende Größen wurden berechnet:

- Die **Differenz der Mittelwerte** ($\Delta\mu$) der simulierten Ergebnisse und der empirisch beobachteten Ergebnisse der durchschnittlichen jährlichen Erträge und der Produktion, normiert auf die beobachteten Erträge und wiedergegeben in Prozent.
- Der **Variationskoeffizient** (**V**) der Erträge, der als relatives Streuungsmaß dient und der Standardabweichung (δ) bezogen auf den Mittelwert (μ) entspricht ($V=\delta/\mu$). Dargestellt wird die Differenz (ΔV) des simulierten und empirisch beobachteten Koeffizienten, normiert auf die beobachteten Erträge und wiedergegeben in Prozent.
- Der **Korrelationskoeffizient** (**R**) als Maß für die stochastische Abhängigkeit der miteinander verglichenen Variablen. Dargestellt werden die Abhängigkeiten der simulierten und beobachteten Daten von Produktion und Ertrag.

Die Ergebnisse, die in den Tabellen 5.1 bis 5.4 dargestellt sind, lassen sich wie folgt interpretieren: Bei einigen Pflanzen stimmen die ermittelten Abweichungen der Mittelwerte sowohl für den Ertrag als auch für die Produktion gut überein (z.B. Bananen oder Mango). Wenn die Mittelwerte nicht gut übereinstimmen, muss dies nicht gegen die Gültigkeit des Modells an sich sprechen. Vielmehr ergeben sich hier verschiedene Interpretationsmöglichkeiten:

- Das Modell kann den Ertrag gut und die Produktion schlecht wiedergeben (z.B. für Melonen in Ceará oder für Reis oder Zuckerrohr in Piauí). Das Verhältnis der Bewirtschaftungsmethoden (vor allem das Verhältnis zwischen bewässerten und unbewässerten Flächen) kann dabei ebenso gut

wie der Ertrag pro Bewirtschaftungsmethode dargestellt werden, wogegen der Ertrag für die gesamte Fläche schlecht dargestellt wird.

- Die Abweichungen können für den einen Staat hoch und für den anderen Staat niedrig sein (z.B. Reis). Dies lässt darauf schließen, dass die Eingangsdaten in diesem Fall schlecht sind (z.B. für Böden in Piauí und für das Klima in Südpiauí).
- Die unterschiedliche Qualität der PAM- und SEPA-Daten kann eine weitere Ursache sein (z.B. Melonen). Wie schon dargestellt, haben die SEPA-Daten einen plötzlichen Regressionssprung, der nicht abgebildet wird (vgl. Kapitel 5.2.1). Eine weitere Ursache können auch plötzliche Änderungen sein, die vom Modell nicht dargestellt werden können und die zu einem früheren Zeitraum wirksam werden, wie z.B. Bewässerungsprojekte oder Befall mit Schädlingen.
- Der Vergleich der Ergebnisse für die trockenen und feuchten Jahre lässt wiederum Rückschlüsse darauf zu, wodurch Unsicherheiten entstehen, so z.B. ob die Modellkomponenten zuviel oder zuwenig Wasserverfügbarkeit berechnen. So werden z.B. für unbewässerte Pflanzen, wie Mais oder Maniok, die trockeneren Jahre besser dargestellt.

Die mittleren Erträge der meisten modellierten Produkte werden in den Simulationen gut wiedergegeben. Die Abweichungen zu den Daten sind oft kleiner als 20%, wenige belaufen sich auf bis 63% (Ausnahme: Melonen und Cashew s.u.). Hier ist auf Kapitel 5.2.1 zu verweisen, wo der Vergleich von Daten mehrerer Quellen, neben anderen Ungenauigkeiten in den Daten, Abweichungen von bis 15% und teilweise Abweichungen von bis zu 40% ergab.

Auffällig hohe Differenzen von mehr als 60% ergeben sich für Melonen und Cashew. Gleichzeitig weisen die Datenreihen für Melonen viele

Fehl- und sich wiederholende Werte auf. Bei Cashew ist der simulierte Mittelwert zu klein, was darauf zurückzuführen ist, dass in den empirischen Daten Früchte und Nüsse nicht gesondert erfasst werden und dass aus diesen der jeweilige Anteil der Nüsse und Früchte nicht hervorgeht. Die Früchte haben ein schwereres Gewicht als die Nüsse, sodass aus den Daten nicht der tatsächliche Ertrag ablesbar ist. Ein Vergleich ist daher nicht möglich, weder für die absoluten Werte noch für die zeitlichen Änderungen. Für eine vollständige Darstellung werden die Daten zu Cashew aber mit angeführt.

Die zeitlichen Korrelationen fallen mit den späteren Zeitreihen der PAM-Daten besser aus als mit den früheren Zeitreihen der SEPA-Daten, wofür wiederum die schlechtere Datenqualität der SEPA-Daten ursächlich ist. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf für die jährlichen Erträge und Produktion (Abb. 5.4 sowie Abb. 5.5) so wird er meist gut abgebildet. Größere Abweichungen zeigen sich für Mais und Maniok in Ceará für den Zeitraum 1947-1977, was durch den in Kapitel 5.2 erläuterten Regressionssprung bedingt ist, der nicht abgebildet wird (und auch nicht abgebildet werden soll, da er vermutlich auf Datenungenauigkeiten beruht). Für den jährlichen Produktionsverlauf für Mais und Kokosnüsse in Piauí für den Zeitraum 1985-1995 ändert sich die Variabilität in den Daten, die ebenfalls vom Modell nicht abgebildet wird. Auch einzelne Ausreißerwerte wie z.B. bei den Erträgen von Bananen in Ceará werden vom Modell nicht erfasst.

CEARÁ	1947-1995(SEPA),1975-1998(PAM)						feuchte Jahre			trockene Jahre		
	Mittelwert		$\Delta\mu$		R^2		$\Delta\mu$		R^2	$\Delta\mu$		R^2
	PAM	SIM	PAM	SEPA	SEPA	PAM	PAM	SEPA	PAM	PAM	SEPA	PAM
Bananen	270856	235739	-13	-14	0.28	0.24	4	-0.39	-0.39	-23	0.58	0.42
Baumwolle	40729	65723	61	21	0.44	0.34	-6	-0.06	-0.07	183	-0.03	-0.02
Bohnen	122506	108537	-11	-30	0.47	0.59	-6	0.13	0.65	8	0.02	0.12
Cashew	314629	15948	-95	-68	0.45	-0.11	-92	-0.22	-0.28	-81	0.54	-0.01
Kokosnuss	109320	99645	-9	11	0.90	0.59	9	0.72	0.72	-23	0.17	0.89
Mais	231113	254518	10	-14	0.46	0.66	2	0.12	0.12	78	0.16	0.25
Mango	219101	184600	-16	-22	-0.08	-0.15	20	-0.11	-0.11	-32	0.14	0.07
Maniok	986007	955900	-3	-30	0.19	-0.02	22	-0.45	-0.45	-4	0.31	0.46
Melonen	7519	11832	57	115	0.78	0.75	135	0.69	0.69	5	0.61	0.76
Reis	105601	101172	-4	-15	0.78	0.84	-4	0.83	0.96	27	0.56	0.92
Tomate	47803	38488	-19	11	0.97	0.89	-6	0.89	0.89	-17	0.66	0.91
Zuckerrohr	2150067	1762525	-18	-25	0.65	0.09	-20	-0.10	-0.10	-7	-0.14	0.21

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte μ (in kg außer: Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchten) und der zeitlichen Korrelation der simulierten mit gemessenen jährlichen Produktionsdaten für Ceará.

CEARÁ	1947-1995(SEPA),1975-1998(PAM)								feuchte Jahre			trockene Jahre		
	Mittelwert		$\Delta\mu$		V		R^2		$\Delta\mu$		R^2	$\Delta\mu$		R^2
	PAM	SIM	PAM	Sepe	Sepe	PAM	Sepe	PAM	PAM	Sepe	PAM	PAM	Sepe	PAM
Bananen	7449	7735	4	1	53	39	0.31	0.68	-9	0.76	0.74	18	0.57	0.57
Baumwolle	380	555	46	58	66	67	0.23	0.33	53	0.33	-0.04	58	-0.58	-0.57
Bohnen	255	314	23	-19	43	27	0.20	0.40	7	0.11	0.19	50	-0.53	-0.27
Cashew	2319	103	-96	-72	-29	34	0.07	-0.05	-98	0.41	0.19	-91	-0.49	-0.09
Kokosnuss	4254	5528	30	10	42	-13	0.33	0.30	10	0.19	0.67	49	-0.22	-0.24
Mais	458	376	-18	-34	44	29	0.49	0.60	-11	0.24	0.27	-16	-0.38	-0.38
Mango	56789	46189	-19	8	40	48	-0.23	0.34	-36	0.63	0.69	7	0.77	0.42
Maniok	7828	61661	-21	-44	93	88	0.35	0.70	-33	0.58	0.92	757	-0.04	0.20
Melonen	7566	8029	6	32	51	46	0.94	0.77	-23	0.72	0.83	78	0.82	0.75
Reis	1969	1812	-8	-7	23	48	0.60	0.49	-12	0.20	-0.09	-3	0.78	0.69
Tomate	31253	17257	-45	-34	27	39	0.95	0.01	-49	0.52	-0.01	-39	-0.47	-0.41
Zuckerrohr	39716	43150	9	14	97	95	0.38	0.67	-17	-0.17	0.80	4	0.31	0.31

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte μ (in kg/ha bzw. Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchten/ha), Variationskoeffizienten V und der zeitlichen Korrelation R der simulierten mit gemessenen jährlichen Ertragsdaten für Ceará.

PIAUÍ	Jahre: 1975-1998				feuchte Jahre		trockene Jahre	
	Mittelwert		$\Delta\mu$	R^2	$\Delta\mu$	R^2	$\Delta\mu$	R^2
	PAM	SIM	PAM	PAM	PAM	PAM	PAM	PAM
Bananen	36624545	36211077	-1	0.42	15	-0.13	-2	0.87
Baumwolle	10552545	6135059	-42	0.72	-66	0.70	123	0.50
Bohnen	59423800	39768430	-33	0.53	-37	0.70	1	0.19
Cashew	84368000	3934542	-95	0.30	-95	0.58	-97	-0.24
Kokosnuss	3139364	2781149	-11	0.78	4	0.68	-19	0.83
Mais	182523000	125387404	-31	0.68	-49	0.54	25	0.48
Mango	130488914	119601504	-8	0.71	-8	-0.41	-2	0.71
Maniok	1082152227	1122780869	4	0.33	12	0.15	-1	0.68
Melonen	80603	1505401	1768	0.69	2718	0.49	1912	0.60
Reis	219973000	108794349	-51	0.63	-55	0.88	-26	0.34
Tomate	1025455	1713659	67	0.76	84	0.97	14	0.81
Zuckerrohr	648667136	188732451	-71	0.66	-120	0.95	-71	0.61

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte μ (in kg bzw. Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchten) und der zeitlichen Korrelation der simulierten mit gemessenen jährlichen Produktionsdaten für Piauí.

PIAUÍ	Jahre: 1975-1998					feuchte Jahre		trockene Jahre	
	Mittelwert		$\Delta\mu$	ΔV	R^2	$\Delta\mu$	R^2	$\Delta\mu$	R^2
	PAM	SIM	PAM	PAM	PAM	PAM	PAM	PAM	PAM
Bananen	9871	10397	5	25	0.51	11	-0.21	7	0.52
Baumwolle	391	497	27	63	0.49	15	0.20	93	0.72
Bohnen	231	241	4	50	0.37	12	-0.21	29	0.54
Cashew	1831	69	-96	26	0.05	-93	0.40	-98	-0.11
Kokosnuss	6294	7434	15	75	0.21	28	-0.02	12	0.72
Mais	516	448	-18	53	0.64	-30	-0.35	34	0.53
Mango	51663	56136	-13	28	0.61	7	0.52	13	0.64
Maniok	9802	107451	10	94	0.68	4	0.53	9	0.83
Melonen	1679	6489	268	74	0.49	343	0.56	156	0.54
Reis	989	708	-28	41	0.74	-34	0.86	-9	0.37
Tomate	11673	11779	1	5	0.91	0	0.96	3	0.98
Zuckerrohr	46760	46951	0	98	0.59	-3	0.80	1	0.87

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Vergleich der Mittelwerte μ (kg/ha bzw. Mango, Melonen, Kokosnuss in Früchte/ha), Variationskoeffizienten V und der zeitlichen Korrelation R der simulierten mit gemessenen jährlichen Ertragsdaten für Piauí.

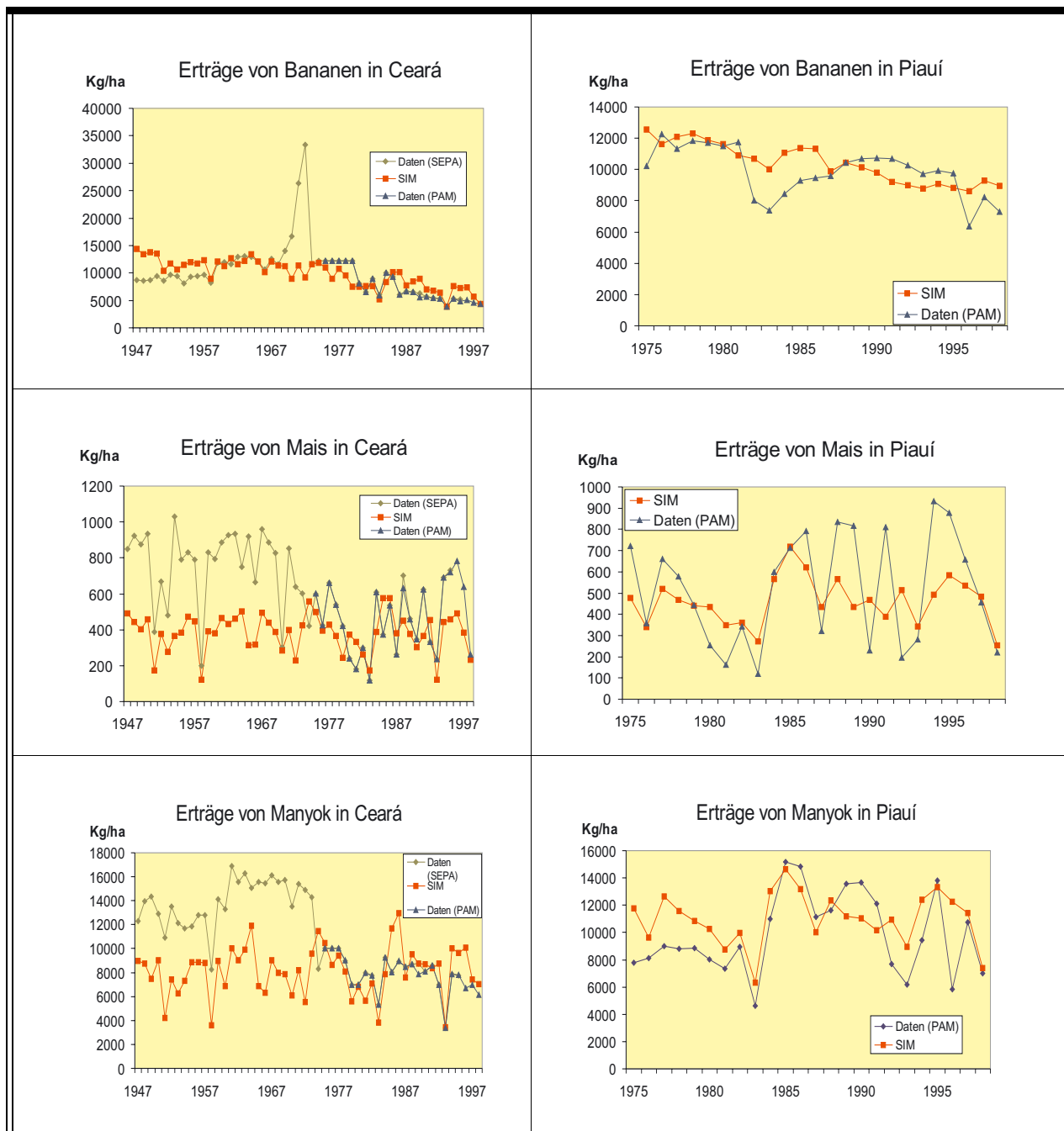


Abb. 5.4 Vergleich erhobener (PAM bzw. SEPA) und simulierter Erträge für den Zeitraum 1947-1998 bzw. 1975-1998 für die beiden Bundesstaaten

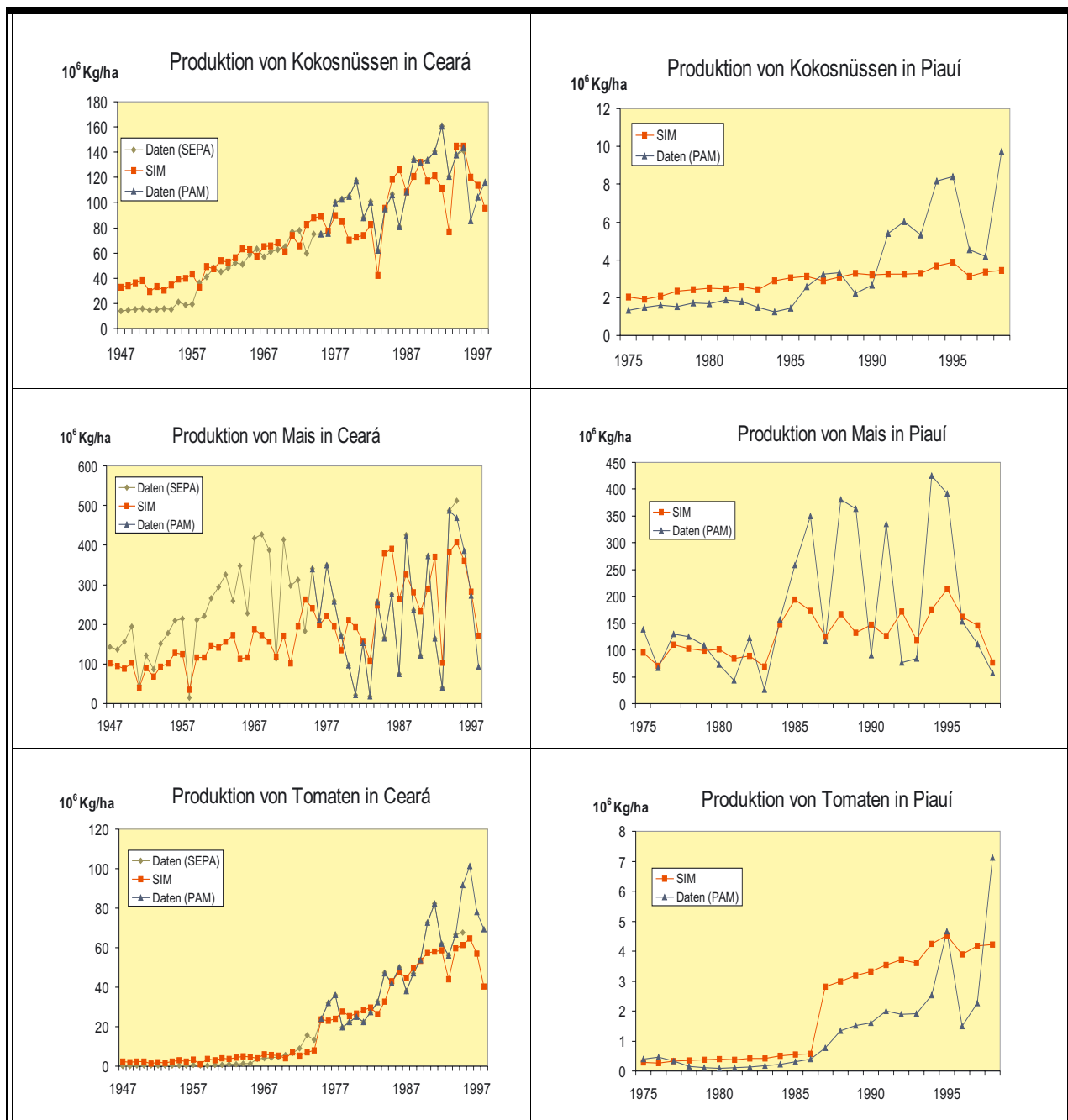


Abb. 5.5 Vergleich erhobener (PAM bzw. SEPA) und simulierter Produktionen für ausgewählte Pflanzen für den Zeitraum 1947-1998 bzw. 1975-1998 für die beiden Bundesstaaten

Der zeitliche Verlauf der Produktion wird durch das Modell besser abgebildet als der zeitliche Verlauf der Erträge, wie sich auch an den eher höheren Korrelationskoeffizienten erkennen lässt. Dies begründet sich dadurch, dass historische Aufzeichnungen eher für Produktions- bzw. Verkaufszahlen als für Flächen durchgeführt worden sind und somit die Daten, mit denen der Vergleich erfolgt, zuverlässiger sind als die Daten für die Erträge.

Das Modell ist besser für die im Regenfeldbau angebauten Pflanzen validierbar, da bei den vorwiegend bewässerten Kulturen der Anteil der bewässerten Anbaufläche einen großen Einfluss auf die errechneten mittleren Erträge hat (vgl. Abschnitt 6.2.2.4). Die aktuelle Änderung der bewässerten Flächen aufgrund von Wassermangel wird im Modell berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.3.3). Die potentielle Ausdehnung der Bewässerungsflächen wird dagegen nicht vom Modell berechnet, sondern geht als Szenario ein, da sie eher politisch bestimmt und sehr unsicher ist. Das Verhältnis zwischen bewässertem und unbewässertem Anbau ist dadurch weniger gesichert bestimmbar.

Der zeitliche Einfluss der Klimavariabilität ist gut erfasst. Die Korrelationskoeffizienten für unbewässerte Pflanzen liegen zumeist um 0.6 (vgl. Tabelle 5.2 und Tabelle 5.4). Erträge und Produktionen in trockenen Jahren sind zumeist besser vorhersagbar. Vor allem bei im Regenfeldbau angebauten Pflanzen (Bohnen, Mais, Maniok) zeigen sich dabei höhere Korrelationen. Die Korrelation bei den feuchten Jahren fällt dagegen sowohl bei den Ergebnissen für Ceará als auch für Piauí überwiegend geringer aus.

Feuchte Jahre werden vom Modell somit schlechter wiedergegeben. Die Prozessbeschreibung der Ertragsreduktion durch Wassermangel ist wesentlich detaillierter (z.B. nach Wachstumszeiten differenziert) als die Prozessbeschreibung der Ertragsreduktion durch Wasserüberschuss (vgl. Kapitel 4.4.1). Gene-

rell wird die interannuelle Variabilität von Produktion und Erträgen einigermaßen angemessen wiedergegeben. Der Variationskoeffizient beläuft sich für die meisten Pflanzen auf $\pm 60\%$. Eine mögliche Ursache hierfür kann die unterschiedliche Erfassung von feuchten und trockenen Jahren durch das Modell sein. Der zeitliche Verlauf der Erträge (Abb. 5.4) zeigt vor allem für die Zeit nach 1975 eine gute Übereinstimmung. In den längeren Zeiträumen für Ceará können die in Abb. 5.2 dargestellten plötzlichen Änderungen des Mittelwertes aber nicht abgebildet werden. Die Ergebnisse für Ceará sind in vielen Fällen besser als die Ergebnisse für Piauí. Dies lässt sich mit der schlechteren Qualität der Klimadaten für Piauí (für Südpiauí sind diese sehr grob aufgelöst) und der unterschiedlichen Qualität der Bodendaten erklären, die für Ceará in wesentlich detaillierterer Form vorliegen.

5.3.1.2 Räumliche Validierung von Ertrag und Produktion

Das Munizip ist zwar die kleinste räumliche Diskretisierungseinheit im Modell. Es wurde aber nicht erwartet, in dieser Auflösung validierbare Ergebnisse errechnen zu können. Dies wurde nur für die höheren Ebenen angestrebt. So sind die auf der Ebene der Municipien ermittelten teilweise niedrigen Korrelationen für zeitlich gemittelte Erträge nicht überraschend. Der Vergleich von Datenreihen auf Munizipebene ergab teilweise erhebliche Abweichungen in vierfacher Größenordnung für einzelne Municipien.

Dennoch wird die räumliche Verteilung einiger Kulturpflanzen gut wiedergegeben. Tabelle 5.5 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den Erträgen und der Produktion aus den PAM-Daten und den simulierten Werten, gemittelt über die Jahre 1975-1998 für Piauí und Ceará auf Munizipebene. Mehrere der Korrelationskoeffizienten sind größer als 0.4.

1975-1998	Ertrag		Produktion	
	Piauí	Ceará	Piauí	Ceará
Bananen	0.20	0.46	0.15	0.42
Baumwolle	0.15	-0.21	0.04	0.50
Bohnen	0.04	0.31	-0.5	0.73
Cashew	0.35	0.32	0.08	0.65
Kokosnuss	-0.15	0.47	0.8	-0.31
Mais	-0.19	0.18	0.05	0.64
Mango	-0.19	-0.03	-0.6	0.8
Maniok	-0.33	0.43	0.20	0.09
Melonen	0.37	0.14	0.86	0.96
Reis	0.48	0.78	0.00	0.60
Tomate	0.49	-0.19	0.96	0.31
Zuckerrohr	-0.27	-0.12	0.36	0.76

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Validierung des landwirtschaftlichen Produktionsmodells. Korrelationskoeffizient der simulierten jährlichen Erträge und der Produktion zwischen gemessenen und simulierten Daten auf der Ebene der Municipien, gewichtet mit der jeweiligen Anbaufläche pro Munizip.

Bei der Berechnung der Korrelation wurden die Werte der einzelnen Municipien entsprechend ihrer gesamten Anbaufläche gewichtet. Der Vergleich der Produktionsdaten zeigt dabei in der Mehrzahl eine bessere Korrelation als der Vergleich der Ertragsdaten. Auf regionaler Ebene werden die räumlichen Unterschiede gut bis sehr gut angezeigt. Ein Vergleich der Szenarioregionen (zur Definition der Szenarioregionen vgl. Kapitel 4.2.1) findet sich in Abb. 5.6 beispielhaft für einige Kulturpflanzen.

Abb. 5.7 und Abb. 5.8 zeigen die räumlichen Muster der berechneten Ertrags- und Produktionswerte auf Munizipebene für einzelne Kulturpflanzen. Es zeigt sich eine Übereinstimmung der erhobenen und simulierten Muster des gesamten Untersuchungsgebiets. Betrachtet man die Ergebnisse auf einer Mesoskala, also die räumlichen Muster auf einer mehrere Municipien aggregierenden Skala, werden sie vom Mo-

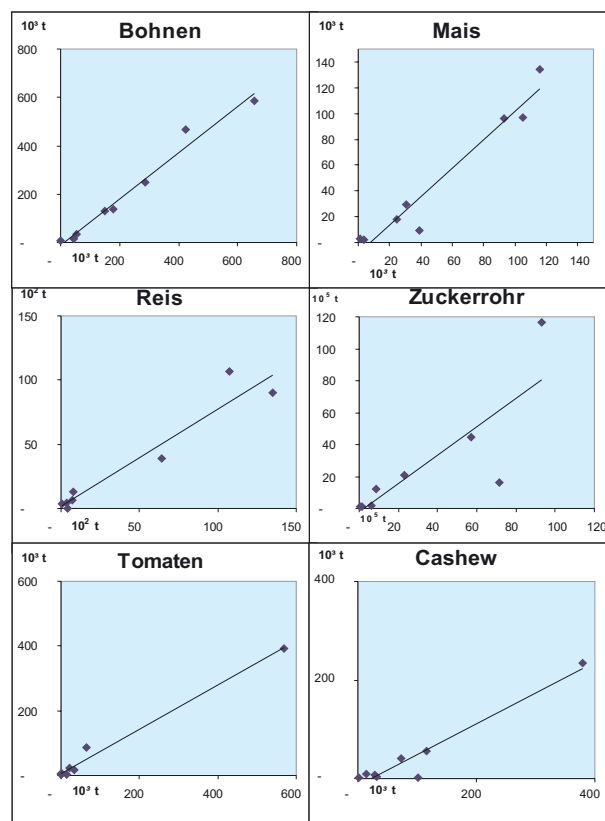


Abb. 5.6 Vergleich der simulierten Produktionen mit den erhobenen Daten (PAM) in den Szenarioregionen. Mittelwerte für 1975-1998.

dell gut wiedergegeben. Dies gilt für die Produktionsdaten. Bei den Ertragsdaten sind dagegen einzelne größere Abweichungen der simulierten Werte von den erhobenen Daten sichtbar. So fallen z.B. beim Ertrag von Bananen Abweichungen vor allem für den Norden von Piauí und für Teile von Ceará auf. Bei dem Ertrag von Reis sind Unterschiede für den Süden Piaúis und für Ceará feststellbar (Abb. 5.8).

Den größten Einfluss auf die räumliche Verteilung von Erträgen und Produktion haben die Einflussgrößen Klima, Boden und verschiedene Bewirtschaftungsstrukturen. Diese an sich unterschiedlichen Einflüsse werden somit gemeinsam validiert. Der einzelne Einfluss auf die Erträge wird in Kap.6.2.2 näher untersucht.

Auch für die räumliche Verteilung zeigt sich, dass das Modell den Verlauf der Produktion

besser wiedergibt als den Verlauf der Erträge, wofür die gleichen Ursachen wie in Kapitel 5.3.1.1 maßgeblich sind. Dabei ist auch die geringere Qualität der PAM-Daten zu berücksichtigen. Da vor allem die Ergebnisse auf der Regionalebene aber hohe Korrelationen aufweisen (vgl. Abb. 5.6), schmälern die Abweichungen nicht die allgemeine Fähigkeit des Modells, validierbare Ergebnisse für alle untersuchten räumlichen Einheiten zu liefern.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Modellvalidierung aufgrund der Qualität der vorliegenden Daten zwar schwierig ist, aber in vielen Bereichen trotzdem durchführbar ist, wie Tabelle 5.5 und Abb. 5.6 bis Abb. 5.8 zeigen. Die Beschreibung der Bewässerungslandwirtschaft ist aufgrund der teilweise unklaren Angaben über Bewässerungsflächen nur mit Einschränkungen zu validieren. Bei einigen Pflanzensorten kann die Gesamtproduktion der Bewässerungslandwirtschaft daher auch nicht zuverlässig validiert werden. Bei unbewässert angebauten Pflanzen ist dies gut möglich, was sich an der größeren Übereinstimmung der erhobenen mit den simulierten Werten für den unbewässerten Pflanzenanbau zeigt. Einschränkungen gelten vor allem für den Zeitraum vor 1975. Danach verbessert sich die Datenlage, so dass eine Validierung der Ergebnisse ab 1975 auf weniger Probleme stößt.

Einige ertrags- bzw. produktionsbeeinflussende Faktoren werden vom Modell nicht berücksichtigt. So können z.B. Schädlinge in einzelnen Jahren einen großen Einfluss haben. In einer längerfristigen Einschätzung ist ihr Einfluss jedoch eher als gering zu veranschlagen und nur in Einzelfällen (Produktion von Baumwolle in Ceará) von Bedeutung. Aufgrund des Fehlens entsprechenden Daten konnten auch keine Änderungen der Flächen der einzelnen Kulturpflanzen pro Boden und Bewirtschaftungsform berücksichtigt werden. Für beide Bundesstaaten ist festzuhalten, dass die Abweichungen der Modellergebnisse von den er-

hobenen Daten in den meisten Fällen im Rahmen handhabbarer Schwankungsbreiten bleiben. Die Differenzen der Mittelwerte von Ertrag und Produktion auf der Ebene der Bundesstaaten sind oft <15%, wenige belaufen sich auf bis zu 60%. Dabei muss wieder die Unzulänglichkeit der Datenreihen als limitierender Faktor berücksichtigt werden. Die zeitliche Variabilität wird zumeist gut wiedergegeben. Die Korrelationskoeffizienten liegen um 0.6. Räumlich hohe Korrelationen werden auf der Regionalebene erreicht.

Insgesamt entspricht der Modelloutput dem Modellzweck, nämlich Aussagen über die Entwicklung der jährlichen Erträge und Produktion zu machen und die Auswirkungen von Änderungen der gegebenen Randbedingungen, wie z.B. Änderungen der bewässerten Fläche, des Niederschlags oder der Speicherkapazität von Stauseen, zu quantifizieren.

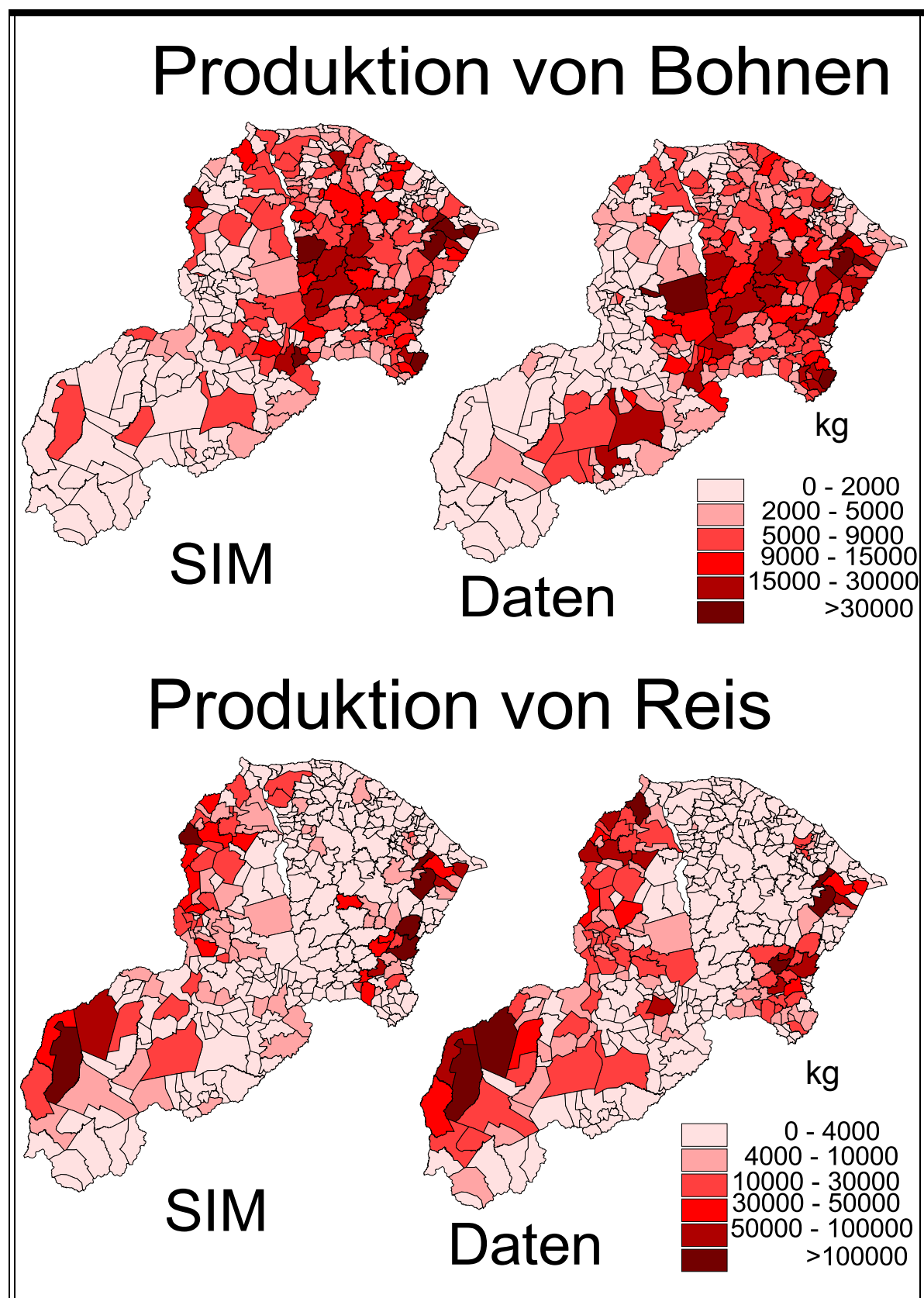


Abb. 5.7 Produktion von Bohnen und Reis für den Zeitraum von 1975-1998, Vergleich simulierter und gemessener Daten (PAM, IBGE 1998a,b)

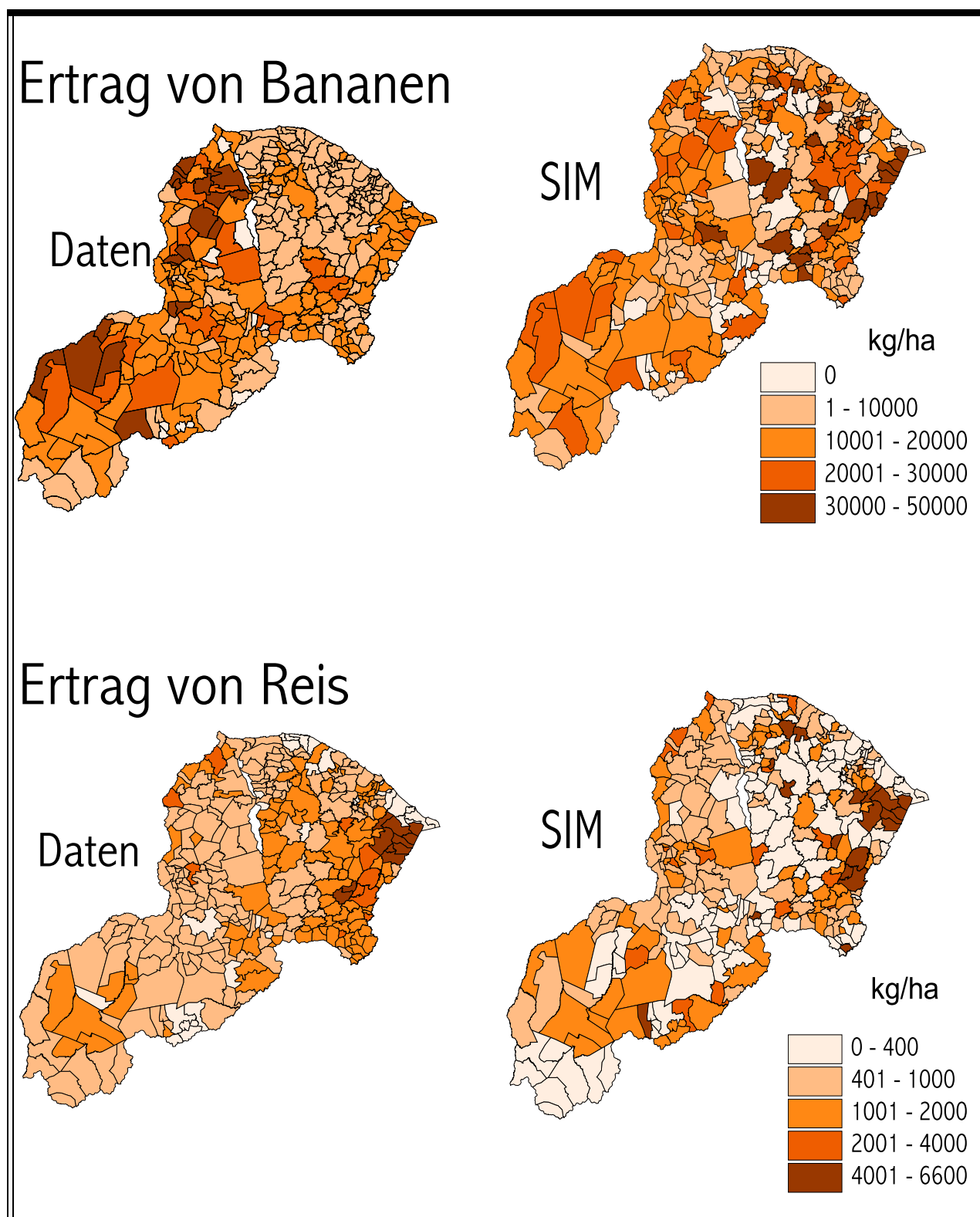


Abb. 5.8 Jährliche Reis- und Bananenerträge, gemittelt über einen Zeitraum von 1975-1998, Vergleich simulierter und gemessener Daten (PAM, IBGE 1998a,b)

5.3.2 Hydrologie

Ein ausführlicher Vergleich der Ergebnisse des hydrologischen Teilmodells WASA mit entsprechenden historischen Daten findet sich in GÜNTNER (2002). Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass das Modell WASA das hydrologische Verhalten des Untersuchungsgebietes gut wiedergibt. Dies beinhaltet sowohl die inter- als auch die intra-annuelle Variabilität.

Verglichen wurden Abfluss und Stauseevolumina. Eine systematische Unter- oder Überschätzung der Abflussraten durch das Modell zeigt sich bei dem Vergleich mit den historischen Daten nicht. Der mittlere jährliche Abfluss kann mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 20\%$ wiedergegeben werden. Tendenziell zeigt sich eine bessere Übereinstimmung der Modellergebnisse mit Daten von Stationen in größeren Flussgebieten.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Daten zu den Volumina von Stauseen ist im Bereich der mittleren Werte des Abflusses. Es ergeben sich Abweichungen am Ende der Regenperiode in der Größenordnung von durchschnittlich 20% für die gemessenen Stauungsvolumina der gesamten Zahl der getesteten Stauseen. Auch die Repräsentation der interannuellen Variabilität fällt zufriedenstellend aus. Auf einer Monatsskala kommt es zu höheren Abweichungen, die allerdings die Verlässlichkeit des Teilmodells nicht beeinträchtigen.

Hier wurde keine umfangreiche Validierung durchgeführt, sondern vielmehr eine Überprüfung, ob die Werte der Qualität der Modellvalidierung (GÜNTNER, 2002) übernommen werden können. In diesem Kontext ist zu berücksichtigen, dass die Wassernutzung teilweise in die oben beschriebene Validierung mit einbezogen ist. Dennoch können sich Abweichungen durch die vollständige Kopplung innerhalb des integrierten Modells ergeben. Daher wurden Vergleiche von empirischen Daten und Simulati-

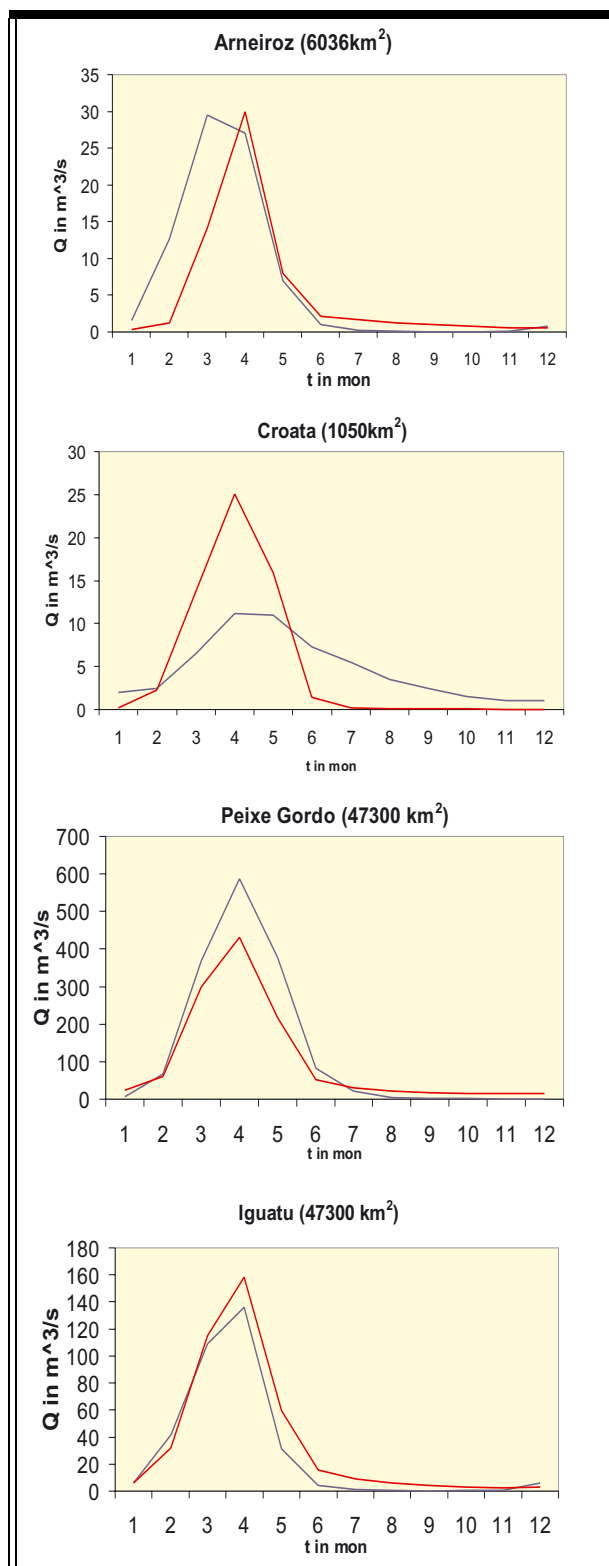


Abb. 5.9 Vergleich von gemessenen Daten (blau) und Simulationsdaten (rot) für Abflüsse, gemessen an den Stationen Arneiroz, Croatá, Peixe Gordo und Iguatú. Die monatlichen Daten sind gemittelt über die Jahre 1960-1980.

onsdaten zu Abflüssen durchgeführt. Beispielhaft zeigt Abbildung 5.9 Ergebnisse für vier ausgewählte Stationen. Diese waren die Stationen Arneiroz, Iguatú und Peixe Gordo, die alle am Jaguaribe-Fluss liegen, und die Station Croatá, am Fluss Macambira (siehe Karte im Anhang A1.1). Das durchschnittliche intraannuelle Abflussregime wird für die meisten Stationen gut wiedergegeben. Ein maßgeblicher Grund hierfür sind die klar definierten klimatischen Rahmenbedingungen mit einem klaren Niederschlagsregime, das sich in eine Regen- und eine Trockenzeit unterscheiden lässt. Eine schlechtere Darstellung dieses Abflusses ist häufig mit größeren Abweichungen des simulierten durchschnittlichen jährlichen Abflusses verbunden. Eine schlechte Wiedergabe des interannuellen Abflussverlaufs findet sich für kleinere Einzugsgebiete mit einem Fluss in tiefere Grundwasservorkommen. Dieser Fluss, der auch in der Trockenzeit anhält, kann im Modell nur durch Kalibrierung seiner Zeitverzögerung wiedergegeben werden. Ein Beispiel hierfür ist die Station Croatá (vgl. Abb. 5.9), die durch Abfluss ins sedimentäre Grundgestein beeinflusst wird.

Die Abweichungen der Validierung von SIM zu WASA liegen alle wesentlich unter der Genauigkeit der Validierungswerte, die für das teilweise gekoppelte WASA errechnet wurden (für detailliertere Vergleiche der gekoppelten und ungekoppelten Version ausserhalb der Validierung vgl. Kap.6.2.3).

WASA ist das einzige Teilmodell, bei dem der Datenvergleich aufgrund der Datenverfügbarkeit auch intraannuell, also auf Monatswerten, möglich ist. Da das Modell so konzipiert ist, dass auf dieser Ebene nicht nur Berechnungen durchgeführt, sondern tatsächlich auch Ergebnisse erzeugt werden können, die überprüfbar sind, ist dieser Schritt auch sinnvoll.

Für eine Validierung des hydrologischen Teilmodells NoWUM, welches die Wassernutzung beschreibt, stehen keine Daten zur Verfü-

gung. Indirekt ist die Validierung aber gegeben, da die Wassernutzung z.B. erheblich die aktuell gespeicherten Wassermengen in den Stauseen beeinflusst (vgl. Kapitel 6.2.3.1).

5.3.3 Demographie

Das Bevölkerungsmodell wurde auf der bundesstaatlichen Ebene mit den Daten für 1921 bzw. 1996 kalibriert. Bei der Altersverteilung wurde der Wert von 1970, bei der räumlichen Verteilung auf kommunaler Ebene der Wert für 1991 übernommen. Alle anderen im Anhang in Tabelle A3.1 aufgeführten Daten stehen somit zur Validierung zur Verfügung.

In der Abbildung 5.10 werden Vergleiche zwischen beobachteten und simulierten Daten dargestellt, die im folgenden näher beschrieben werden. Die gesamte jährliche Entwicklung der Bevölkerungszahlen in beiden Bundesstaaten für den Zeitraum von 1921-1998 zeigt Abb. 5.10b. Diese Entwicklung wird vom Modell sehr gut wiedergegeben, was sich auch im hohen Korrelationskoeffizienten von 0.98 widerspiegelt.

Verglichen mit den Ergebnissen der Änderung der Bevölkerungsverteilung in den einzelnen Regionen (Abb. 5.10a) wird die Entwicklung der räumlichen Verteilung über 30 Jahre auf der regionalen Ebene gut wiedergegeben. Das schnellere Wachstum in den Hauptstädten Fortaleza und Teresina wird dabei etwas überschätzt. Die zeitlichen Änderungen der Verteilungen in den einzelnen Altersgruppen werden in Abbildung 5.10d dargestellt.

Für den Zeitraum der Jahre 1992-2001 wurden die außerhalb von Ceará und Piauí lebenden Einwohner, die in einem der beiden Bundesstaaten geboren sind, also somit aus diesen emigriert sind, mit den entsprechenden Daten verglichen (Abb. 5.10c). Dabei standen Daten für die Jahre 1992, 1993, 1995, 1996 und 2001 als Vergleichsgrundlage zur Verfügung (PNAD, IBGE 1996c). Somit sind zwar

keine Aussagen über zeitliche Trends, wohl aber über die ungefähre Größe der Migration möglich. Eine Übereinstimmung in der richtigen Größenordnung ist dabei feststellbar. Die Abweichungen liegen zwischen 6% (2001) und 15% (1993).

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die Validierung fand in erster Linie für die Abbildung der Bevölkerungsentwicklung für verschiedene Aggregationsebenen statt. Das Modell gibt die Entwicklung der Gesamtbevölkerung sehr gut ($r=0.98$) und die Entwicklung der räumlichen Verteilung und der Altersverteilung der Bevölkerungsschichten gut wieder (vgl. Abb. 5.10).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Entwicklung der Gesamtbevölkerung zwei Jahre und bei der Altersverteilung bzw. regionalen Verteilung jeweils ein Jahr kalibriert wurden. Die in Abbildung 5.10 dargestellte gute Wiedergabe der zeitlichen Änderung dieser Variablen ist unkalibriert.

Zuverlässige Zahlen zu Migrationsprozessen waren nur in geringem Umfang ermittelbar (vgl. Kap.5.2.3). Allerdings gab es Daten zu Personen, die in Ceará oder Piauí geboren sind und in einem anderen Bundesstaat leben. Diese sind gänzlich unkalibriert (Abb. 5.10c) und werden vom Modell zufriedenstellend dargestellt.

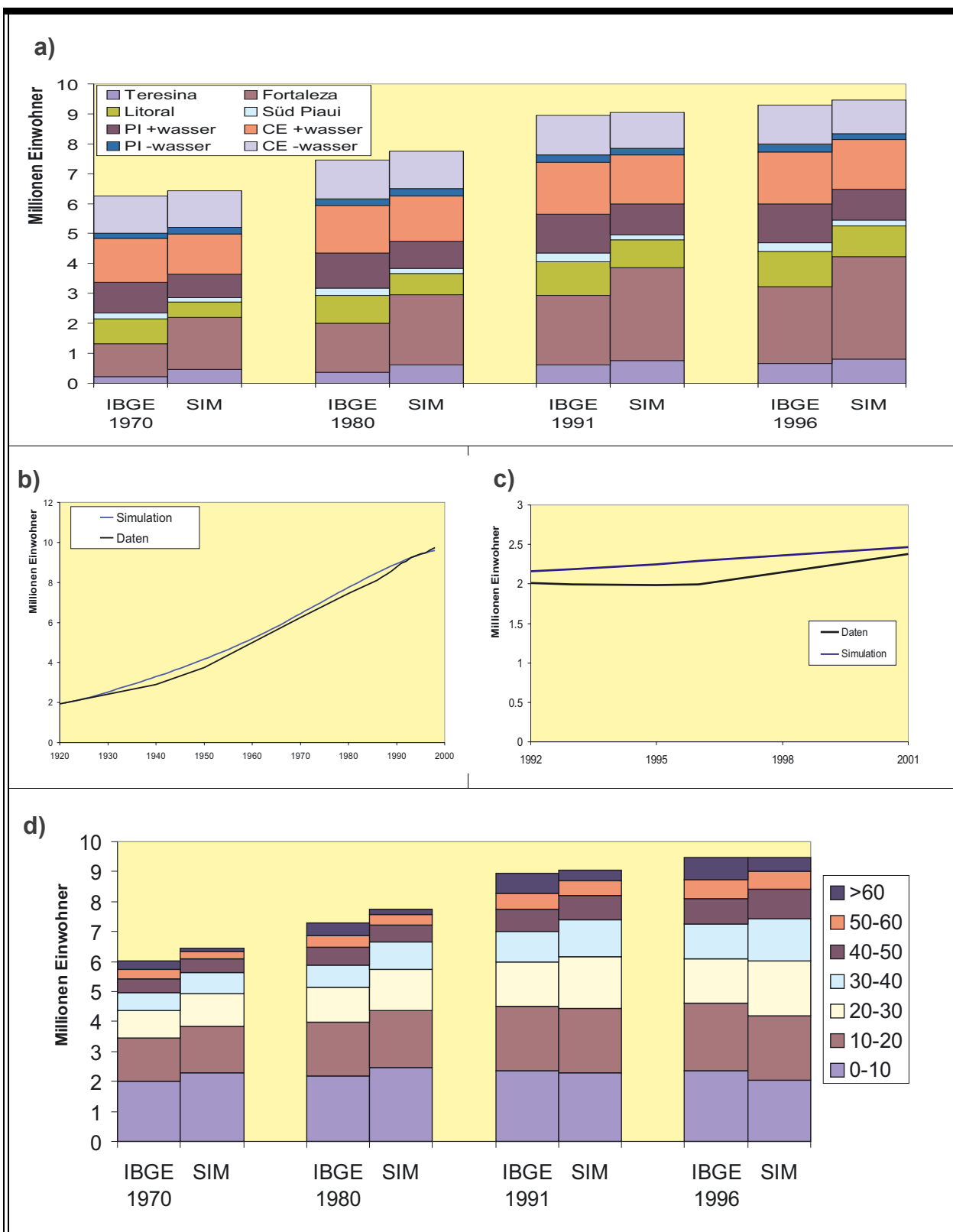


Abb. 5.10 Ergebnisse der Validierung des Vergleichs der simulierten mit den Daten der IBGE. a) Entwicklung der Bevölkerungsverteilung in verschiedenen Regionen, b) gesamte Bevölkerung beider Bundesstaaten, c) Einwohner, die in Piauí bzw. Ceará geboren sind, aber in anderen Bundesstaaten leben, d) Entwicklung einzelner Altersgruppen der Bevölkerung.

Kapitel

6

Modellanalysen (Sensitivität und Unsicherheit) und Modellanwendungen

6.1 Einführung

Nachfolgend werden die Sensitivität und die Unsicherheiten des Modells analysiert sowie Szenarioanalysen berechnet und die Auswirkungen der Skalierung des Modells untersucht. Ein Problem dabei ist die Abgrenzung zwischen der Analyse und der Anwendung des Modells. Szenarioanalysen können als ein Bestandteil von Sensitivitätsanalysen verstanden werden und müssten folglich als ein Teil der Sensitivitätsstudien dargestellt werden. Dies gilt für die Ermittlung des jeweiligen Einflusses sowohl der Referenzszenarien als auch der verschiedenen Kli-

maszenarien. Die Ergebnisse dieser Szenarioanalysen repräsentieren zugleich aber den Kern der Modellanwendung und beantworten die Frage nach den Auswirkungen der Wirkungsgeflechts Klimaänderung - Wasserverfügbarkeit - landwirtschaftliche Produktion - Migration. Dies legt eine gesonderte Darstellung nahe. Deshalb werden zunächst die Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen und in einem zweiten Schritt dann die Szenarioanalysen beschrieben, obgleich eine solche Abgrenzung methodisch nicht unproblematisch ist.

6.2 Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen

6.2.1 Zweck und Methodik

Die Verlässlichkeit und Gültigkeit eines Modells muss in einer umfassenden Analyse getestet werden. Eine solche Analyse besteht aus:

- einer Sensitivitätsanalyse, bei der der Einfluss verschiedener Modellparameter und Ausgangsbedingungen auf die Modellergebnisse mittels ihrer Variation analysiert wird, um die Parameter mit dem größten Einfluss auf das Endergebnis zu bestimmen und

- einer Unsicherheitsanalyse, bei der mögliche Unsicherheiten in den Modellannahmen, Parametern oder in der Modellstruktur sowie ihr Einfluss auf die Unsicherheit der Ergebnisse untersucht werden.

Die Durchführung einer Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse dient dem Zweck, die wichtigsten Eigenschaften des Modells und die Ursprünge und Auswirkungen von Modellunsicherheiten aufzudecken (HOFFMAN UND HAMMONDS, 1994; ROWE, 1994; MORGAN UND HENRION, 1990).

Ziel ist die Quantifizierung der Unsicherheiten und die Anordnung der einzelnen Parameter in einer Rangfolge gemäß ihrer jeweiligen Bedeutung. Dabei lassen sich mehrere Untersuchungsschritte unterscheiden (vgl. JANSSEN ET AL., 1994, 1992, BECK UND CHEN, 2000, KANN UND WEYANT, 2000):

- Problemformulierung, d.h. die Begründung der Notwendigkeit der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen, die Verdeutlichung der hierfür notwendigen Informationen sowie die Erläuterung der Form ihrer Darstellung.
- Quellenbestimmung, d.h. die Aussage, welche Quellen von Unsicherheiten in den Analysen untersucht werden. Dazu zählen die Modellstruktur, die Modellinputs und externen Faktoren, die Rand- und Ausgangsbedingungen und die Modellparameter.
- Quantifizierung der Quellen, d.h. die Quantifizierung der Standardwerte der Parameter und ihrer Variationen bei der Sensitivitätsanalyse einerseits, die Beschreibung der Unsicherheiten durch die Spezifizierung der probabilistischen Verteilung (z.B. durch den Mittelwert, Standardabweichungen, Minimum, Maximum, Verteilungsart) und der gegenseitigen Korrelation der Parameter bei der Unsicherheitsanalyse andererseits.
- Bewertung der Auswirkungen, d.h. zum einen die Bestimmung des Einflusses der Variationen der Parameter oder Ausgangsbedingungen bei der Sensitivitätsanalyse. Zum anderen die Analyse der Gesamteinflüsse der Unsicherheiten sowie einzelner Einflussgrößen mittels Korrelations- oder Regressionsanalysen in der Unsicherheitsanalyse. Hierdurch lässt sich ein Überblick über die Relevanz der einzelnen Parameter gewinnen.

In dieser Arbeit wurde wie folgt verfahren: Die Modellanalysen wurden für die Bereiche

Landwirtschaft, Hydrologie und Soziologie nach Themen geordnet entsprechend der oben genannten Schrittfolge durchgeführt. Für die Bewertungen der Auswirkungen wurden unterschiedliche Methoden verwendet. Einige generelle Berechnungen zur Auswertung werden nachfolgend erläutert, um Wiederholungen zu vermeiden. Zahlreiche spezielle Bewertungen werden in den einzelnen Abschnitten dargestellt. Das betrifft insbesondere Analysen bezüglich der Modellstruktur.

Bei allen Sensitivitätsanalysen wurden Standardparameter innerhalb eines als wahrscheinlich und praktikabel geltenden Rahmens variiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt sowohl in graphischer Form, insbesondere zur Erfassung der zeitlichen Änderungen, als auch in quantifizierter Form als Sensitivitätskoeffizient (PAGE, 1991). Dieser ist definiert als die relative Veränderung einer Ergebnisvariablen (Y_i) und einer Eingabevariablen (X_j). Der Sensitivitätskoeffizient ergibt sich somit als:

$$S_{ij} = \frac{dY_i}{dX_j} \cdot \frac{X_j}{Y_i}$$

6.1

Der Quotient X_j / Y_i normiert das Ergebnis. Die partiellen Ableitungen werden aufgrund der Komplexität des Modells durch finite Differenzen ersetzt. Zusätzlich wurden je nach Teilmodell weitere Verfahren der Sensitivitätsbestimmung angewendet, die in den folgenden Teilkapiteln jeweils erläutert werden.

Die Unsicherheitsanalysen wurden mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode durchgeführt. Dabei werden Zufallszahlen der Eingabeparameter entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt. Mit diesen werden die Simulationen entsprechend oft durchgeführt. Das Ergebnis soll die Verteilung der Unsicherheiten darstellen. Für die Analyse von Unsicherheiten wurde in dieser Arbeit das Programm UNC-SAM benutzt (JANSSEN ET AL., 1994, 1992).

Die Auswahl der zufälligen Parameter kann mittels der Methode des *Simple Random Sampling* oder des *Latin-Hypercube Sampling* erfolgen. Beim *Simple Random Sampling* werden Zahlen aus vorgegebener Verteilung verwandt. Das Programm UNSCAM benutzt dagegen die Methode des *Latin-Hypercube Sampling*. Diese Methode wurde entwickelt, um bei geringer Anzahl von Zufallszahlen den Zufallsraum gleichmäßiger auszufüllen. Sie benutzt Zahlen aus Intervallen des Wahrscheinlichkeitsraumes, was bei einer geringeren Anzahl von Simulationsläufen zu ausgeglichenen Verteilungen führt. Im allgemeinen reicht es, wenn die Zahl der Simulationen größer ist als $N=4/3p$, wobei p der Parameteranzahl entspricht, um zufriedenstellende Resultate zu erhalten (IMAN UND HELTON, 1988).

Es gibt viele Möglichkeiten, um die Beiträge der einzelnen Quellen zur Unsicherheit zu quantifizieren. Diese basieren meistens auf Regressions- und Korrelationsanalysen. Aus den im Programm berechneten Ergebnissen wurden Werte abgeleitet, die auf einer linearen Regressionsanalyse basieren. Um die Gültigkeit dieser Regression zu überprüfen, wurde das Bestimmungsmaß (R^2) berechnet. Ist dieses nahe Eins, so ist die lineare Regression geeignet, die Ergebnisse darzustellen. Ansonsten müssen nichtlineare Regressionsmodelle verwendet werden.

Aus dieser linearen Regression kann für jede der Unsicherheitsquellen der jeweilige Standardregressionskoeffizient (SRC) berechnet werden, der den Beitrag der Quellen zur Unsicherheit wiedergibt, wenn diese keine entscheidende Korrelation zeigen. Um auch bei korrelierenden Inputparametern den Einfluss von Unsicherheitsquellen darstellen zu können, führten JANSSEN ET AL. (1994) den „*root of uncertainty*“ ein (RTU), der in dieser Arbeit genutzt wird (zur genauen Berechnung siehe das Handbuch zum Programm UNCSAM, JANSSEN ET AL., 1992).

6.2.2 Landwirtschaft

Bei den Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen wurden die Parameter für die Beschreibung des Pflanzenwachstums und des Managements landwirtschaftlicher Flächen gleichermaßen berücksichtigt. Die Parameter lassen sich unterscheiden in solche, die der Einflussnahme durch Menschen unterliegen, und solche, die durch naturgegebene Einflüsse bestimmt sind. Bei den Analysen wurden ebenfalls die Strukturen des Modells betrachtet.

Bei der Parameteruntersuchung wurde der jeweilige Einfluss dieser Parameter auf die Simulationsergebnisse hauptsächlich von Erträgen und Produktion und die Korrelation zwischen beobachteten empirischen Daten und Simulationsergebnissen untersucht. Teilweise wurden auch Auswirkungen auf in der Modellierung weiter entfernte Variablen, wie z.B. Einkommen und Migration, betrachtet, wenn ein entsprechender Einfluss wahrscheinlich ist.

6.2.2.1 Wasserstress

Der Einfluss der Menge des Niederschlags ist für die landwirtschaftlichen Erträge in semi-ariden Gebieten entscheidend. Die Pflanzenparameter lassen sich in der Natur nur ungenau ermitteln. Unsicherheiten bei der Modellierung der Pflanzenerträge werden u.a. durch die den Wasserstress beschreibenden Wachstumsparameter verursacht.

Die Parameter, welche die Länge der vier phenologischen Perioden (I_1 , I_2 , I_3 , I_4) und die Sensitivität der Evapotranspiration der Pflanzen auf Wassermangel während dieser Perioden (kc_1 , kc_2 , kc_3) definieren (vgl. Kapitel 4.3.2), wurden innerhalb der Unsicherheitsbereiche variiert, die aus den Angaben der Literatur stammen und von der FAO zusammengefasst wurden (FAO, 1979, 1986, 1992). Die Berechnung wurde für die bezüglich der Anbaufläche oder des Produktionswertes (vgl. Abb. 3.9 und 3.10) wichtigsten Kulturpflanzen

Mais, Maniok, Bohnen und Bananen durchgeführt, um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Ertragsberechnung zu ermitteln.

Die Berechnung erfolgte mit Hilfe des Programmes UNCSAM für verschiedene Werte von sieben Parametern für Bohnen, Mais, Maniok und Bananen. Mittels *Latin-Hypercube Sampling* wurden innerhalb des Unsicherheitsbereiches Werte ermittelt. Für Bananen wurden nur die drei Werte für kc variiert. 25 Kombinationen der variierten Parameter wurden in das Modell eingegeben, um den Mittelwert der langjährigen Erträge, die Standard-Abweichung des jährlichen Ertrags über den Zeitraum 1947

bis 1995 in Ceará und die Korrelation der simulierten Ertragsdaten mit statistischen Daten (vgl. Abschnitt 5.3.1) zu ermitteln.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6.1, 6.2 und 6.3 zusammengefasst. Tabelle 6.1 enthält die statistische Auswertung der Ergebnisse. Die Tabelle zeigt die Mittelwerte, die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten der drei Outputvariablen. Die Standardabweichung kann jeweils als Maß für die absolute Unsicherheit betrachtet werden, die durch die Parameter verursacht wird. Der Variationskoeffizient gibt dagegen die relative Unsicherheit wieder.

Pflanzen	Mittelwert			Standardabweichung			Korrelation		
	μ	st_{dev}	V	μ	st_{dev}	V	μ	st_{dev}	V
Ceará / SEPA (1947-1995)									
Bananen	7305	314	0.04	1612	90	0.06	0.67	0.31	0.05
Bohnen	199	17	0.11	52	5	0.11	0.27	0.06	0.22
Maniok	5149	508	0.10	1514	165	0.11	0.48	0.02	0.04
Mais	293	42	0.15	111	16	0.12	0.55	0.08	0.31
Piauí / PAM (1975 - 1998)									
Bananen	10057	198	0.02	1168	6	0.01	0.50	0.01	0.02
Bohnen	169	16	0.11	32	3	0.13	0.23	0.07	0.31
Maniok	9341	883	0.09	1428	144	0.10	0.58	0.04	0.06
Mais	374	59	0.15	79	9	0.13	0.58	0.09	0.16

Tabelle 6.1: Unsicherheitsanalyse für den Zeitraum von 1947 bis 1995 bzw 1975 bis 1998 für Ceará und Piauí. Verglichen werden drei Variablen: der langjährige Mittelwert (in kg/ha), die Standardabweichung (in kg/ha) und die Korrelation mit statistischen Daten (SEPA bzw. PAM). Für diese Variablen wird jeweils der Mittelwert (μ), die Standardabweichung (st_{dev}) und der Variationskoeffizient (V) gezeigt.

Betrachtet man die letzteren, so ergibt sich, dass diese bei Bananen sehr klein sind; die Erträge also nicht stark beeinflusst werden. Dies liegt daran, dass Bananen zu einem großen Teil bewässert angebaut werden, weswegen die wasserknappheitsverursachenden Parameter hier weniger relevant sind. Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die drei anderen Kulturpflanzen haben relativ gesehen den gleichen Unsicherheitsbereich (ca. 0.11). Abso-

lut sind diese bei Maniok aufgrund der größeren Erträge höher. Der Korrelationskoeffizient hingegen wird bei Bohnen und Mais stärker beeinflusst (0.16 bis 0.31) und weist somit eine große Unsicherheit auf. Der Vergleich der Kulturpflanzen nach Bundesstaat ergibt keine nennenswerten Unterschiede.

Die simulierten Variablen (Mittelwert, Standardabweichung und Korrelation) lassen sich für alle Kulturpflanzen durch lineare Abhängig-

keiten der sieben (bzw. drei) Parameter darstellen, da der entsprechende Koeffizient R^2 zwischen 0.95 und 0.98 liegt (Tabelle 6.2). Somit ist eine Bestimmung der Wichtigkeit der einzelnen Parameter mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse möglich.

Tabelle 6.2 gibt Aufschluss darüber, welche Parameter die Modellergebnisse am stärksten beeinflussen. Die Unsicherheiten werden durch den *root of uncertainty* (RTU, vgl. Kapitel 6.2.1) dargestellt. Es zeigt sich, dass die kc-Werte durchgängig wichtiger sind als die I-Werte. Die

kc-Werte bewegen sich in einer Größenordnung von 0.4 bis 0.9, wogegen die I-Werte in einer Größenordnung von 0.1 bis 0.3 liegen. Der Parameter mit dem größten Einfluss ist kc2, d.h. der kc-Wert am Ende der zweiten und während der dritten Wachstumsperiode. Diese Periode ist zumeist die längste, weswegen der große Einfluss nicht verwunderlich ist. Der Parameter mit dem geringsten Einfluss ist I2. Im Vergleich der I-Werte ist die Länge der ersten Wachstumsperiode (I1) am wichtigsten.

	Mittelwert Ceará 1947-1995				Mittelwert Piauí 1975-1998			
	Bananen	Bohnen	Maniok	Mais	Bananen	Bohnen	Maniok	Mais
R²	0.97	0.96	0.95	0.95	0.98	0.96	0.99	0.95
kc1	0.89 (1)	0.48 (2)	0.59 (2)	0.57 (2)	95 (1)	0.45 (2)	0.55 (2)	0.75 (1)
kc2	0.41 (2)	0.89 (1)	0.77 (1)	0.80 (1)	19 (3)	0.91 (1)	0.84 (1)	0.64 (2)
kc3	0.33 (3)	0.43 (3)	0.43 (3)	0.40 (3)	36 (2)	0.44 (3)	0.45 (3)	0.42 (3)
I1	-	0.34 (4)	0.38 (4)	0.33 (4)	-	0.31 (4)	0.30 (4)	0.29 (4)
I2	-	0.14 (7)	0.14 (7)	0.09 (7)	-	0.16 (7)	0.16 (7)	0.17 (7)
I3	-	0.19 (6)	0.20 (6)	0.19 (6)	-	0.20 (6)	0.21 (6)	0.22 (6)
I4	-	0.22 (5)	0.23 (5)	0.25 (5)	-	0.22 (5)	0.23 (5)	0.24 (5)

Tabelle 6.2: Beiträge der Parameter zur Unsicherheit in den mittleren Pflanzenenerträgen für Ceará und Piauí. R^2 zeigt die Korrelation einer linearen Regression der Ergebnisse. Es werden die Rangfolge der Quellen der Unsicherheiten (in Klammern) und ihr relativer Beitrag zur gesamten Unsicherheit gezeigt. Als Maß dient hierfür der RTU (zur Definition siehe Kapitel 6.2.1).

Tabelle 6.3 zeigt den Einfluss der Parameter auf die Standardabweichung und die Korrelation mit empirischen Daten für Piauí. Bei der Standardabweichung erweisen sich wiederum die kc-Werte insgesamt als wichtiger als die I-Werte. Fast durchgängig liegen die kc-Werte in der Größenordnung von 0.4 bis 0.9. Die I-Werte bewegen sich in der Größenordnung von 0.2 bis 0.4. Kc2 ist auch wieder der Parameter mit dem größten Einfluss, wogegen I4 der Parameter mit dem geringsten Einfluss ist.

Bei der Korrelation mit den empirischen Daten ist diese Rangfolge dagegen nicht feststellbar. Hier sind die Parameter mit dem größten Einfluss I3 und I2. Der Parameter kc3 hat da-

gegen den geringsten Einfluss. Die I-Werte sind aber nicht durchgängig wichtiger als die kc-Werte, da der Parameter I4 nur von geringer Wichtigkeit ist.

Da der gesamte Einfluss der Parameter auf die Korrelation wesentlich größer ist als auf Mittelwert und Standardabweichung (vgl. Tabelle 6.1), kann man die Länge der Wachstumsperiode als wichtiger einstufen.

6.2.2.2 Aussaattermin

Für die Aussaat bzw. Pflanzung der jeweiligen Kulturpflanzen wurden drei verschiedene Termine pro Kulturpflanze und Agrarregion errechnet. Diese repräsentieren die drei unter-

	Standardabweichung Piauí 1975-1995				Korrelation Piauí 1975-1998			
	Bananen	Bohnen	Maniok	Mais	Bananen	Bohnen	Maniok	Mais
R²	0.98	0.98	0.91	0.95	0.70	0.97	0.97	0.97
kc1	0.95 (1)	0.25 (3)	0.48 (2)	0.60 (2)	0.71 (1)	0.32 (3)	0.18 (6)	0.18 (4)
kc2	0.19 (3)	0.99 (1)	0.82 (1)	0.65 (1)	0.17 (3)	0.24 (4)	0.18 (4)	0.18 (5)
kc3	0.36 (2)	0.46 (3)	0.42 (3)	0.38 (4)	0.52 (2)	0.11 (6)	0.01 (7)	0.06 (7)
I1	-	0.22 (5)	0.26 (5)	0.19 (7)	-	0.07 (7)	0.31 (3)	0.35 (3)
I2	-	0.22 (6)	0.26 (6)	0.47 (3)	-	0.61 (2)	0.66 (2)	0.82 (1)
I3	-	0.24 (4)	0.39 (4)	0.34 (5)	-	0.89 (1)	0.87 (1)	0.67 (2)
I4	-	0.20 (7)	0.22 (7)	0.21 (6)	-	0.17 (5)	0.18 (5)	0.12 (7)

Tabelle 6.3: Beiträge der Parameter zur Unsicherheit in der Standardabweichung der jährlichen Pflanzenerträge und zur Korrelation mit empirischen Daten (PAM) für Piauí. R² zeigt die Korrelation einer linearen Regression der Ergebnisse. Es werden die Rangfolge der Quellen der Unsicherheiten (in Klammern) und ihr relativer Beitrag zur gesamten Unsicherheit gezeigt. Als Maß dient hierfür der RTU (zur Definition siehe Kapitel 6.2.1)

schiedlichen Gruppen von Landwirten, die in Kapitel 4.4.1 beschrieben wurden. Der Parameter *seeding-date*, der nach Agrarregion und Pflanze differenziert ist, diente als Ausgangspunkt für diese Berechnung. Die spezifischen Auswirkungen auf die Erträge der Kulturpflanzen, die aus der Variation dieses Parameters resultieren, sind in Abbildung 6.1 wiedergegeben.

Verglichen mit den Erträgen beim Standardwert für den Parameter ergeben sich negative Auswirkungen auf die Erträge ab einem um einen Monat vorgezogenen Aussaattermin. Bei einem späteren Aussaattermin werden negative Auswirkungen erst bei höheren Werten sichtbar. Diese treten erst ab einer Verschiebung um zwei Monate auf.

Bei nicht bewässert angebauten Pflanzen (Bohnen) sind die Änderungen in den Erträgen im Fall eines späteren Aussaattermins signifikanter als bei den bewässert angebauten Pflanzen (Tomaten und Kokosnüsse), die aber auch davon betroffen sind. Einjährige Pflanzen mit kurzen Wachstumszeiten (Bohnen) sind von einem späteren Aussaattermin oft weniger betroffen als Pflanzen mit längeren Wachstumszeiten (Reis), da auch bei einem späteren

Aussaattermin noch ausreichend Wasser für ihre Bewässerung zur Verfügung steht, wenn die gesamte Wachstumsperiode klein ist.

Der unsichere Bereich dieses Parameters beträgt nur ± 1 Monat, so dass die resultierende Unsicherheit in den Ergebnissen vergleichsweise klein ist.

In Tabelle 6.4 sind die Sensitivitätskoeffizienten für die Änderung der Aussaattermine dargestellt. Dabei zeigen sich für die meisten der untersuchten Kulturpflanzen geringe Werte. Nur für Mango und Zuckerrohr ist eine größere Sensitivität auf die Änderung der Aussaattermine feststellbar. Keine bzw. sehr niedrige Sensitivitätswerte bestehen für Bananen, Tomaten und Maniok. Ebenso weisen die unbewässert angebauten Pflanzen Bohnen, Mais und Maniok zumeist höhere Sensitivitätswerte auf als die vorwiegend bewässert angebauten Pflanzen.

Die Auswirkungen auf die in der Wirkungskette weiter entfernten Variablen sind gering, aber sichtbar. Sie betragen rund 1/10 der Sensitivitätskoeffizienten der Erträge und sind am höchsten im Fall der Variable Agrar-BIP, die durch Änderungen in den Erträgen, vor allem der Erträge der bewässerten Pflanzen, beein-

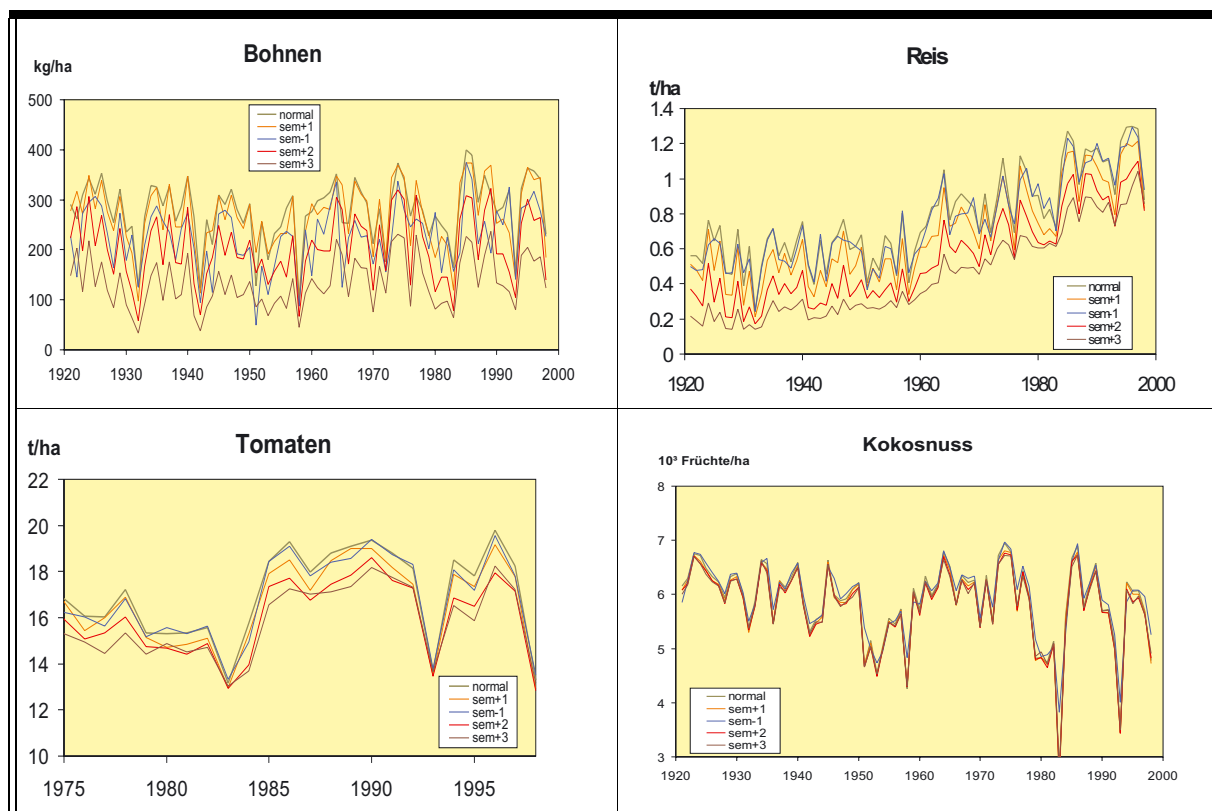


Abb. 6.1 Auswirkungen der Variation des Termins zur Pflanzensaat auf die Erträge von Bohnen, Reis, Tomaten und Kokosnuss, gemittelt über Bundesstaaten

Pflanzen	see_da +1	see_da -1	see_da +2	see_da +3
Bananen	0.02	0.02	0.01	0.01
Baumwolle	0.96	0.95	0.48	0.32
Bohnen	0.98	0.98	0.49	0.33
Cashew	0.98	0.98	0.49	0.33
Kokosnuss	0.48	0.47	0.24	0.16
Mais	0.96	0.97	0.48	0.32
Mango	4.75	4.86	2.38	1.58
Maniok	0.12	0.29	0.06	0.04
Melonen	0.51	0.54	0.25	0.17
Reis	0.93	0.92	0.47	0.31
Tomate	0.19	0.16	0.09	0.06
Zuckerrohr	2.97	2.97	1.49	0.98
Migration	0.02	0.02	0.01	0.01
Agrar-BIP	0.07	0.06	0.04	0.04
BIP gesamt	0.01	0.01	0.00	0.00

Tabelle 6.4: Sensitivitätskoeffizienten bezüglich der Variation des Parameters 'seeding-date' auf die Pflanzenerträge.

flusst wird. Diese Änderungen haben wiederum Auswirkungen auf das gesamte BIP sowie die Rate der Migration.

6.2.2.3 Bodenreduktionsfaktoren

Der Einfluss des Bodens auf die Erträge wird durch die Bodenparameter bestimmt. Zusätzlich ergibt sich ein, allerdings geringerer, Einfluss über die aktuelle Evapotranspiration. Vernachlässigt man den ertragsreduzierenden Einfluss, den negative Bodeneigenschaften wie z.B. Nährstoffarmut haben (Bodenreduktionsfaktor mit Wertebereich zwischen 0 und 1 wurde 1 gesetzt), erhöhen sich die Erträge. Ebenfalls entscheidend ändert sich die räumliche Verteilung der Erträge, wobei die die aktuelle Evapotranspiration beeinflussenden Bodeneigenschaften aber erhalten bleiben (Abb. 6.2).

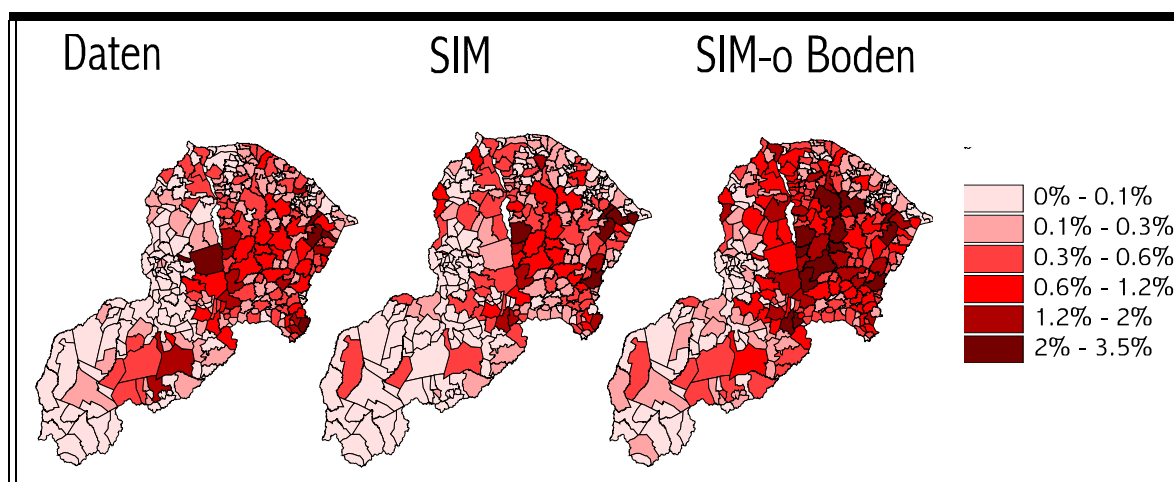


Abb. 6.2 Auswirkungen der Vernachlässigung von Bodenreduktionsfaktoren auf die Erträge von Bohnen. Dargestellt sind prozentuale Änderungen von Modellläufen mit und ohne Bodenparameter, die mit erhobenen empirischen Daten (IBGE, 1996B) verglichen werden.

1975-1998	Ertrag		Ertrag ohne Bodenparameter	
	Piauí	Ceará	Piauí	Ceará
Bananen	0.20	0.46	0.18	-0.01
Baumwolle	0.15	-0.21	0.04	-0.2
Bohnen	0.04	0.31	-0.15	0.06
Cashew	0.35	0.32	0.35	-0.03
Kokosnuss	-0.15	0.47	-0.16	0.48
Mais	-0.19	0.18	-0.24	0.31
Mango	-0.18	-0.03	-0.19	-0.05
Maniok	-0.33	0.43	-0.48	0.42
Melonen	0.37	0.14	0.24	-0.24
Reis	0.49	0.78	0.26	0.14
Tomate	0.50	-0.19	0.46	-0.23
Zuckerrohr	-0.27	-0.12	-0.4	0.48

Tabelle 6.5: Räumliche Korrelation auf der Ebene der Munizipien der simulierten Erträge, Läufe mit und ohne Bodenparameter im Vergleich.

Wie Tabelle 6.5 zeigt, sinkt beim Vergleich von Modell und Daten für die meisten Kulturpflanzen die räumliche Korrelation. Dies gilt insbesondere für Bohnen und Reis. Diese Abnahme der Korrelation spricht für die Qualität der Parameter und des Modellansatzes. Für Ceará sind größere Unterschiede im Ertrag der

meisten Kulturpflanzen feststellbar als in Piauí. Dies lässt sich auf die detailliertere Bodendatenbank in Ceará zurückführen.

6.2.2.4 Bewässerung

Wie im Abschnitt 5.2 erläutert sind die Daten zu den Bewässerungsflächen ungenau. Somit ist die Einschätzung ihres Einflusses auf die Modellergebnisse besonders wichtig. Hierfür wurden:

- (1) Variationen der Parameter,
- (2) der jeweilige Einfluss der bewässerten und unbewässerten Flächen auf den Gesamtertrag und
- (3) der Einfluss der Berechnung der tatsächlich bewässerten Fläche untersucht.

(1) Im Modell werden die potentiell bewässerten Flächen in den historischen Simulationen für die einzelnen Pflanzen ausgehend von den Werten des Jahres 1996 um den Parameterwert *bw* zurückskaliert. Dieser hat je nach Pflanze einen Wert zwischen 0.94 und 1.00. Dies entspricht einem jährlichem Wachstum der potentiell zur Bewässerung zur Verfügung stehenden Fläche zwischen 0 und 6%. Für die Simulationen zukünftiger Entwicklungen geht der entsprechende Parameter als Szenario-In-

put definiert ein. Eine **Variation dieses Parameters (bw)** um jeweils ± 3 führt zu den jährlichen Änderungen in der Größe der potentiellen Bewässerungsflächen.

Eine solche Änderung hat erhebliche Auswirkungen auf die Korrelation und den mittleren Ertrag. Je nachdem, ob die unbewässerte Fläche schneller oder langsamer wächst als die bewässerte Fläche, ergibt sich ein positiver oder negativer Trend bei den Erträgen. Bei der Produktion fallen die Auswirkungen der Parameteränderung desto größer aus, je größer der Ausgangswert für die bewässerte Fläche ist.

Auffällig ist, dass sich die Erhöhung des Parameters nicht bedeutsam auf die Erträge der überwiegend bewässert angebauten Pflanzen Banane und Mango auswirkt, wohl aber auf die Produktion, wo die gesamte bewässerte Anbaufläche von Bananen und Mango auf unrealistisch hohe Werte rückskaliert wird (vgl. Abbildung 6.3). Die Verkleinerung des Parameters beeinflusst dagegen stark die Ergebnisse zu den Erträgen, nicht aber die Ergebnisse zu der Produktion von Bananen und Mango (vgl. Abb. 6.3).

Bei Mais und Tomaten (bis 1971) sind keine größeren Auswirkungen aufgrund der Parameteränderungen feststellbar; eine Ausnahme bilden die Erträge von Mais bei einer Erhöhung des Parameters. Ab dem Jahr 1971 kommt es bei Tomaten zu größeren Abweichungen sowohl bei einer Erhöhung als auch Verkleinerung des Parameters, was mit der starken Erhöhung der bewässerten Anbauflächen von Tomaten zu erklären ist. Im Vergleich der einzelnen Pflanzen sind für Mais die stärksten interannuellen Schwankungen bei Erträgen und Produktion festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Mais vorwiegend unbewässert angebaut wird und deshalb stärker auf Variationen des Klimas reagiert, während die anderen drei Pflanzen robuster sind. Die Sensitivitätskoeffizienten sind in Tabelle 6.6 dargestellt.

Weiterhin wurden mögliche Auswirkungen auf das jährliche BIP des Agrarsektors und das gesamtwirtschaftliche BIP untersucht (vgl. Tabelle 6.6). Die entsprechenden Sensitivitätskoeffizienten fallen insgesamt geringer aus als die Sensitivitätskoeffizienten der meisten Kulturpflanzen. Dennoch ergeben sich durch eine Erhöhung des Parameters Auswirkungen auf das Agrar-BIP beider Staaten; die Koeffizienten betragen hier 1.07 und 0.97. Eine Verringerung zeigt nur in Piauí relevante Auswirkungen auf das Agrar-BIP (0.76), nicht aber in Ceará (0.16). Das Gesamt-BIP beider Staaten wird nur gering beeinflusst; die Koeffizienten einer Erhöhung bzw. Verringerung belaufen sich auf 0.01 bzw. 0.10 (Ceará) und 0.10 bzw. 0.30 (Piauí). Allgemein sind mit einer Erhöhung des Parameters größere Auswirkungen verbunden als mit einer Verringerung (vgl. Tabelle 6.6).

Außerdem wurden die Auswirkungen der Parametervariation auf Migrationsprozesse aus dem Sertão-Gebiet analysiert. Hier zeigt sich eine ähnliche Größenordnung. Die Werte liegen zwischen 1 und 0.1, was rund einem Zehntel bis Hundertstel des Ertrages der verschiedenen Kulturpflanzen entspricht. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass eine starke Kopplung vorliegt.

(2) In Abbildung 6.4 wird der Einfluss der bewässerten und unbewässerten Anbauflächen auf den Gesamtertrag von Bananen, Reis, Mais und Tomaten dargestellt. Die Erträge der bewässerten Flächen sind bei allen Pflanzen am größten, die der unbewässerten Flächen dagegen am kleinsten. Bei Mais und Reis ist der Einfluss der bewässerten Flächen auf den Gesamtertrag trotz der hohen Erträge gering. Dieser wird maßgeblich durch die Erträge der unbewässerten Flächen bestimmt. Allerdings ist bei Reis eine hohe Bedeutung der bewässerten Flächen für die Produktion festzustellen.

Bei Tomaten sind die Erträge der Bewässerungsflächen zunächst ohne nennenswerten, ab 1971 aber von bedeutsamen Einfluss für

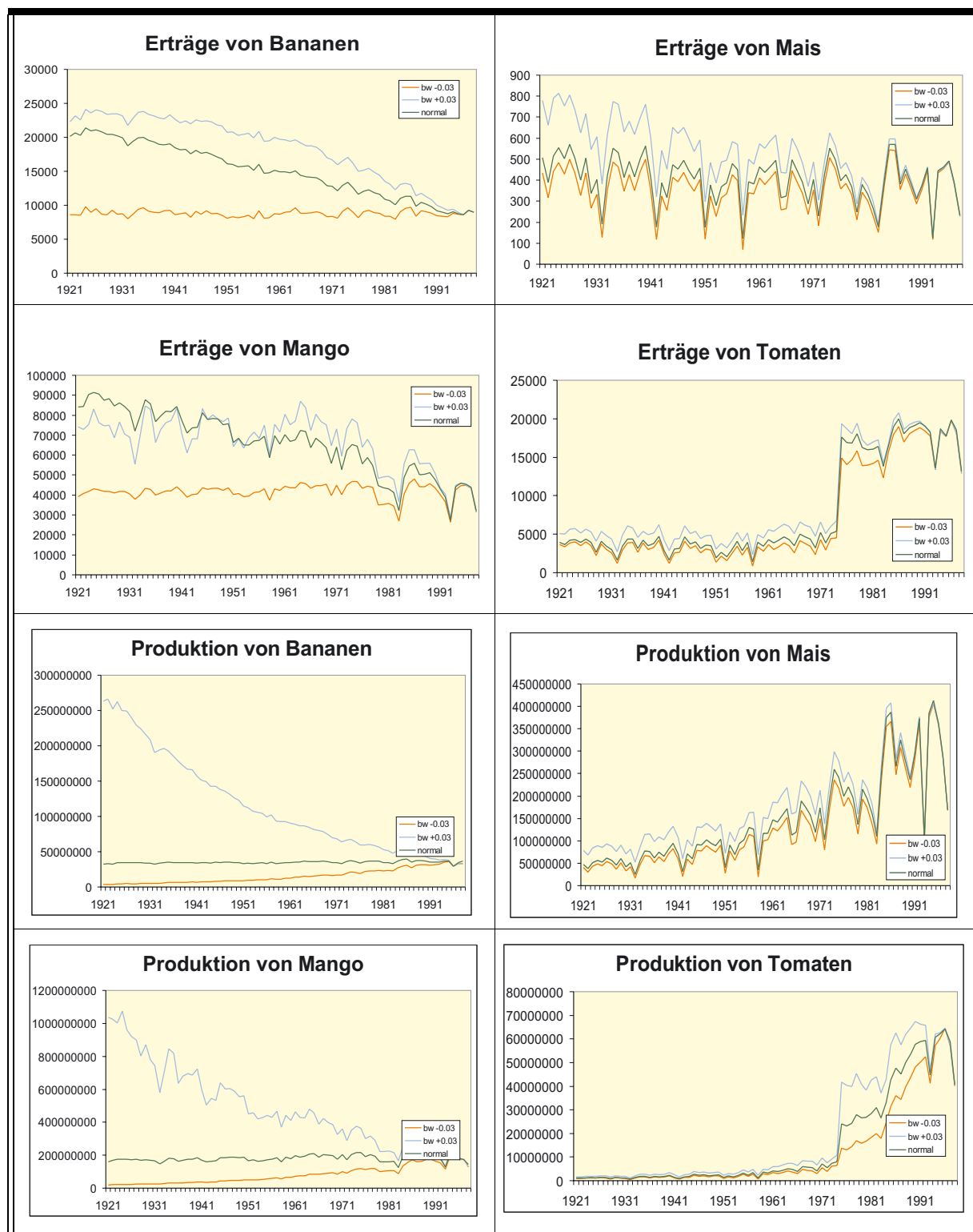


Abb. 6.3 Auswirkungen der Variation des Parameters bw um ± 3 im Vergleich zu einem Standardwert (normal), der die Entwicklung der Größe der bewässerten Flächen pro Pflanze beschreibt, am Beispiel der Erträge und Produktion von Bananen, Mais, Tomaten (alle in kg bzw. kg/ha) und Mango (Stück bzw. Stück/ha).

	-0.03		0.03		-0.03		0.03	
	Mittelwert	R	Mittelwert	R	Mittelwert	R	Mittelwert	R
	Piauí				Ceará			
Bananen	23.7	4.9	0.4	4.9	16.50	4.62	5.85	4.58
Baumwolle	0	0	0	0	6.78	1.07	10.49	1.48
Bohnen	1.24	1.12	1.88	1.61	1.93	1.44	2.10	1.86
Cashew	1.11	31.66	1.89	32.04	15.04	29.63	27.45	34.89
Kokosnuss	1.58	6.28	40.58	7.69	53.85	5.49	32.84	6.28
Mais	0.17	0.26	0.29	0.40	1.49	1.64	2.11	2.18
Mango	5.24	4.08	0.28	3.58	37.23	4.04	10.76	3.31
Maniok	0	0	0	0	0	0	0	0
Melonen	1.05	1.61	1.23	1.97	0.82	1.78	0.93	2.00
Reis	1.35	2.51	31.08	4.48	13.03	4.49	31.08	4.48
Tomate	0.19	2.25	0.21	2.65	89.26	1.87	23.78	1.20
Zuckerrohr	3.34	0.16	21.79	0.23	3.52	0.08	10.07	0.11
Migration	0.3		0.90		0.02		0.98	
Agrar-BIP	0.76		0.99		0.16		1.07	
BIP gesamt	0.10		0.30		0.01		0.10	

Tabelle 6.6: Sensitivitätskoeffizienten bezüglich des Parameters *bw*. Auswirkung der Änderungen des Parameters auf Mittelwert und Korrelationskoeffizient der Erträge bzw. Mittelwert des Agrar-BIP, Gesamt-BIP und Migration aus dem Sertão.

den Gesamtertrag, was mit dem schon erwähnten Anstieg der Bewässerungsflächen zusammenhängt.

Bei Bananen ist der Einfluss der bewässerten Flächen auf den Gesamtertrag dagegen rückläufig. Dieser Befund induziert zugleich einen erhöhten Einfluss der unbewässerten Flächen. Hinsichtlich des Einflusses auf die Produktion von Bananen kommt den bewässerten Flächen gegenüber den unbewässerten Flächen aber eine deutlich hervorgehobene Rolle zu.

(3) Berechnung der **tatsächlich** in dem Jahr **bewässerten Flächen**

Die Fläche, die zur Bewässerung zur Verfügung steht, wird nur in dem Umfang genutzt, wie es die aktuelle Situation bezüglich des gespeicherten Wassers zulässt. Halbjährlich wird überprüft, wieviel gespeichertes Wasser vorhanden ist und daraus die tatsächlich bewässerte Fläche errechnet (vgl. Kapitel 4.4.1).

Dafür muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass mit einer 90prozentigen Garantie das zur Bewässerung notwendige Wasser in den größeren Stauseen vorhanden ist. Es zeigt sich, dass dadurch durchschnittlich in 114 Municipien mindestens in einer der beiden Jahreshälften nicht die gesamte Bewässerungsfläche benutzt wird. Während dies in der ersten Hälfte des Jahres (Regenzeit) nur für 50 Municipien zutrifft, gilt dies in der zweiten Hälfte (Trockenzeit) schon für 102 und damit fast die Hälfte aller Municipien.

Vernachlässigt man diesen Einfluss, d.h. ohne die Garantie des zur Bewässerung notwendigen gespeicherten Wassers zu berücksichtigen, zeigen sich für die überwiegende Mehrheit der simulierten Kulturpflanzen nur geringfügige Änderungen der durchschnittlichen Erträge über den Zeitraum 1960-1980 (Tabelle 6.7). Größere Abweichungen sind vorrangig für Pflanzen mit einem hohen Bewässe-

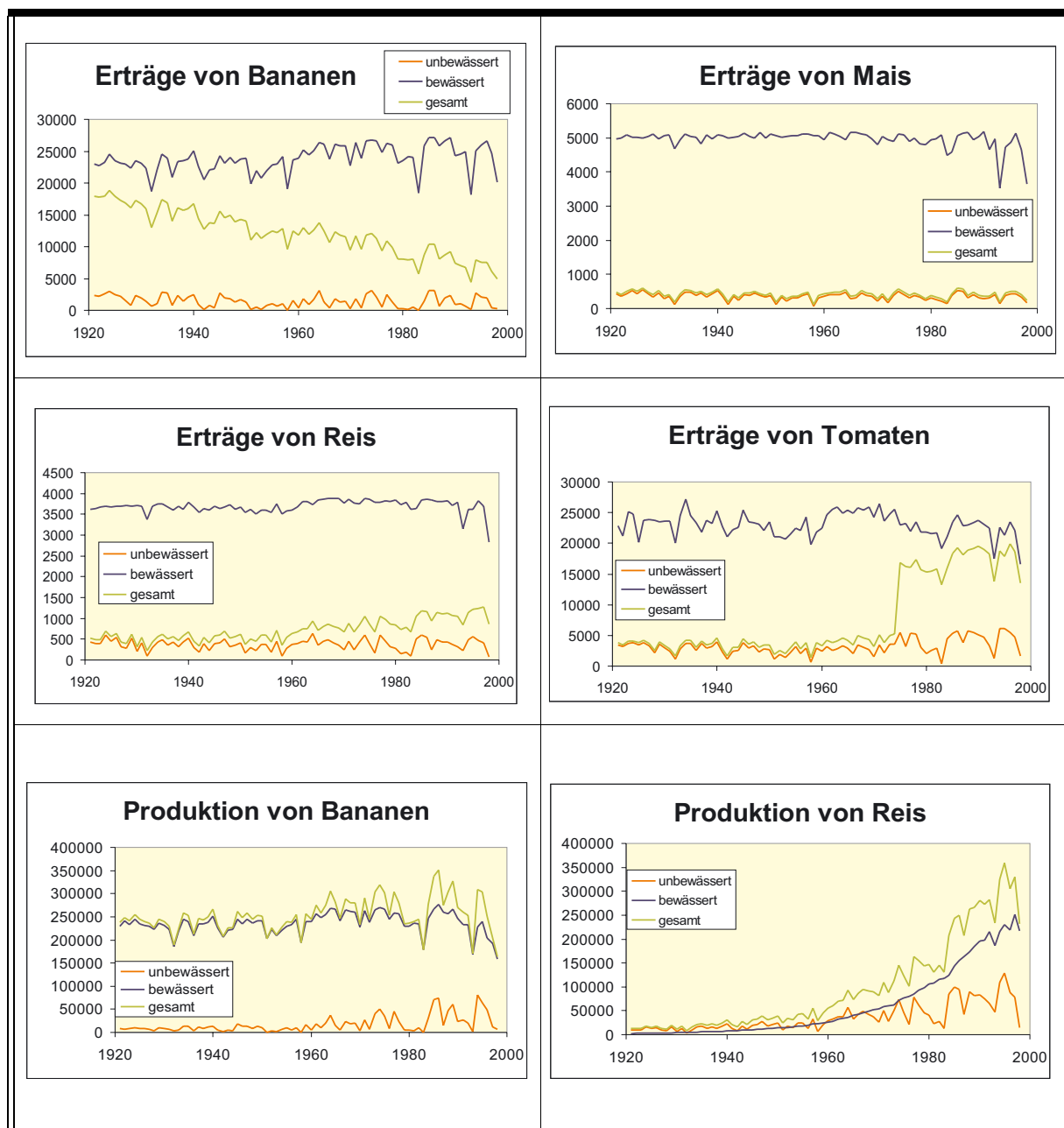


Abb. 6.4 Vergleich der bewässerten und unbewässerten Erträge und Einfluss auf den Gesamtertrag und die Produktion am Beispiel von Bananen, Mais, Tomaten und Reis (alle in kg bzw. kg/ha).

rungsanteil festzustellen. Dies betrifft Bananen (-9.3%) und Tomaten (-10.6%).

Der Quotient q_{irr} bezeichnet den Grad der Erfüllung des Bewässerungswasserbedarfs während der Trockenzeit. Abb. 6.5 zeigt die prozentualen Änderungen von q_{irr} , gemittelt über den Zeitraum der Jahre 1960-1980. Dabei zeigt sich nicht, dass in einzelnen Regionen dieser Bedarf überhaupt nicht erfüllt wird, es also zu einer schwerpunktmäßigen geographi-

schen Konzentration von Problemgebieten kommt. Es zeigt sich eine ausgewogene Verteilung. Der größte Teil der Änderungen bewegt sich in einer Gesamtgrößenordnung von 0-10%, wobei viele Änderungen 0 betragen.

Dass für viele Munizipien die Differenz Null ist (d.h. dass beide Quotienten Eins sind), ist auf zwei mögliche Ursachen zurückzuführen: Erstens können die potentiellen Bewässerungsflächen vor der vorgenommenen Ände-

Pflanzen	Änderung der Erträge
Bananen	-9.3
Baumwolle	-0.1
Bohnen	-2.2
Cashew	-3.5
Kokosnuss	-0.1
Mais	-2.0
Mango	-2.6
Melonen	-2.5
Reis	-2.6
Tomate	-10.6
Zuckerrohr	-0.4

Tabelle 6.7: Änderung der jährlichen bewässerten Erträge von Kulturpflanzen über den Zeitraum 1960-1980 [%] durch Nutzung der gesamten potentiellen Bewässerungsfläche

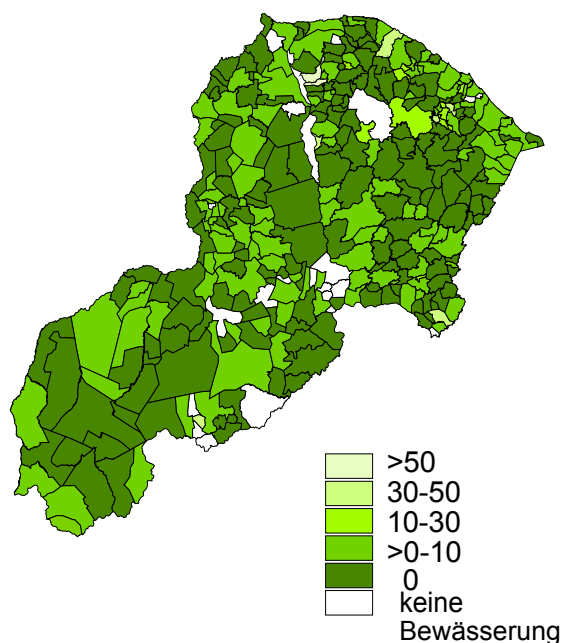


Abb. 6.5 Der Indikator q_{irr} gibt an, inwieweit der Bewässerungsbedarf während der Trockenzeit erfüllt wird. Gezeigt werden Änderungen [%] zwischen Modelllauf mit und einem Modelllauf ohne Reduzierung der potentiellen auf die aktuelle Bewässerungsfläche. Mittelwerte über die Jahre 1960-1980.

rung des Modells vollständig bewässert worden sein. Zweitens können diese Flächen nicht vollständig vorher bewässert worden sein, das verfügbare Wasser kann nach Änderung des

Modells aber vollständig ausreichen, was auf eine ineffiziente Planung zurückzuführen ist. In diesen Munizipien ist es sinnvoll, die potentielle Bewässerungsfläche zum Zweck der Ertragssteigerung auszudehnen, weil Bewässerungswasser noch ausreichend vorhanden ist.

In einigen Munizipien sind die Änderungen >10% und belaufen sich in wenigen Fällen auf bis zu 95% (vgl. Abb. 6.5). In diesen Fällen fand die Bewässerung erst nach der Änderung des Modells statt; das verfügbare Wasser reichte aber nicht zur vollständigen Bewässerung aller potentiellen Flächen aus. In der Modellierung wurde deshalb auf die Bewässerung einzelner Flächen bewußt verzichtet, was als ein der Situation angemessenes Vorgehen zu bezeichnen ist. In vielen Fällen ändert sich trotz einer Erhöhung der Bewässerungsfläche der Quotient nur um wenige Prozent. In diesen Fällen erscheint eine Ausdehnung auf die maximal verfügbare Fläche sinnvoll.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Verhältnis zwischen bewässerten und unbewässerten Erträgen sehr stark den Gesamtertrag bestimmt. Diese sollten daher in Anwendungen möglichst getrennt betrachtet werden. Der Parameter bw , der die Rückskalierung der Bewässerungsfläche bestimmt, hat einen grossen Einfluss auf die Erträge und Produktion, weniger wichtig ist er für entferntere Variablen, wie z.B. das Agrar-BIP. Die Berechnung der tatsächlich bewässerten Flächen ist dagegen von geringerer Bedeutung für den durchschnittlichen Ertrag auf Bundesebene und zeigt sich nur für einzelne Munizipien.

6.2.2.5 Räumliche Einflüsse auf die Erträge

Folgende Faktoren haben einen räumlichen Einfluss auf die Erträge (vgl. Abb. 6.6):

- (1) die Variabilität des Klimas,
- (2) die Bodeneigenschaften, die über die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration in WASA einwirken,
- (3) das jeweilige Management der Flächen und
- (4) die Bodenreduktionsfaktoren

Um den Einfluss der einzelnen Faktoren abschätzen zu können, wurden mehrere Modellläufe durchgeführt. Im ersten Modelllauf wurde nur die Variabilität des Klimas berücksichtigt, die anderen drei Faktoren aber konstant gehalten. Bei den Bodeneigenschaften erfolgte die Konstanthaltung durch die Auswahl eines Standardbodens für das gesamte Gebiet, mit dem gerechnet wurde.

Bei der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung wurde von den fünf Typen der Bewirtschaftungsmethoden, die im Untersuchungsgebiet unterschieden werden (vgl. Kapitel 4.3.3), ein Managementtyp als Standardtyp ausgewählt. Gewählt wurde eine unbewässerte Anbaumethode, um den Einfluss der Klimavariabilität verdeutlichen zu können. Die Bodenreduktionsfaktoren wurden gleich Eins gesetzt (vgl. Kapitel 4.4.1).

In den darauf folgenden Modellläufen wurden nach und nach dann die anderen Faktoren mit einbezogen, um die jeweiligen Auswirkungen zu analysieren. Zur Abschätzung der Einflüsse wurden die Änderungen der räumlichen Korrelation mit den PAM-Daten verglichen. Die Ergebnisse der Modellläufe sind in Abb. 6.7 dargestellt.

Im Vergleich der Ergebnisse der Modellläufe zeigt sich, dass für die überwiegende Zahl der Pflanzen die Korrelation für Ceará zunimmt und für Piauí abnimmt (Abb. 6.7). Die Daten für Ceará werden vom Modell besser wiedergegeben, wenn alle Faktoren berücksichtigt werden.

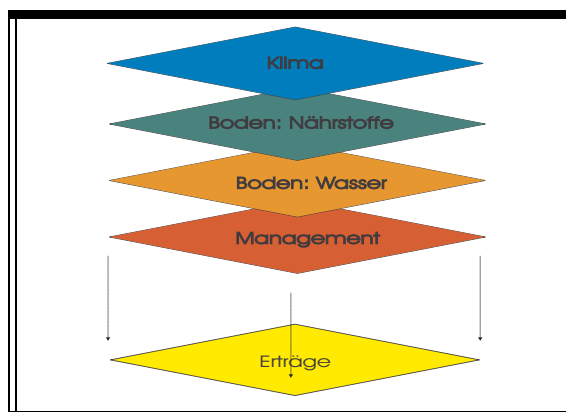


Abb. 6.6 Räumliche Einflüsse auf die Erträge

Für Piauí fällt die Übereinstimmung mit den Daten dagegen größer aus, wenn nur das Klima betrachtet und die anderen Faktoren konstant gehalten werden. Vorwiegend gilt das für die unbewässert angebauten Pflanzen Bohnen, Mais und Maniok. Die schlechte Qualität der Bodendaten für Piauí kann hierfür eine mögliche Ursache sein.

Die Berücksichtigung der hydrologischen Bodeneigenschaften im Modelllauf verbleibt ohne nennenswerten Einfluss in Ceará. Dagegen hat dieser Faktor stärkeren Einfluss in Piauí, wo es zu größeren Änderungen der Korrelation kommt. Ein Grund hierfür ist, dass der im ersten Modelllauf benutzte Standardboden häufig in Ceará vorkommt. Dennoch ist es ein interessantes Ergebnis, dass eine Differenzierung der Böden wenig Auswirkungen auf die Korrelationsergebnisse zeigt.

Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu den Auswirkungen des Faktors Bodenreduktionsfaktoren, die auf demselben räumlichen Muster der Böden beruhen. Wird dieser Faktor in den Modelllauf mit einbezogen, ergeben sich erhebliche Veränderungen in der Korrelation. Offensichtlich ist die Verteilung der aktuellen Evapotranspiration weniger unterschiedlich als die der Bodenreduktionsfaktoren.

Es ist unwahrscheinlich, diese Ergebnisse auf den Umstand zurückzuführen, dass der aktuellen Evapotranspiration im Modell weniger Einfluss beigemessen wird als den Bodenre-

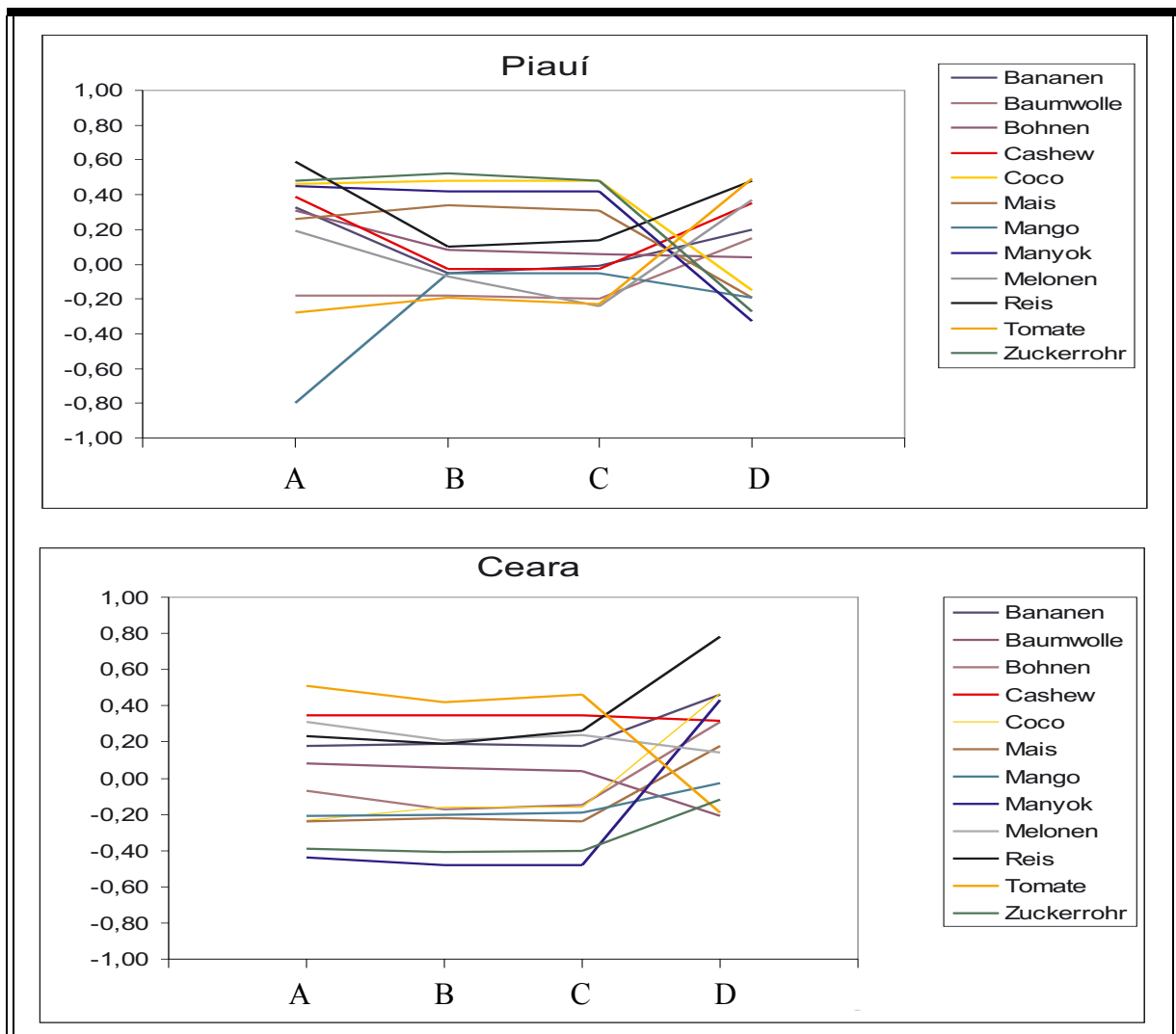


Abb. 6.7 Räumliche Korrelationskoeffizienten. Die Berechnung erfolgte entsprechend der Beschreibung in Kapitel 5.3.1.2. Vier Modellläufe, bei denen jeweils unterschiedliche Faktoren (1-4), die die Erträge räumlich beeinflussen, mit einbezogen worden. A-nur (1), B-(1) und (2), C-(1), (2) und (3), D-(1), (2), (3) und (4). Zur Definition der Faktoren siehe Kapitel 6.2.2.5.

duktionsfaktoren. Hiergegen spricht, dass für beide Bundesstaaten trotz gleicher Berechnungsvorgänge unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Die Korrelationsergebnisse ändern sich für beide Bundesstaaten auch nur gering durch den Einbezug des Faktors Bewirtschaftung der Flächen.

6.2.3 Hydrologie

6.2.3.1 Kopplung Wassernutzung und Wasserverfügbarkeit

Das Modell zur Wassernutzung (WASA) muss mit dem Modell zur Wasserverfügbarkeit (NoWUM) gekoppelt werden, wofür ein Teilmodul entwickelt wurde. Durch die Kopplung wird zum einen die tatsächliche Menge des entnommenen Wassers in Abhängigkeit von dem vorhandenen Wasser bestimmt. Zum anderen

lässt sich aus der Kopplung der Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Wassernutzung ablesen.

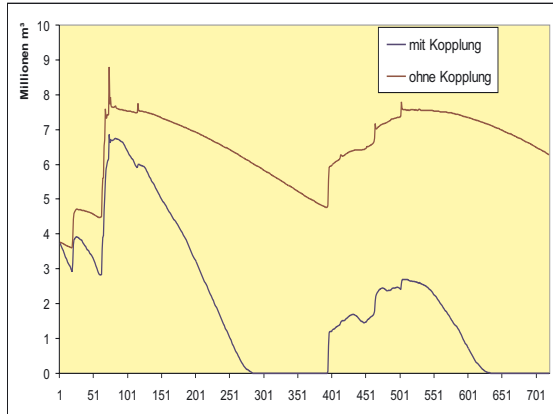


Abb. 6.8 Unterschiede zwischen der gekoppelten und ungekoppelten Version für die Simulation der gespeicherten Volumina der Stauseen eines Beispielmunizips (Iguatú). Tageswerte für die Jahre 1971/72

Abb. 6.8 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse der gekoppelten und ungekoppelten Modellversion für das gespeicherte Volumen aller kleinen Stauseen (Speicherkapazität $<50 \times 10^6 \text{ km}^3$) in einem Beispielmunizip (Iguatú). Bei beiden Simulationsläufen hatte das Füllungsvolumen der Stauseen den gleichen Ausgangswert (vgl. Abb. 6.8).

In der gekoppelten Version zeigt sich eine wesentlich stärkere Abnahme des gespeicherten Wassers als in der ungekoppelten Version, insbesondere in der trockenen Jahreszeit. Dieses Ergebnis verdeutlicht die Notwendigkeit, WASA und NoWUM miteinander zu koppeln, da die Nicht-Berücksichtigung der Wassernutzung in NoWUM zu einer Überschätzung des tatsächlich vorhandenen Wassers führt. Änderungen der Wasserverfügbarkeit entstehen dabei aber nicht nur durch die Wasserentnahme in dem Beispielmunizip, sondern auch durch die Wasserentnahme in anderen Munizipien, die im Abflussrouting vorgeschaltet sind und wieder Auswirkungen auf nachgeschaltete Munizipien haben.

Abb. 6.9 zeigt den Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Wassernutzung. Dargestellt werden die Simulationsergebnisse der gekoppelten und ungekoppelten Modellversion für das gesamte entnommene Wasser aller Quellen und aller Nutzungsarten des gleichen Beispielmunizips (Iguatú). Es zeigen sich deutliche Kopplungseffekte. In der gekoppelten Version wird vor allem in der Trockenzeit weniger Wasser entnommen. Allerdings sinkt hier im Gegensatz zu Abb. 6.8 die Entnahme nicht auf Null, was darauf zurückzuführen ist, dass bei der Simulation alle Quellen berücksichtigt werden. Die Wasserverfügbarkeit ergibt sich durch die Berücksichtigung von Grundwasservorkommen.

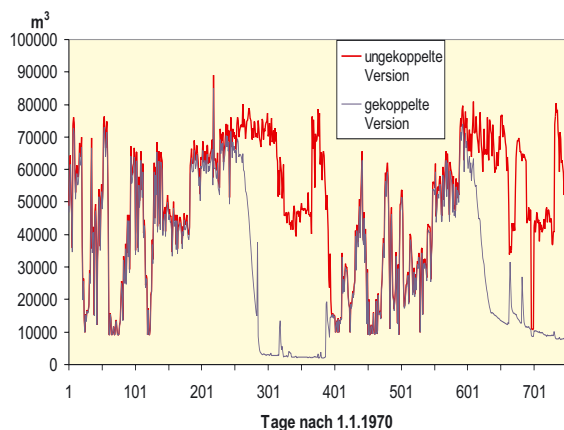


Abb. 6.9 Unterschiede zwischen der gekoppelten und ungekoppelten Version. Volumen des entnommenen Wassers aller Quellen eines Beispielmunizips (Iguatú). Tageswerte für die Jahre 1971/72

Auch der Wasserbedarf selbst ändert sich durch die Kopplung der beiden Modelle, da in der gekoppelten Version die tatsächlich bewässerte Fläche in Abhängigkeit von dem vorhandenen Wasser errechnet wird und den aktuellen Bedarf verringert.

Durch diese Kopplung ändern sich sowohl die Wasserverfügbarkeit als auch der Wasserverbrauch sowie der Wasserbedarf.

6.2.3.2 Auswirkung der Änderungen wichtiger Parameter

Untersuchungen zu einzelnen wichtigen Parametern im hydrologischen Modell WASA wurden von GÜNTNER durchgeführt (2002). Vor diesem Hintergrund interessieren in dieser Arbeit nur Änderungen, die sich im Bezug auf die Kopplung mit dem SIM-Modell ergeben.

Diese betreffen zum einen die möglichen Auswirkungen, die durch die Kopplung entstehen. Zum anderen beziehen sie sich auf die möglichen Auswirkungen auf die nicht-hydrologischen Ergebnisvariablen wie z.B. Erträge der bewässert angebauten Kulturpflanzen, BIP des Agrarsektors oder Migrationsprozesse. Dabei ist zu beachten, dass die Wassernutzung teilweise schon in die Untersuchung von WASA einbezogen ist. Allerdings werden dabei die interannuelle Variabilität und die langfristigen Trends der Wassernutzung nur über die klimatische Variabilität eingebracht, nicht aber über Aspekte einer Regionalentwicklung wie z.B. die Änderung von Bewässerungsflächen, Industrialisierungsprozesse oder Bevölkerungswachstum.

Als Parameter wurden solche Variablen ausgewählt, die stark sensitiv reagieren, da vermutet wurde, dass die Sensitivität eher sinkt, je weiter die Variablen entfernt sind. Als besonders sensitiv für das hydrologische Modell wurden bei den Vegetationsparametern die Wurzeltiefe und bei den Bodenparametern die hydraulische Leitfähigkeit identifiziert. Der Parameter hydraulische Leitfähigkeit (k_s) wurde um einen Faktor 10 und um einen Faktor 0.1 verändert, der Parameter Wurzeltiefe (z) um einen Faktor 0.5 und um einen Faktor 1.5. Sensitivitätskoeffizienten wurden für den jährlichen durchschnittlichen Abfluss, die Produktion und die Erträge von Tomaten, Migrationsprozesse und das Agrar-BIP von Ceará und Piauí für den Zeitraum von 1960-1998 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.8 dargestellt.

Bei einer Veränderung von k_s um den Faktor 0.1 ist eine hohe Sensitivität für die Variable Abfluss sichtbar (0.55); es kommt zu einem starken Anstieg. Auch die Variable Speichervolumen der Stauseen weist eine höhere Sensitivität auf (0.23). Die Erträge und die Produktion reagieren dagegen weniger sensitiv auf die Änderung. Ebenso verhält es sich beim Agrar-BIP, wobei das Agrar-BIP von Piauí eine höhere Sensitivität aufweist als das BIP von Ceará. Fast keine merklichen Auswirkungen bewirken die Änderungen bei der Variable Migration.

Variablen	k_{s+}	k_{s-}	$z+$	$z-$
Abfluss	0.02	0.55	0.03	0.22
Volumen	0.05	0.23	0.06	0.30
Tomate, Ertrag	0	0.02	0.03	0.08
Tomate, Prod.	0	0.03	0.11	0.09
Migration	0	0	0.03	0.01
Agrar-BIP Ceará	0	0.02	0.05	0.05
Agrar-BIP Piauí	0	0.04	0.01	0.15

Tabelle 6.8: Beträge der Sensitivitätskoeffizienten der Auswirkungen einer Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit um den Faktor 10 (k_{s+}) bzw. 0.1 (k_{s-}) sowie der Wurzeltiefe um den Faktor 1.5 ($z+$) und 0.5 ($z-$) für den Zeitraum 1960-1998. Dargestellt sind die Auswirkungen auf den mittleren jährlichen Abfluss, das gespeicherte Volumen grosser Stauseen zu Beginn der Trockenzeit, den bewässerten Ertrag und die Produktion von Tomaten, die Migration sowie das Agrar-BIP von Ceará und Piauí.

Die hohe Sensitivität des Abflusses gegenüber einer Abnahme von k_s erklärt sich durch die Zunahme des Abflusses infolge des Infiltrationsüberschusses aufgrund der geringeren Bodenleitfähigkeit. Diese Änderungen wirken sich auf das verfügbare Wasser für Bewässerungszwecke aus, wodurch sich die Sensitivität der Variablen Ertrag und Produktion der bewässerten Pflanzen erklären lässt. Hiervon wird wiederum die Höhe des Agrar-BIP betroffen. Der Einfluss der Änderung der Abflussraten wird kleiner, je weiter die Variablen in der

Wirkungskette von dieser entfernt sind. Deswegen ist der Einfluss auf die Variable Migration kaum messbar.

Bei einer Veränderung von k_s um den Faktor 10 ist für alle Variablen keine größere Sensitivität feststellbar (0-0.05). Dies rührt daher, dass der Abfluss nicht bedeutsam berührt wird und es deshalb keine wesentlichen Einflusswirkungen dieser Variable auf die weiteren Variablen gibt. Die geringe Sensitivität des Abflusses lässt sich damit erklären, dass eine Zunahme von k_s nicht nur die Infiltrationsrate verbessert, was einen niedrigeren Abfluss zur Folge haben müsste, sondern gleichzeitig auch die Filtrierung und den lateralen Fluss. Dadurch fließt mehr Wasser in tiefere Bodenhorizonte bzw. auch Flüsse ab, die deshalb mehr Wasser transportieren. Hierdurch reduziert sich die Gefahr einer potentiellen Verdunstung, was den niedrigeren Abfluss aufgrund des Infiltrationsüberschusses durchschnittlich kompensiert.

Bei der Veränderung von z um den Faktor 0.5 zeigt sich eine höhere Sensitivität für die Variablen Abfluss (0.22) und Stauseevolumina (0.30). Mit der Größe der Wurzeltiefe steigen die Rate des Abflusses und die gespeicherten Wasservolumina. Auffällig ist ebenfalls die höhere Sensitivität des Agrar-BIP in Piauí (0.15) (vgl. Tabelle 6.8). Der Einfluss des Parameters z ist aber schwierig bestimmbar, da er durch eine Vielzahl von Faktoren wie Boden- oder Pflanzenbeschaffenheit beeinflusst wird, deren Bestimmung mit Unsicherheiten behaftet ist.

Die hier ermittelten Veränderungen wurden mit den von GÜNTNER (2002) ermittelten Veränderungen verglichen. Dabei handelt es sich aber nicht um exakt die selben Werte, da bei WASA der Median langfristiger Mittelwerte aller Einzugsgebiete berechnet wird, in SIM hingegen der mittlere Abfluss über alle Jahre gemittelt wird (Tabelle 6.9). SIM und WASA reagieren in der gleichen Größenordnungen auf die Veränderung der hydrologischer Parameter. Das legt den Schluss nahe, dass die für WASA

	k_s^-	k_s^+	z^-	z^+
WASA	43	0	5	3
SIM	49	2	11	1

Tabelle 6.9: Vergleich der Ergebnisse von SIM und WASA. Beträge der Änderung des Abflusses in Ceará [%] durch Variation der Parameter k_s und z um den Faktor 0.10 und 10 bzw. 0.5 und 1.5.

ermittelten Ableitungen auch für SIM gelten, z.B. dass Unsicherheiten von Bodenparametern im Vergleich zu Vegetationsparametern und topographischen Parametern größeren Einfluss auf die Modellunsicherheit haben und der Effekt der Unsicherheit einzelner Modellkomponenten und -parameter für Jahre mit unter- oder überdurchschnittlichen Niederschlagsvolumina zumeist unterschiedlich ist. Die Unsicherheit einzelner Parameter ist somit von unterschiedlicher Bedeutung für die Unsicherheit der Szenarienrechnungen, die jeweils einen Anstieg und einen Rückgang der Niederschlagstrends beinhalten (vgl. Kapitel 6.2.6).

6.2.4 Soziologie

Unsicherheitsanalyse wichtiger Parameter

Das Teilmodell SEMO ist weniger komplex konzipiert als das Teilmodell YES und benötigt daher weniger Parameter. Bei der hier durchgeführten Analyse werden die Parameter betrachtet, die einerseits besonders wichtig und andererseits gleichzeitig besonders unsicher sind. Die Unsicherheitsanalyse wurde entsprechend der in Abschnitt 6.2.1 dargestellten Methode durchgeführt. Die Parameter, die bei der Unsicherheitsanalyse variiert wurden, sind:

- das Einkommen im externen Migrationsziel, d.h. das Einkommen, das ausserhalb der beiden Bundesstaaten (Migrationsziel) angenommen wird (*inc-ext*). Dieses Einkommen ändert sich je nach Szenario. Aus dem Unterschied der Einkommen im Untersuchungsgebiet und in den Migrati-

onszielgebieten errechnet sich die Migrationsrate.

- die Kosten der Migration (*cost*): Migration wird im Modell mit Kosten versehen, die allerdings keine tatsächlichen Werte darstellen, die sich in Durchschnittseinheiten ausdrücken lassen, sondern vielmehr virtuelle Kosten, die durch Kalibrierung des Modells bestimmt werden.
- die Änderungen der Mortalitätsrate (*dm*)
- die Änderungen der Fertilitätsrate (*df*)

Tabelle 6.10 zeigt die statistischen Daten für die Auswirkungen der Variation der Parameterwerte auf den langjährigen Mittelwert und die Standardabweichung von Einkommen, Migration, Erfüllung des Bewässerungswasserbedarfs (q_{irr}) und Gesamt-BIP für die Simulationsperiode 1921-1998. Angegeben werden jeweils die Mittelwerte, Standardabweichungen (absolute Unsicherheit) und die Variationskoeffizienten (relative Unsicherheit). Auffällig ist, dass die Werte der Variationskoeffizienten für die Variable Migration mit 0.31-0.35 wesentlich höher ausfallen als die Variationskoeffizienten für die drei anderen Variablen, die sich in der Größenordnung von 0.01 bis 0.11 bewegen.

Die relative Unsicherheit ist also bei der Variable Migration sehr hoch. Der zweithöchste Unsicherheitswert zeigt sich für die Variable Einkommen, die durch die Entwicklung der Gesamtbevölkerung, die wiederum sehr von den variierten Parametern *df* und *dm* bestimmt wird, beeinflusst wird. Kaum beeinflusst werden das Gesamt-BIP und der Quotient q_{irr} , da beide nur sehr indirekt mit der Wirkungskette der Parameteränderung verbunden sind und keine zu einer Verstärkung führenden (sehr nichtlinearen) Effekte auftreten. Für die Standardabweichung ergibt sich ein ähnliches Bild; allerdings hat hier auch das Einkommen einen hohen Variationskoeffizienten, die Variabilität ist somit sehr unsicher.

	Mittelwert			Standardabweichung		
	μ	st_{dev}	V	μ	st_{dev}	V
Ceará						
Agrar-Einkommen	171	11	0.06	147	12	0.01
Einkommen gesamt	598	68	0.11	182	49	0.27
Mig-C	293354	102952	0.35	407024	125458	0.31
BIP gesamt	2370	25	0.01	1124	15	0.01
Piauí						
Agrar-Einkommen	229	21	0.09	170	19	0.11
Einkommen gesamt	588	57	0.10	158	48	0.3
BIP gesamt	982	17	0.01	324	128	0.04
Beide Staaten						
q_{irr}	0.81	0.03	0.03	0.04	0	0.03
Mig-W	564031	174372	0.31	634234	191065	0.30
Mig-V	1207750	391133	0.32	1369870	414749	0.30

Tabelle 6.10: Unsicherheitsanalyse für den Zeitraum von 1921-1998 für Ceará und Piauí. Verglichen werden Mittelwert und Standardabweichung von fünf Variablen: Agrar-Einkommen [R\$/c], Migration, Gesamt-Einkommen [R\$/c], Gesamt-BIP [R\$] und die Erfüllung des Bewässerungswasserbedarfs in der Trockenzeit. Für diese Variablen werden jeweils Mittelwert (μ), Standardabweichung (st_{dev}) und Variationskoeffizient (V) gezeigt. Mig-V: Migration aus Regionen mit hohem Wasserpotential; Mig-W: Migration aus Regionen mit wenig Wasser; Mig-C: Migration aus Ceará

In Tabelle 6.11 sind die Variablen angeführt, die sich als unsicher erwiesen haben (vgl. Tabelle 6.10). Dargestellt werden die Auswirkungen der Variationen der Parameter auf die Unsicherheiten in ausgewählten Modellergebnissen. Als Maß dient wiederum der RTU (vgl. Kapitel 6.2.1). Die linearen Korrelationen weisen teilweise kleine Werte auf. Dennoch lassen sich alle Ergebnisse in Form einer linearen Regression darstellen, mit Einschränkungen bei der Migration. Die geringeren Werte für die Mi-

gration verdeutlichen die nichtlineare Reaktion dieser Variablen.

Den durchschnittlich größten Einfluss auf die Unsicherheit in den Ergebnissen hat der Parameter *cost* (Kosten der Migration). Das gilt vor allem für die Ergebnisse zu den Einkommen beider Staaten. An zweiter Stelle folgt der Parameter *df* (Fertilitätsrate), der die Ergebnisse zur Migration am stärksten beeinflusst. Bei einer Variation von *inc-ext* (Einkommen außerhalb von Ceará und Piauí) zeigt sich ein deutlicher Einfluss nur für die Einkommen in Piauí. Die Variation von *dm* (Mortalitätsrate) zeigt kaum Auswirkungen.

Die Migration wird maßgeblich durch den Parameter *df* beeinflusst. Eine mögliche Erklä-

rung für den starken Einfluss der Fertilitätsrate ist, dass diese bestimmt, wie viele Menschen in dem jeweiligen Gebiet leben und wie groß deshalb die Menge der Personen ist, die migrieren können. Eine niedrige Geburtenrate würde schnell zu einer Verringerung der Bevölkerung bei gleichzeitiger Migration führen.

Der hohe Einfluss der Kosten der Migration auf die Pro-Kopf-Agrareinkommen in beiden Staaten kommt indirekt über die Anzahl der Migranten zustande. Je höher ihre Anzahl ist, desto stärker sinkt die Zahl der Gesamtbevölkerung, wodurch sich das verfügbare Einkommen erhöht.

	Ceará			Piauí		Beide Staaten	
	Einkommen gesamt	Agrar- Einkommen	Mig-C	Einkommen gesamt	Agrar- Einkommen	Mig-V	Mig-W
R²	0.54	0.75	0.52	0.74	0.88	0.58	0.51
cost	0.60 (1)	0.84 (1)	0.23 (2)	0.84 (1)	0.89 (1)	0.08 (2)	0.09 (2)
df	0.27 (2)	0.19 (2)	0.36 (1)	0.18 (3)	0.20 (3)	0.37 (1)	0.36 (1)
dm	0.08 (4)	0.07 (4)	0.06 (4)	0.08 (4)	0.05 (4)	0.04 (4)	0.05 (4)
inc-ext	0.15 (3)	0.19 (3)	0.10 (3)	0.19 (2)	0.20 (2)	0.08 (3)	0.08 (3)

Tabelle 6.11: Beiträge der Parameter zur Unsicherheit in den Mittelwerten der Ergebnisse des demographischen Modells (vgl. Tab. 6.10). R² zeigt die Korrelation einer linearen Regression der Ergebnisse. Es werden die Rangfolge der Quellen der Unsicherheiten (in Klammern) und ihr relativer Beitrag zur gesamten Unsicherheit gezeigt. Als Maß dient hierfür der RTU (zur Definition siehe Kapitel 6.2.1).

Die Variationen der Parameter beeinflussen die Bevölkerungsentwicklung, die wiederum über Veränderungen der Wassernutzung einen Einfluss auf die bewässerten Erträge ausübt.

Die Kosten der Migration haben einen geringeren Einfluss auf die Migration in den Gebieten mit geringer Wasserverfügbarkeit verglichen mit Gesamt-Ceará. Ursächlich hierfür sind die größeren Einkommensunterschiede, welche die Kosten relativieren.

6.2.5 Einfluss der Anfangsbedingungen

Verschiedenen Variablen wie z.B. gespeichertes Wasservolumen von Stauseen, Agrar-BIP oder landwirtschaftliche Erträge, müssen beim Programmstart Werte zugewiesen werden. Die daraus errechneten Werte können sich in einem deterministischen Modell dementsprechend ändern. Zur Abschätzung des Einflusses der Anfangsbedingungen wurden Simulationen in verschiedenen Jahren mit jeweils gleichen Werten der Anfangsbedingungen für die nicht klimatischen Variablen gestar-

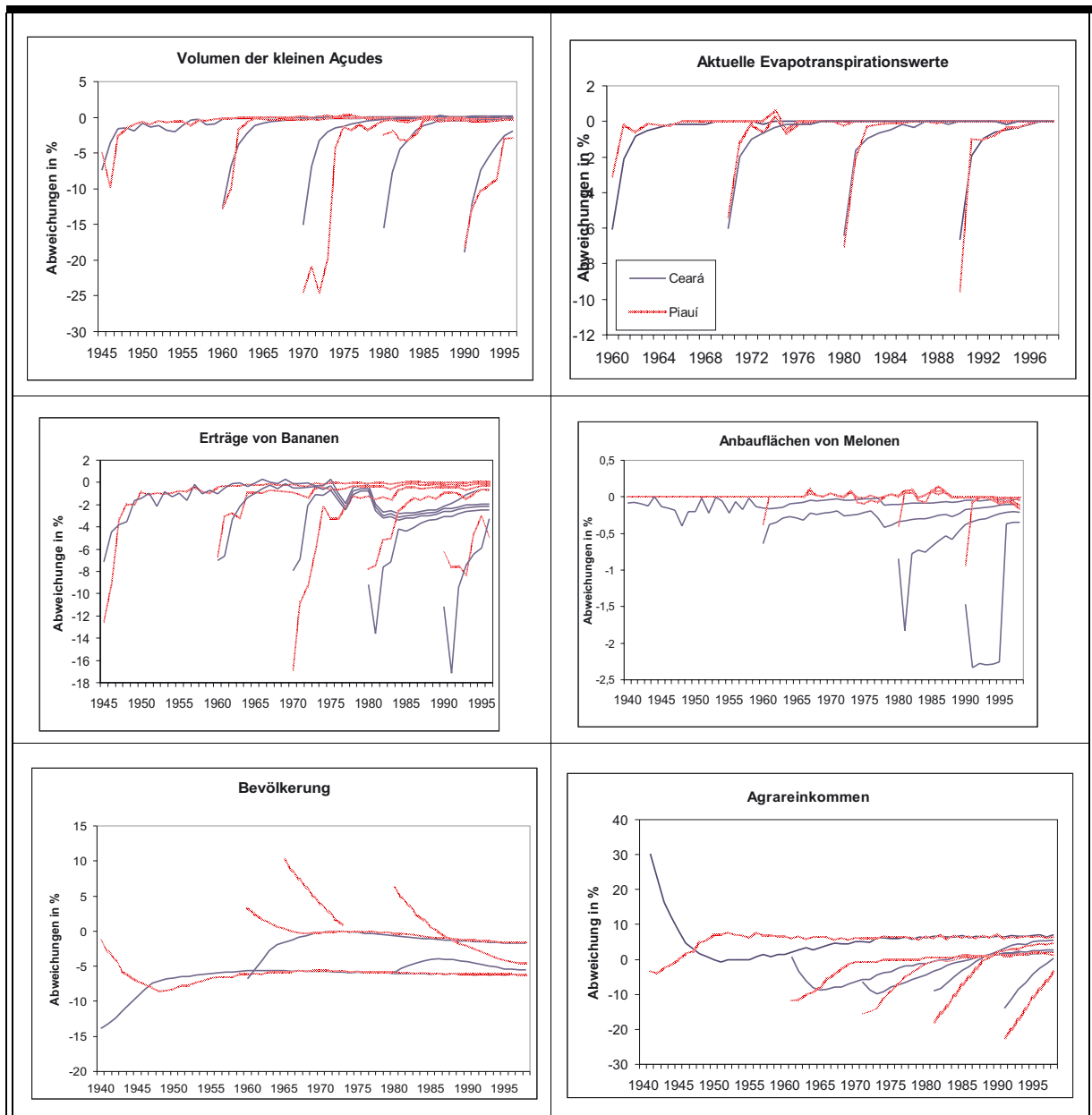


Abb. 6.10 Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung verschiedener Variablen von den Anfangsbedingungen. Vergleich der zu unterschiedlichen Zeitpunkten gestarteten Simulationen mit einem Modelllauf von 1921-1998.

tet (vgl. Abb. 6.10) und mit einem entsprechenden Modelllauf verglichen, der die vollständige zur Verfügung stehende historische Klimarekonstruktion (1921-1998) erfasst.

Die jeweilige Verringerung der Fluktuation der Variablen induziert die Stabilität des Systems. Die Variablen reagieren unterschiedlich robust. Am schnellsten werden die Fluktuationen bei den aktuellen Evapotranspirationswerten und dem Volumen der kleinen Açudes ab-

gedämpft. Diese Variablen stehen an vorderer Stelle in der Wirkungskette der Klimavariabilität. Die Reaktionen sind weniger nicht-linear als bei den anderen Variablen, die in der Wirkungskette später auftreten. Die Anfangsbedingungen sind hier deshalb vernachlässigbar. Die Fluktuationen der beiden Variablen Erträge von Bananen und Anbaufläche von Melonen werden langsamer abgedämpft. Die Reaktionen fallen stärker nicht-linear aus. Die stärk-

sten nicht-linearen Reaktionen zeigen sich für die beiden Variablen Bevölkerung und Agrareinkommen. Hier haben die Anfangsbedingungen einen sehr großen Einfluss. Erst ab einem Zeitraum der Berechnung von mehr als zehn Jahren treten vernachlässigbare Abweichungen in der Größenordnung von $\pm 5\%$ auf. Bei Berechnungen mit SIM ist zu beachten, dass vor allem die sozioökonomischen Variablen sehr sensitiv auf unterschiedliche Anfangsbedingungen reagieren und die Simulationsergebnisse für die ersten (zehn) Jahre wenig aussagekräftig sind. Bei dem Vergleich unterschiedlicher Läufe müssen die gleichen Anfangsbedingungen gewählt werden. Insgesamt deuten die Ergebnisse der Simulationen auf ein stabiles System hin.

6.2.6 Charakterisierung der Klimaszenarien

Die Klimaszenarien werden als Eingabedaten zur Einschätzung möglicher Auswirkungen von Klimaänderungen im Modell verwendet. Die Szenariendaten basieren auf Ergebnissen von *General Circulation Models* (GCMs). Diese sind in der Lage, klimatische Muster und historische Trends von der globalen bis zu der kontinentalen Skala wiederzugeben (IPCC, 2001).

Ein Vergleich der Ergebnisse von sieben GCMs, deren Ergebnisse durch das *IPCC Data Distribution Centre* (IPCC-DDC, 1999) verfügbar gemacht wurden, ergab allerdings, dass lediglich zwei der untersuchten GCMs vollständig in der Lage sind, dass semi-aride Klima von Nordostbrasilien, d.h. sowohl den jährlichen durchschnittlichen Niederschlag als auch den saisonalen Zyklus und den durchschnittlichen globalen Niederschlag für die heutige Zeit gut wiederzugeben (Abb. 6.11). Das liegt an der recht groben Auflösung von 300-900 km und an dem Umstand, dass regional wichtige klimatologische Prozesse nicht vollständig erfasst werden (HOUGHTON ET AL., 2001).

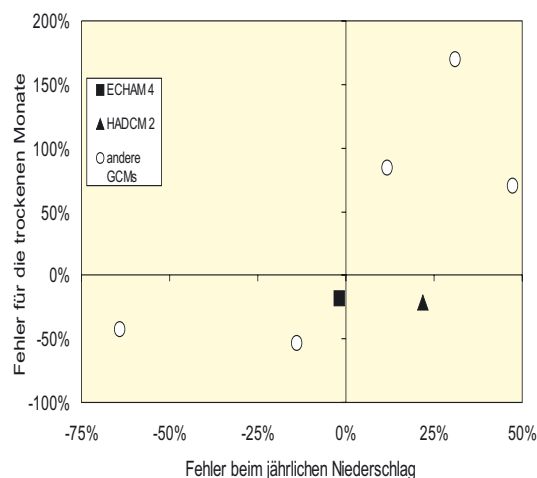


Abb. 6.11 Simulation des regionalen Niederschlags im semi-ariden Nordosten von Brasilien im Zeitraum 1961 bis 1990 in sieben GCMs (IPCC-DDC, 1999) im Vergleich mit beobachteten Daten (NEW ET AL., 1999), der die Eignung der GCMs zur Repräsentation der regionalen Klimacharakteristika untersucht. In einem GCM ist Nordostbrasilien stark arid, in drei GCMs zeigt das Regionalklima keine ausgeprägte Saisonalität (d.h. die trockensten Monate sind zu feucht) und ein GCM stellt das Regionalklima zwar angemessen dar, überschätzt aber den globalen Niederschlag um 40% (Krol et al., 2003).

Die beiden verwendbaren GCMs sind ECHAM4 (MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE, RÖCKNER ET AL., 1996) und HADCM2 (HADLEY CENTER, JOHNS ET AL., 1997). Für beide Modelle wurden Ergebnisse von Läufen mit der Annahme eines jährlichen Anstiegs der Treibhausgase um 1% pro Jahr ab 1990 als Grundlage zur Entwicklung der Klimaszenarien genommen. Der Lauf von ECHAM4 ergab einen Rückgang der Niederschläge für den Zeitraum 2070-2099 um -50%, verglichen mit dem Zeitraum 1961-1990. Der Lauf von HADCM2 zeigte dagegen für denselben Zeitraum eine Steigerung der Niederschläge um 21% auf (KROL ET AL. 2003). Mit HADCM3 liegt mittlerweile eine Weiterentwicklung von HADCM2 vor, die ebenfalls einen Rückgang des Niederschlags abschätzt. Da dieses GCM das gegenwärtige Klima aber arid

und nicht semi-arid darstellt, ist es für die Klimaszenarien nicht brauchbar.

Um die Ergebnisse von GCMs in integrierten Regionalmodellen verwenden zu können, müssen sie auf die benötigte Auflösung herunterskaliert werden. Dabei sind die Probleme im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Skalen der GCMs und regionaler Modelle zu beachten (vgl. CLAUSSEN, 1998). Eine mögliche Vorgehensweise besteht darin, die Ergebnisse der GCMs mit Hilfe regionaler Klimamodelle, die eine höhere räumliche Auflösung haben, zu skalieren. Dabei wird ein Klimamodell für ein begrenztes Gebiet, ein sogenanntes *Limited Area Model* (LAM), in ein GCM eingebettet. Der Initialzustand des Regionalmodells wird dabei vollständig durch das GCM beschrieben. Im Verlauf der Einbettung werden die aktuellen Entwicklungen der großskaligen atmosphärischen Prozesse und der Bodenprozesse an das LAM weitergegeben. Im Rahmen des Projekts wurde die Methodik angegangen; allerdings gelang es nicht, validierte Werte für einen Zeitraum von mehreren Jahren zu ermitteln (BÖHM ET AL., 2003).

Eine zweite Vorgehensweise besteht darin, die Ergebnisse der GCMs mit Hilfe von statistischen Methoden auf eine niedrigere räumliche Auflösung zu skalieren. Diese Methode wurde zur Generierung von regionalen Klimaszenariendaten für Ceará und Piauí angewandt (WERNER UND GERSTENGARBE, 1997). Dabei wurden beobachtete historische Daten von lokalen Klimastationen mit langfristigen Trends der Projektionen der beiden GCMs kombiniert.

In diesem Kontext wurde die Tendenz des jährlichen Niederschlags als wesentliche meteorologische Leitgröße und wichtigster Trend der Region ausgewählt. Dabei wurden simultan erhobene Daten für den Niederschlag und die Temperatur zur Skalierung der Tendenzen des Niederschlags auf die Ebene der Klimastationen benutzt. Da Untersuchungen zu Änderungen anderer meteorologischer Größen erga-

ben, dass diese keine Differenzen zum heutigen Klima aufweisen, wurden sie nicht weiter untersucht (GERSTENGARBE UND WERNER, 2003).

Die anderen benötigten klimatischen Variablen wie etwa relative Luftfeuchtigkeit oder Globalstrahlung wurden durch Regressionen hinzugefügt, die von den wenigen verfügbaren Zeitreihen eines umfassenderen Satzes von klimatischen Variablen abgeleitet wurden, die eine tägliche Auflösung hatten. Die Klimaszenarien für die einzelnen Klimastationen wurden auf Munizipebene interpoliert. Dabei wurde der Methode von SHEPARD (1968) gefolgt. Um den Wert an einem bestimmten Punkt zu bestimmen, werden bei dieser Methode die umliegenden Punkte betrachtet und als Funktionen der Distanz und Richtung zum gewünschten Punkt gewichtet. Letztendlich wurden zwei Klimaszenarien von GERSTENGARBE UND WERNER (2003) generiert, die sich hinsichtlich der projizierten Niederschlagsentwicklung deutlich voneinander unterscheiden.

Das auf ECHAM4 (ECHAM-Szenario) basierte Szenario weist einen Rückgang der Niederschläge für das Untersuchungsgebiet um 24%, das auf HADCM2 basierte Szenario (HADCM-Szenario) eine Steigerung um 10% auf. Zum Vergleich wurde noch ein Szenario ohne Klimaänderungen, aber mit Erhalt der Variabilität des Niederschlags einbezogen (Abb. 6.12). Der Vergleich der Szenarien verdeutlicht die großen Unsicherheiten, die hinsichtlich möglicher Entwicklungen des Niederschlags im Untersuchungsgebiet bestehen. Die Trendänderungen des Niederschlags über eine Periode von 50 Jahren zeigen gut definierte räumliche Muster, die aus stationsspezifischen Korrelationen zwischen lokalen und großskaligen Niederschlagswerten resultieren. Die Unterschiede zwischen den räumlichen Mustern der Szenarien sind auf unterschiedliche Korrelationen in extrem trockenen und extrem feuchten Jahren zurückzuführen (vgl. Abb. 6.13)

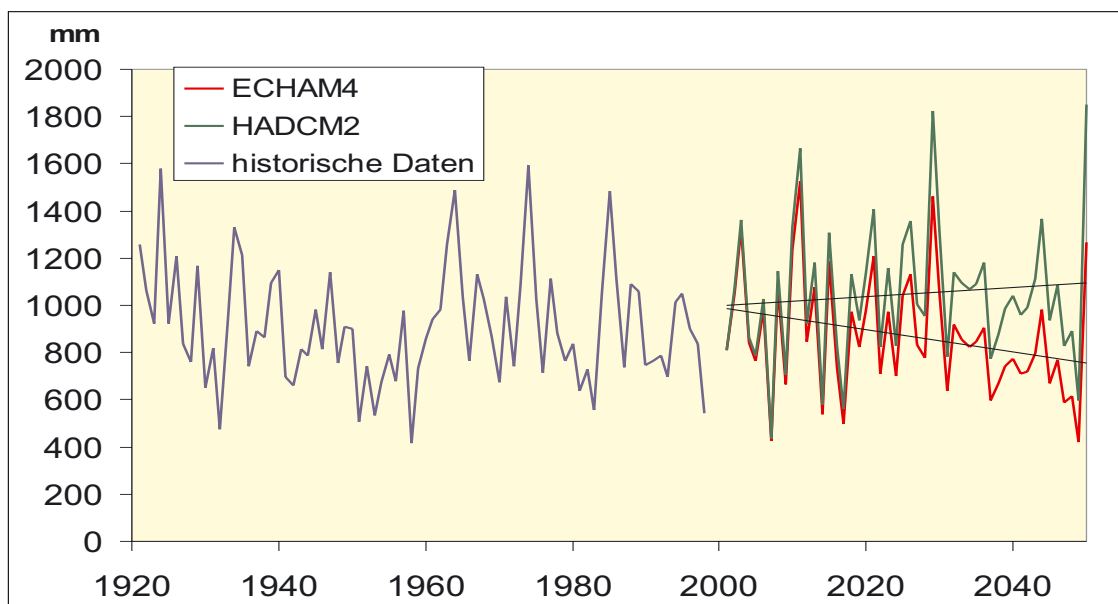


Abb. 6.12 Jährlicher Niederschlag [mm] in Ceará und Piauí. Historische Daten (1921-1998) und Szenariendaten (1999-2050) basierend auf GCM Läufen.

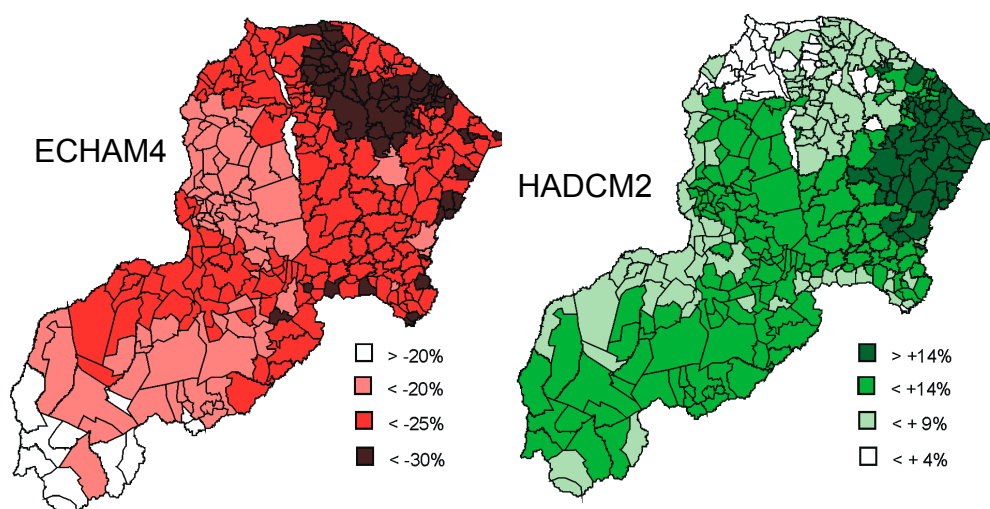


Abb. 6.13 Änderungen des Niederschlags in den verwendeten Klimaszenarien. Trend über eine Periode von 50 Jahren (2001-2050).

6.2.7 Auswirkungen der Klimaszenarien

Um die regionalen Auswirkungen der Klimaänderung abzuschätzen, wurden Ergebnisse von Simulationsläufen der drei verschiedenen Szenarien verglichen. Zur Quantifizierung der treibenden Kräfte waren Inputdaten notwen-

dig, die aus einem innerhalb des WAVES-Projektes entwickelten Referenzszenario entnommen wurden. Hierfür wurde das Referenzszenario „Globalisation and Cash Crops“ ausgewählt, das von einer Fortschreibung der Trends der Bevölkerungsentwicklung und einer weitreichenden ökonomischen Globalisierung mit hohen Wachstumsraten ausgeht, von de-

nen vor allem Küstenregionen und die Gebiete mit einer hohen potentiellen Verfügbarkeit von Wasser im Hinterland profitieren. Es werden weitere Staudämme gebaut und die Bewässerungsfläche wird stark ausgedehnt. (vgl. Kapitel 6.3.1).

Vergleicht man Veränderungen des Niederschlags in den jeweils letzten 25 Jahren der historischen Periode (1974-1998) und der Szenarioperiode (2026-2050), so unterscheiden sie sich in ihrer Größe und ihren räumlichen Mustern verglichen mit Änderungen der Trends innerhalb der Szenarioperiode (2001-2050). Der Grund hierfür ist, dass die Szenariozeitreihen (GERSTENGARBE UND WERNER, 2003) auf der Grundlage der Charakteristika der Niederschläge, d.h. interannuelle Variabilität, räumliche Verteilung und tägliche Charakteristik, für den Zeitraum 1921-1980 ermittelt wurden, da für einen späteren Zeitraum keine ununterbrochenen Zeitreihen zur Verfügung standen, die den Anforderungen der Methodik gerecht werden konnten. Diese unterscheiden sich von den Datenreihen für den Zeitraum 1974-1998. Ein direkter Vergleich zwischen den letzten historischen und zukünftigen Jahren wird hierdurch erschwert. Im folgenden werden deshalb die Veränderungen über den gesamten Zeitraum der Szenarienperiode (2001-2050) untersucht, die auf den Änderungen in den Datenreihen der intern konsistenten GCMs beruhen.

Aufgrund der zahlreichen Variablen ermöglicht das Modell eine große Anzahl von Ergebnissen (vgl. Abb. 6.14, 6.15, 6.16). Nachfolgend werden wichtige Resultate zusammengefasst. Die Darstellungen folgen teilweise Darstellungen, die in der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung des WAVES-Projekts gemeinsam durchgeführt wurden (vgl. KROL ET AL. 2003).

6.2.7.1 Hydrologie

In der Wirkungskette der Klimaänderung stehen die Auswirkungen auf die Verfügbarkeit

von Wasser an erster Stelle. Änderungen des Niederschlags beeinflussen die Wasserbilanz und damit den Abfluss und das gespeicherte Oberflächenwasser.

Im ECHAM-Szenario zeigt sich für Ceará ein Rückgang des durchschnittlichen Abflusses um 56%, im HADCM-Szenario dagegen ein Anstieg um 33%. Im Vergleich mit dem Trendverlauf des Niederschlags (11 bzw. 26% für Ceará) bedeutet dies eine Verstärkung der Auswirkungen um einen Faktor 2-3. Maßgeblich hierfür ist die starke nichtlineare Reaktion von semi-ariden Gebieten auf Niederschlagsänderungen (GÜNTNER 2002). Größere Änderungen werden erst nach 2025/2030 sichtbar. Diese Entwicklung illustriert Abbildung 6.14a am Beispiel des Abflusses des Jaguaribe-Flusses, des größten Flusses in Ceará (vgl. Abb.A1.1 im Anhang): Ab 2030 kommt es zu einem starken Rückgang im ECHAM-Szenario. Im HADCM-Szenario sind leichte Erhöhungen erkennbar, wobei der Verlauf eine hohe Variabilität aufweist. Eine ähnliche Entwicklung findet sich aber auch für das Szenario ohne Klimaänderung. Die Entwicklung im HADCM-Szenario ist nicht signifikant.

Dem Bau von Staudämmen wird eine wichtige Rolle für die Überwindung von Wasserknappheit zugesprochen. Die jeweiligen Stauungsvolumina zum Ende der Regenzeit (hier: 1. Juli) sind deshalb von großer Bedeutung. Simulationen zeigen für das gespeicherte Wasservolumen der größeren Stauseen (Kapazität $>50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) in Ceará zunächst einen starken Anstieg bis zum Jahr 2015 (Abb. 6.14b). Dieser ist auf das Fertigstellen des Stausees Castanhão mit einer Kapazität von $4.4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ zurückzuführen. Er liegt stromabwärts am Fluss Jaguaribe und speichert somit Wasser, das ansonsten in den Atlantischen Ozean fließen würde. Zunächst ist auch genügend Wasser vorhanden, um ihn zu füllen (Abb. 6.14b).

Mittelfristig kommt es im ECHAM-Szenario nach 2025 aber zu einem deutlichen Rückgang

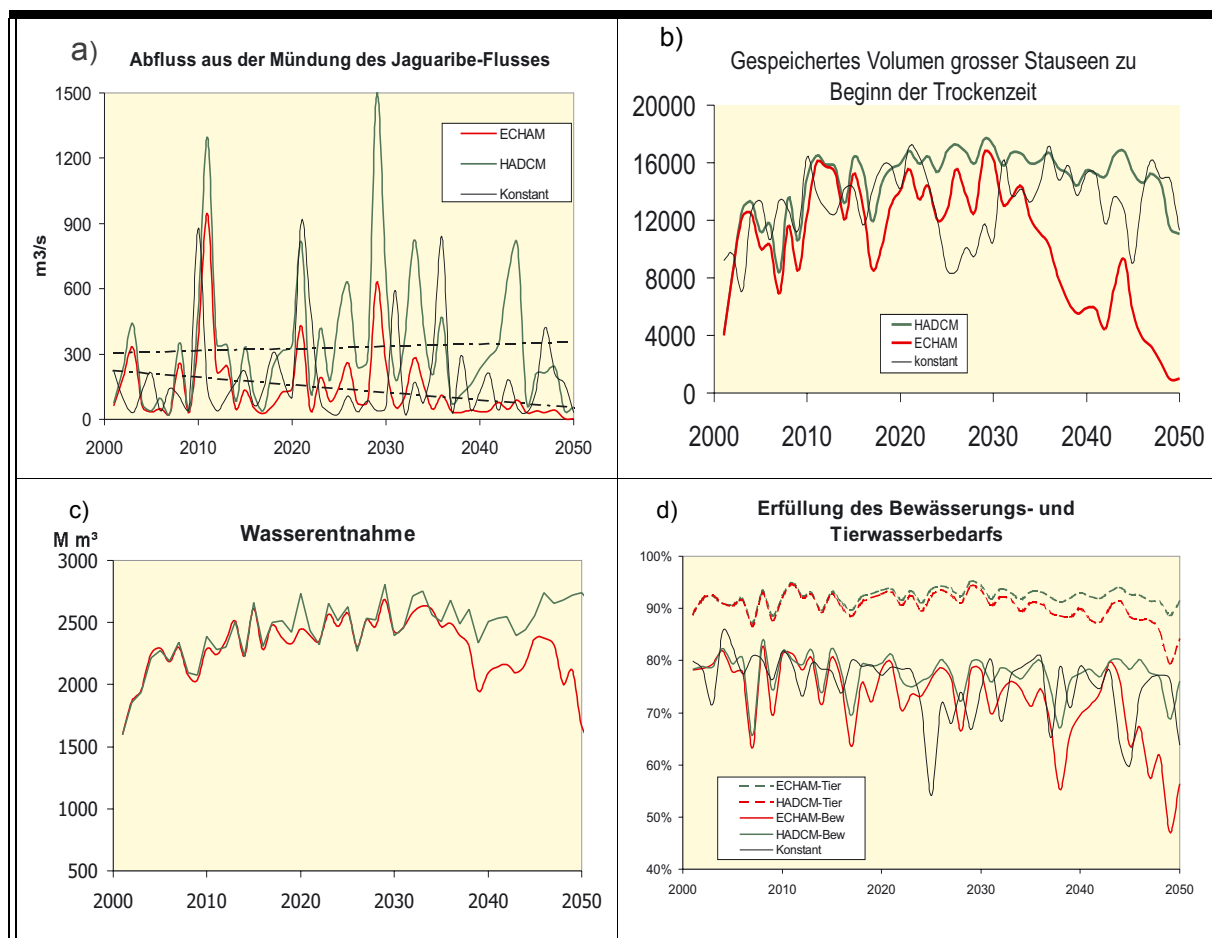


Abb. 6.14 Hydrologische Auswirkungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation mit Eingabedaten entsprechend des Referenzszenarios A (vgl. Kapitel 6.3) und verschiedener Klimaszenarien. a) Abfluss an der Mündung des Flusses Jaguaribe b) gespeichertes Wasser in grossen Stauseen am Ende der Regenzeit. c) Volumen des gesamten entnommenen Wassers. d) Erfüllung des Wasserbedarfs verschiedener Sektoren während der Trockenzeit.

der gespeicherten Volumina großer Stauseen. Im gesamten Zeitraum sinken diese um 32%, was auf den klimabedingten Rückgang des Niederschlags zurückzuführen ist. Keine signifikanten Tendenzen, aber ein leichter Anstieg der gespeicherten Wasservolumina zeigen sich im HADCM-Szenario. Verglichen mit dem Szenario ohne Klimaänderung ist diese aber sehr gering sodass hier die Einflussnahme einer Klimaänderung im HADCM-Szenario zu vernachlässigen ist (Abb. 6.14b). Die gespeicherten Volumina der kleineren Stauseen, bezogen auf Ceará, reagieren im Mittel weniger stark auf die Änderungen des Niederschlags, da diese Stauseen ihr Wasser aus kleinen, lokalen Einzugsgebieten beziehen und deswegen weniger

anfällig gegenüber Abflussänderungen sind als große Stauseen. In Ceará sinken sie im ECHAM-Szenario um 16%, im HADCM-Szenario steigen sie um 5% (GÜNTNER, 2002).

Bei der Entwicklung der Wasserentnahme (Abb. 6.14c) kommt es zunächst zu einem Anstieg, bedingt durch einen höheren Bedarf aufgrund einer steigenden Anzahl von Bewässerungsflächen, einer wachsenden Bevölkerung und einer verbesserten Infrastruktur (vgl. Kapitel 6.3.1). Der Anstieg wird auch durch das höhere Angebot von Wasser verursacht. Für die Zeit nach 2025 wird keine weitere Ausdehnung der Bewässerungsflächen angenommen. Änderungen im Wasserbedarf ergeben sich durch Bevölkerungsentwicklung und Wirt-

schaftswachstum. Ab 2030 kommt es zu einem durchschnittlichen Rückgang der Wasserentnahme im ECHAM-Szenario, der durch die Verknappung der verfügbaren Wasserdargebots (vgl. Abb. 6.14c) bedingt ist. Im HADCM-Szenario bleibt die Menge der Wasserentnahme ab 2030 gleich.

Ein wichtiger Index für die Beschreibung der Wasserknappheit ist das Ausmaß, in dem der Wasserbedarf erfüllt wird. Dieser steigt besonders in der Bewässerungslandwirtschaft, die mit 50%-70% gleichzeitig den höchsten Anteil am Gesamtverbrauch hat, was in der Folge zur Verknappung des Wasseraufkommens führt. In Abbildung 6.14d wird der Quotient aus Bedarf und Erfüllung für verschiedene Verbraucherbereiche während der Trockenzeit dargestellt. In beiden Szenarien sinkt der Quotient für die Bewässerungslandwirtschaft, wobei der Rückgang im ECHAM-Szenario stärker ausfällt. Selbst im niederschlagsreicheren HADCM-Szenario wird dem steigenden Bedarf durch die Ausdehnung der Bewässerungsfläche nicht Rechnung getragen.

In anderen Sektoren (Haushalte, Viehhaltung) wird erst später gespart (vgl. Kapitel 4.4.2). Der Quotient für die Viehhaltung ist deshalb stets größer als der Quotient für die Bewässerungslandwirtschaft. Da in den Szenarien keine Annahmen zur Änderung der Viehzahlen getroffen werden, ist der Einfluss der Klimaänderungen dominant. Aber auch das Bevölkerungswachstum hat Einfluss, da die private Wassernachfrage als erste befriedigt wird. Im HADCM-Szenario mit der leicht steigenden Niederschlagstendenz bleibt dieser Quotient auf einem konstanten Niveau; im Klimaszenario ohne Änderung sinkt er leicht. Ein starker Rückgang zeigt sich in den letzten Jahren im ECHAM-Szenario.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine mögliche Änderung des Klimas mit der Folge niedrigerer Niederschläge unmittelbare Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Was-

ser in der Untersuchungsregion haben wird. Dabei kann es zu einer sich selbst verschärfenden Problemspirale von nachlassenden Niederschlägen und sinkenden gespeicherten Wasservolumina bei gleichzeitig steigendem Wasserbedarf insbesondere in der Bewässerungslandschaft kommen. Starke Auswirkungen zeigen sich im ECHAM-Szenario.

6.2.7.2 Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist der Wirtschaftssektor, der am stärksten von den möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung betroffen sein wird. Der Einfluss des Klimas erfolgt zum einen über die aktuelle Evapotranspiration, zum anderen über die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser.

Tabelle 6.12 zeigt die jeweiligen Auswirkungen der Niederschlagsentwicklung in den drei Klimaszenarien auf die Produktion und die Erträge bewässert und unbewässert angebaute Pflanzen. Verglichen werden die Trends innerhalb der Periode 2001-2050. Ein Gesamtertrag wird nicht dargestellt, da dieser die unterschiedlichen Entwicklungen sowie den dominanten Einfluss der bewässerten Erträge auf den Gesamtertrag verdecken würde. Bereits kleine Änderungen des Verhältnisses zeigen große Auswirkungen (vgl. Kapitel 6.2.2.4).

Insgesamt ist festzustellen, dass innerhalb jedes Szenarios die Ergebnisse für die Produktion und die Erträge *unbewässert* angebaute Pflanzen nahezu gleich sind. Zurückzuführen ist dies auf den Umstand, dass in beiden Fällen klimatische Änderungen denselben Einfluss ausüben. Unterschiede ergeben sich, wenn die Pflanzen *bewässert* angebaut werden. Hier kommt es zumeist zu einem Anstieg der Produktion und zu einem Rückgang der Erträge, da die Bewässerungsflächen ausgedehnt werden, das Bewässerungswasser aber sinkt.

Für das ECHAM- und HADCM-Szenario ergeben sich deutliche Unterschiede. Im ECHAM-Szenario zeigen sich zum Teil hohe

Rückgänge der *Erträge des unbewässerten Anbaus*, die von einer sehr hohen Variabilität begleitet sind. Ab 2025/2030 verstärken sich die Ertragsverluste erheblich. Abbildung 6.15e verdeutlicht dies für die Erträge von Bohnen. Ursächlich sind die Auswirkungen der niedrige-

ren Niederschläge, die auf die Landwirtschaft durchschlagen. In den beiden anderen Szenarien zeigen sich ebenfalls hohe Variabilitäten für die Erträge unbewässert angebaute Pflanzen (vgl. Abb. 6.15e). Je nach Pflanze liegt der

Pflanzen	Produktion ECHAM		Produktion HADCM		Ertrag ECHAM		Ertrag HADCM	
	unbew.	bew.	unbew.	bew.	unbew.	bew.	unbew.	bew.
Bananen	-53	-24	17	-1	-53	-21	17	-4
Baumwolle	-40	-15	16	23	-40	-36	16	-8
Bohnen	-22	2	13	49	-23	-10	13	1
Cashew	-51	19	10	78	-53	-19	11	-8
Kokosnuss	-21	13	4	72	-21	-17	4	0
Mais	-29	26	14	69	-30	-12	14	-1
Mango	-55	-14	16	17	-55	-34	16	-12
Maniok	-14	-	12	-	-14	-	12	-
Melonen	-12	4	11	35	-12	-19	11	-7
Reis	-33	-12	11	8	-33	-7	12	-6
Tomate	-23	47	23	20	-23	-20	23	-10

Tabelle 6.12: Trends [%] der Änderungen der Erträge und Produktion der unbewässert und bewässert angebauten Pflanzen. Vergleich der Simulationen von zwei Klimaszenarien über den Zeitraum 2001-2050.

Trend des Rückgangs der Erträge im ECHAM-Szenario zwischen -12% und -55%, was verglichen mit dem Trend im Niederschlag von -24% eine Verstärkung um den Faktor 0.5 bis 2 bedeutet. Ein ähnlicher Verstärkungsfaktor zeigt sich im HADCM-Szenario. Hier stehen Änderungen von 4% bis 23% dem Trend im Niederschlag von 10% gegenüber. Vergleicht man diese Zahlen mit den Auswirkungen, die die Niederschlagsraten auf die hydrologischen Variablen haben (Faktor 2-3 für den Abfluss, vgl. Kapitel 6.2.7.1), so ist eine Abschwächung der Folgewirkungen feststellbar.

Die zeitlichen Änderungen der *bewässerten Produktion* sind durch eine geringere Variabilität gekennzeichnet. Abbildung 6.15d zeigt dies exemplarisch anhand der Produktion von Baumwolle. In beiden Szenarien steigt die Produktion zunächst an, was auf die Zunahme der Bewässerungsflächen zurückzuführen ist. Im ECHAM-Szenario beginnt die Produktion ab 2025 aufgrund der geringeren Wasserverfüg-

barkeit zu sinken, wogegen in HADCM eine Produktion auf dem nach den Anstieg höheren Niveau bei weitestgehend gleichbleibender Erfüllung des Bewässerungsbedarfs gewährleistet bleibt (vgl. Abb. 6.14d). Dieses bestätigt sich auch wenn der gesamte Trend innerhalb der Periode 2001-2002 betrachtet wird (vgl. Tabelle 6.12).

Die *bewässerten Erträge* unterliegen den gleichen Einflüssen. Durch die steigende Bewässerungsfläche sinken sie bei rückläufiger (ECHAM) oder konstantbleibender (HADCM) Erfüllung des Bewässerungswasserbedarfs im ECHAM-Szenario und ändern sich wenig im HADCM-Szenario (vgl. Tabelle 6.12).

Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Auswirkungen der Änderungen zeigt der Vergleich der Szenarien für die Erträge von Mais das Muster mittelfristig steigender Erträge im HADCM-Szenario und sinkender Erträge im ECHAM-Szenario, die aber nicht in allen Regionen gleich groß sind (vgl. Abb. 6.15a). Auf-

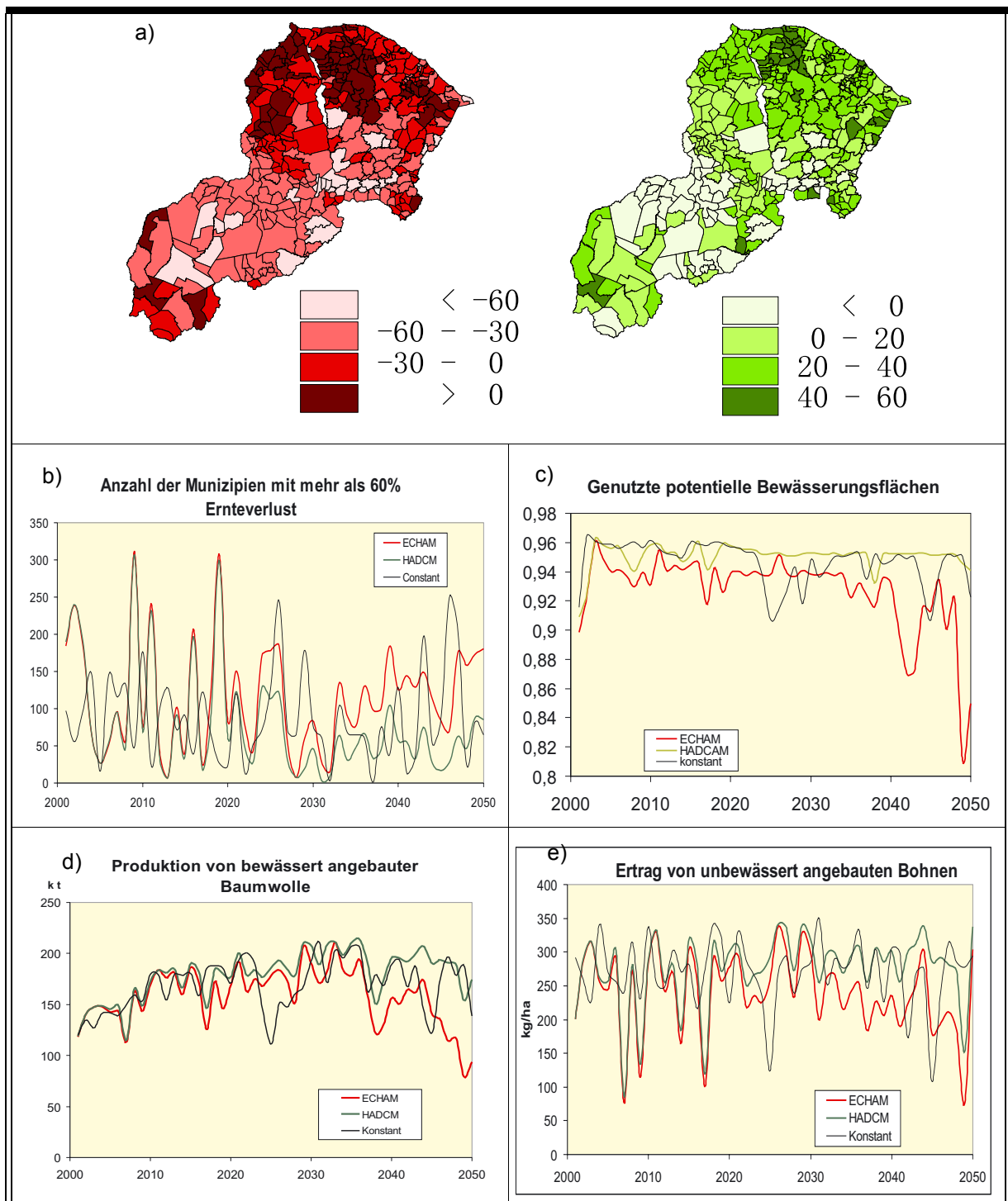


Abb. 6.15 Landwirtschaftliche Auswirkungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation mit Eingabedaten entsprechend des Referenzszenarios A (vgl. Kapitel 6.3) und der ECHAM- und HADCM-Klimaszenarios. a) Änderungen des Trends [%] von Erträgen von Mais, b) Zahl der Munizipien mit hohen Ernteverlusten (Gesamtzahl 332), c) Anteil der genutzten Bewässerungsfläche bezüglich der potentiell zur Verfügung stehenden Fläche, d) Produktion bewässert angebaute Baumwolle, e) Ertrag unbewässert angebaute Bohnen

fällig ist dabei, dass die Küstenregion in beiden Szenarien die positivste Tendenz aufweist; hier steigen die Erträge im HACDCM-Szenario am stärksten bzw. sinken die Erträge im ECHAM-Szenario am geringsten. Dagegen sind im ECHAM-Szenario starke Rückgänge der Erträge für das rurale Hinterland feststellbar, insbesondere für die trockene Region in der Mitte des Untersuchungsgebiets. Auch im HACDCM-Szenario sinken dort die Erträge oder steigen nur leicht. Diese Regionen profitieren also nicht von der Zunahme der Niederschläge im HACDCM-Szenario (vgl. Abb. 6.15a).

Die Erträge und die hohe anhaltende Variabilität haben einen Einfluss auf die Zahl der Munizipien, die Ernteverluste von mehr als 60% aufweisen (Abb. 6.15b). Diese Verlustrate ist ein Kriterium, dass erfüllt sein muss, damit ein Munizip zum Nothilfemunizip erklärt und mit Transferleistungen unterstützt wird. Die Anzahl dieser Munizipien nimmt im ECHAM-Szenario ab dem Jahr 2025 zu. Im HACDCM-Szenario zeigt sich dagegen eine Verringerung sowohl der Variabilität als auch der Gesamtzahl der Munizipien. Diese Entwicklung ist auf verbesserte klimatische Bedingungen und die dadurch steigenden Erträge zurückführbar.

Die Fläche, die zur Bewässerung zur Verfügung steht, wird nur in dem Umfang genutzt, wie es die aktuelle Situation bezüglich des gespeicherten Wassers zulässt. Halbjährlich wird überprüft, wieviel gespeichertes Wasser vorhanden ist und daraus die tatsächlich bewässerte Fläche errechnet (vgl. Kapitel 4.4.1). Bei der Analyse dieses Zusammenhangs zeigte sich (Kapitel 6.2.2.4), dass dieses Vorgehen in einigen Regionen notwendig ist, um große Ertragsverluste zu vermeiden.

Abb. 6.15c beschreibt das Verhältnis zwischen den aktuellen und potentiellen Bewässerungsflächen. In allen Szenarien zeigt sich ein Rückgang der tatsächlich genutzten Flächen, der im ECHAM-Szenario am stärksten ausfällt. Dies legt die Vermutung nahe, dass der Trend

der Wasserverknappung die gespeicherten Wasservolumina so stark reduziert, dass es nicht mehr möglich ist, Bewässerungsflächen ausreichend zu bewässern, und dass die weitere Einrichtung von Bewässerungsflächen keine sinnvolle Strategie der landwirtschaftlichen Entwicklungsplanung sein kann.

Betrachtet man die zeitlichen Entwicklungen so ist feststellbar, dass sich im Vergleich der Klimaszenarien wie bei der Hydrologie deutliche Änderungen gegenüber dem Szenario ohne Änderungen in der Regel nur für das ECHAM-Szenario ergeben. In dem HACDCM-Szenario zeigen sich nur leichte Änderungen, die teilweise durch die hohe Variabilität überlagert werden.

6.2.7.3 Sozio-ökonomische Entwicklung

Die sozio-ökonomischen Variablen befinden sich am Ende der beschriebenen kausalen Wirkungskette. Klimaänderungen machen sich hier indirekt durch andere Einflussfaktoren bemerkbar. Die im ECHAM-Szenario ermittelten Rückgänge der durchschnittlichen Erträge führen zu erheblichen Einbußen an verfügbarem Einkommen der Bewohner, was ihre Lebensqualität negativ beeinflusst. In Folge erhöht sich die Migration aus den betroffenen Regionen, weil der Einkommensunterschied zu den weniger von der Landwirtschaft abhängigen Regionen wie z.B. Fortaleza größer wird.

Die Auswirkungen der Klimaänderung auf das Agrar-BIP bzw. landwirtschaftliche Einkommen können nicht in absoluten Zahlen quantifiziert werden, da die Annahmen hinsichtlich der landwirtschaftlichen Preise und Kosten mit zu großen Unsicherheiten behaftet sind. Dennoch lassen sich die Auswirkungen in den Szenarien miteinander vergleichen. Danach fällt der Anstieg des Agrar-BIP im ECHAM-Szenario um jährlich 1.4% geringer aus als im HACDCM-Szenario. Zu erkennen ist auch, dass das Agrar-BIP in beiden Szenarien einer hohen jährlichen

Variabilität unterliegt, die auf die Variabilität der Niederschläge und die damit verbundene Variabilität der Erträge zurückzuführen ist.

Diese schlägt sich auch in der Höhe der Migration nieder. In Abb. 6.16 wird die Migration aus dem Sertão dargestellt. Hier zeigen sich eine hohe Variabilität und nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Klimaszenarien. Klare Trends sind nicht erkennbar. Betrachtet man die absolute Anzahl der Migranten, so ist zu beachten, dass die Simulationsergebnisse eine sehr große Unsicherheit aufweisen (vgl. Kapitel 6.2.4).

Zusätzlich sind die Auswirkungen von Nothilfeprogrammen auf die Migrationsprozesse abgebildet. Die von wesentlichen Ernteausfällen betroffenen Munizipien erhalten durch Nothilfeprogramme finanzielle u.a. Hilfen in beträchtlichen Umfang. Nothilfeprogrammen kommt daher eine wichtige Bedeutung im Untersuchungsgebiet zu.

Wie aus Abb. 6.16 ersichtlich wird, haben diese Programme einen deutlichen Einfluss auf die Migrationsprozesse anhand der Anzahl der Migranten aus dem Sertão (Szenarioregionen in Piauí und Ceará mit potentiell viel und wenig Wasserressourcen): Diese gehen stärker zurück und verlaufen weniger variabel als in den Szenarien ohne Nothilfeprogramme. Die Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass Not-

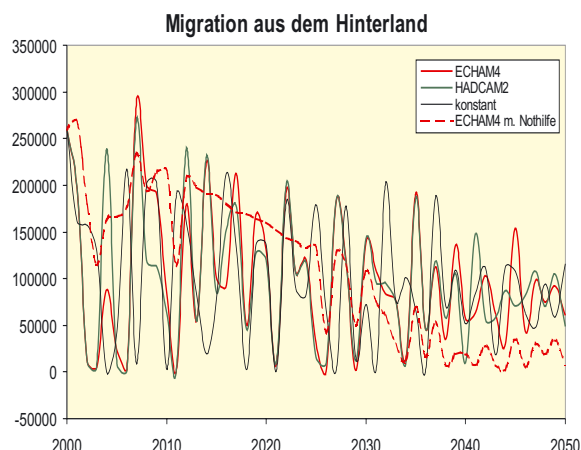


Abb. 6.16 Soziologische Auswirkungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation mit Eingabedaten entsprechend des Referenzszenarios A (vgl. Kapitel 6.3) und der ECHAM- und HADCM-Klimaszenarien sowie des konstanten Klimaszenarios: Anzahl der Migranten aus dem Sertão und Einfluss der Nothilfeprogramme, die ab 2001 gestartet werden.

hilfeprogramme eine geeignete Strategie zur Vorbeugung von Migrationsprozessen sind. Allerdings liegt der Beschreibung im Modell nur eine vereinfachte Annahme zugrunde, dass sich die Höhe der Nothilfeprogramme durch die Differenz von aktuellem und durchschnittlichen Pro-Kopf-Einkommen der letzten Jahre bestimmt. Somit ist das quantitative Ergebnis gering belastbar.

6.3 Referenzszenarien

6.3.1 Charakterisierung der Referenzszenarien

Szenarien dienen dazu, plausible und widerspruchsfreie mögliche Entwicklungspfade von Systemen unter Verwendung hypothetischer Annahmen abzubilden. Um aussagekräftige Ergebnisse generieren zu können, müssen mögliche Entwicklungspfade zunächst qualitativ beschrieben und dann die wichtigsten treibenden

Kräfte quantifiziert werden, wofür es Modellrechnungen bedarf. Andererseits benötigen diese Modelle Inputvariablen, d.h. Quantifizierungen der treibenden Kräfte, die aus Szenarioannahmen gewonnen werden.

Szenarien liefern verdichtete Beschreibungen möglicher Entwicklungen und verbessern die Abschätzbarkeit der Folgen von Handlungen. Sie erhöhen die Möglichkeit, das Modell auf Stärken und Schwächen zu testen und

eine weitere Feinabstimmung und Fehlerkorrektur zu betreiben. Szenarien können in Referenz- und Interventionsszenarien unterschieden werden. In Referenzszenarien werden mögliche Entwicklungspfade im Untersuchungsgebiet dargestellt. In Interventionszenarien wird die Wirkung und Wirksamkeit von Maßnahmen zur Beeinflussung dieser Entwicklungspfade simuliert, die durch die Referenzszenarien als Rahmen vorgegeben sind.

Im Rahmen des Waves-Projektes wurden für Ceará und Piauí zwei Referenzszenarien (im folgenden abgekürzt als RS A und RS B) für den Zeitraum von 1996 bis 2025 erstellt. Dies erfolgte in der Szenariengruppe des WAVES-Projektes, an der Mitglieder aus allen Teilprojekten teilnahmen, und in Zusammenarbeit mit brasilianischen Behörden, vor allem dem Planungsministerium SEPLAN und dem Wasserministerium SRH von Ceará, deren Beteiligung als Adressaten der Szenarienergebnisse und als potentielle Anwender des Modells wichtig war (für einen Überblick über die Methode der Szenarioanalyse und die Entwicklung der Referenzszenarien in WAVES vgl. DÖLL ET AL., 2003A).

Um den Einfluss globaler Wandelprozesse abzubilden, wurden RS A und RS B aus zwei globalen Szenarien des *Special Report on Emission Scenarios* im Rahmen des dritten Berichts des IPCC abgeleitet. RS A entspricht dem globalen Szenario A1, RS B dem globalen Szenario B2 (NAKICENOVIC UND SWARTZ, 2000). Für die Beschreibung der Entwicklung der Szenarien wurde das Untersuchungsgebiet in die acht Szenarioregionen eingeteilt. Kriterien für die Abgrenzung der Regionen waren vergleichbare agrarökonomische und naturräumliche Rahmenbedingungen sowie administrative Grenzen (Abschnitt 4.2.1.1, Abb. 4.2).

Referenzszenario A

Die Rahmenbedingungen der Entwicklung im RS A mit dem Titel „Küstenboom und Cash-

Crops“ sind eine beschleunigte ökonomische Globalisierung mit hohen weltweiten Wachstumsraten, sich rasch ausbreitenden technologischen Innovationen, steigender Inlandsnachfrage und hohen Auslandsinvestitionen. Es kommt zu einem starken ökonomischen Wachstum im Industrie- und Dienstleistungssektor, das sich auf die Küstenregionen konzentriert. Der Trend der Förderung der Produktion von *Cash-Crops* hält an; vor allem in Gegenden mit einer guten Verfügbarkeit von Wasser für Bewässerungszwecke dominiert die Produktion durch große Betriebe gegenüber der Subsistenzwirtschaft kleiner Betriebe. Dies wird durch eine starke Ausrichtung des Agrarsektors auf den gesamtbrasilianischen Markt und den Weltmarkt begleitet. Die maßgeblichen politischen Entscheidungen werden nach wie vor auf zentralstaatlicher Ebene getroffen.

Referenzszenario B

Die Rahmenbedingungen der Entwicklung im RS B mit dem Titel „Dezentralisierung und Integrierte Regionalentwicklung“ sind eine gebremste ökonomische Globalisierung mit moderaten weltweiten Wachstumsraten, niedrigen Diffusionsraten technologischer Innovationen, schwacher Inlandsnachfrage und geringen Auslandsinvestitionen.

Entsprechend ist die Gesamtentwicklung stark an der lokalen Ebene orientiert. Regionalstädte mit einer verbesserten Infrastruktur prosperieren und bieten Märkte für lokale und regionale Produkte. Es kommt zu einer verstärkten Entwicklung sekundärer Industriezweige in den regionalen Mittelzentren. Gleichzeitig zur Einstellung der Förderung von Cash-Crops nimmt die Zahl kleinflächiger landwirtschaftlicher Betriebe und die Vielfalt von Formen der außerlandwirtschaftlichen Erwerbstätigkeit im Hinterland zu. Die nachhaltige Landbewirtschaftung erfährt in Krisengebieten eine verstärkte Förderung durch internationale Organisationen. Ceará und Piauí haben einen hohen

Grad an politischer Autonomie gegenüber der zentralstaatlichen Ebene.

Treibende Kräfte der Entwicklung in den beiden Referenzszenarien

Die wichtigsten treibenden Kräfte in den Szenarien sind (DOELL ET AL. 2003A):

- Bevölkerungsentwicklung,
- BIP pro Kopf,
- Bewässerungsflächen,
- potentielle landwirtschaftliche Nutzflächen,
- Bau neuer Stauseen,
- Klimaänderung,
- Anzahl und Größe der landwirtschaftlichen Betriebe und
- Urbanisierungsgrad.

Grundlage für die Quantifizierung war der Ist-Zustand (1996) und die historische Entwicklung auf regionaler Ebene, auf Landesebene, auf der Ebene von ganz Brasilien und auf der Ebene von ganz Lateinamerika. Unterhalb der regionalen Ebene fanden keine Definitionen statt; hier wurde angenommen, dass sich die Größen innerhalb einer Region homogen verändern. Nachfolgend werden die Eingabegrößen beschrieben. Die Beschreibung der Eingabegröße Klima wurde wegen ihrer hohen Bedeutung gesondert in Kapitel 6.2.6 dargestellt.

Bevölkerungswachstum: Das Bevölkerungswachstum ist in beiden RS gleich groß. Insgesamt steigt die Bevölkerungszahl im Untersuchungsgebiet bis zum Jahr 2025 von 9.5 auf 11.9 Mio. Menschen. Im RS A zeigt sich ein starker Anstieg der Bevölkerung an den Küsten und in den Hauptstädten, im RS B sinkt die Anzahl der Migranten aus dem Hinterland.

BIP pro Kopf: Im RS A wächst das BIP pro Kopf bis zum Jahr 2025 mit Wachstumsraten von 2.7% p.a., in RS B mit Raten von 2.2% p.a. Der Anteil der Landwirtschaft am BIP bleibt in Ceará konstant bei 7%, wogegen der Anteil des Dienstleistungssektors von 68% auf 74% in RS A bzw. 71% im RS B steigt. In Piauí gewinnt der Agrarsektor an Bedeutung (14% im RS A und 18% im RS B gegenüber 13%

gegenwärtig); der Anteil des Industriesektors bleibt konstant bei 21%.

Bewässerungsflächen: Die Zahl der Bewässerungsflächen wächst im RS A um 3.8% p.a. und in RS B um 2.5% p.a. Im RS A steigt bei einer vollständigen Realisierung aller geplanten Bewässerungsprojekte die Flächengröße auf 161000 ha in 2025. Im RS B wird nur ein Viertel aller öffentlichen Bewässerungsprojekte umgesetzt. Die Flächengröße steigt auf 112000 ha in 2025. In beiden RS nimmt die Zahl privater Bewässerungsprojekte zu.

Potentielle landwirtschaftliche Nutzflächen: Im Untersuchungsgebiet steigt die Gesamtfläche von 5.6 Mio. ha in 1996 auf 7.25 Mio. ha in 2025 (RS A) bzw. 7.45 Mio. ha (RS B). In RS A nimmt die Zahl großer Betriebe zu, in RS B die Zahl kleiner Betriebe. Der Anstieg konzentriert sich in RS A auf die Küstenregionen und den Großraum Fortaleza und in RS B auf die Regionen mit geringerer Wasserverfügbarkeit. Gegenden mit hoher Wasserverfügbarkeit werden in beiden RS für die landwirtschaftliche Produktion bevorzugt.

Bau neuer Stauseen: Für Piauí wurde die Konstruktion neuer großer Stauseen ($>50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) nicht berücksichtigt; die Szenarien beziehen sich auf Ceará. Bei gleichbleibenden Investitionen (8 Mio. R\$ p.a) werden bis 2025 51 größere Stauseen mit einer zusätzlichen Stauungskapazität von $3150 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gebaut. Zusätzlich wird der Bau weiterer kleiner Stauseen mit einer jährlichen Wachstumsrate von 0.042 angenommen. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Reihenfolge des Baus der Stauseen.

Größe der landwirtschaftlichen Betriebe: Im RS A gewinnen die Großbetriebe ($>100\text{ha}$) an Bedeutung, im RS B eher die mittleren Betriebe ($<100\text{ha}$). Die Zahl der kleinen Betriebe ($<10\text{ha}$) ist in beiden Szenarien rückläufig.

Urbanisierungsgrad: In beiden Szenarien ergibt sich ein mittlerer Urbanisierungsgrad von 78%, entsprechend einer konstanten jährlichen

Zunahme um 0.6% bei einer gleichzeitigen Abnahme des Anteils der ländlichen Bevölkerung um 1.5%. Dass es zu keinen größeren Unterschieden in beiden Szenarien kommt, ist auf die relativ niedrig definierte Urbanisierungsschwelle zurückzuführen.

6.3.2 Auswirkungen der Referenzszenarien

Die Simulation der Referenzszenarien ergab eine Vielzahl von Ergebnissen. Die Abbildungen 6.17-6.19 stellen wichtige Beispielergebnisse von aus allen Teilbereichen zusammengefassten Läufen mit dem Klimaszenario dar, das auf ECHAM basiert. Einige der Darstellungen folgen den Darstellungen, die in der Arbeitsgruppe gemeinsam durchgeführt wurden.

Ein Vergleich der drei Klimaszenarien erfolgt hier nicht. Da, wie im Kapitel 6.2.7 abgeleitet, die Auswirkungen der möglichen Klimaänderungen erst nach 2025 sichtbar werden und der Zeitraum der Referenzszenarien nur bis 2025 geht, wurde vermutet, dass dies auch bei der Anwendung mit Szenario B der Fall ist. Es wurden Vergleiche durchgeführt, die diese Annahme bestätigten.

Bei den Berechnungen ergab sich das Problem, dass im WAVES-Projekt die Klimaszenarien ab dem Jahre 2001 hergeleitet, die Referenzszenarien jedoch ab dem Referenzjahr 1996 definiert wurden. Dieses Jahr diente als Basisjahr innerhalb des WAVES-Projektes; zudem war für dieses Jahr eine breite Datenbasis verfügbar, die als Ausgangspunkt für die Quantifizierung der treibenden Kräfte diente. Somit erfolgten die Berechnungen aus einer Kombination der historischen rekonstruierten Klimadaten und der simulierten Daten des ECHAM-Klimaszenarios.

Unter Umständen problematisch ist bei diesem Vorgehen, dass die Ableitung der Klimaszenarien auf den langjährigen Datenreihen für den Zeitraum 1921-1980 beruht (vgl. ausführli-

che Diskussion im Kapitel 6.2.7). Um der Problematik gerecht zu werden, wurde der Vergleich von Änderungen oder Trends, sofern er vorgenommen wurde, innerhalb der Simulationszeiträume für die Periode 2001-2025 durchgeführt. Außerdem müssen Änderungen der ersten Simulationsjahre nicht unbedingt auf Auswirkungen der Referenzszenarien zurückgeführt werden. Da hier die Unterschiede in den Auswirkungen der Referenzszenarien dargestellt werden, ist diese Beschränkung unproblematisch.

Im Folgenden werden die Unterschiede zwischen den Referenzszenarien A (RS A) und B (RS B) dargestellt. Da für die Simulation der Szenarien teilweise dieselben Indikatoren und Outputvariablen verwendet wurden wie bei der Simulation der Klimaszenarien, werden sie an dieser Stelle nicht noch einmal beschrieben, um Doppelungen zu vermeiden.

6.3.2.1 Hydrologie

Für die gespeicherten Wasservolumina der Stauseen zum Ende der Regenzeit sind für RS A und RS B keine Unterschiede feststellbar (Abb. 6.17a). Die Differenz in der Wasserentnahme in beiden Szenarien (Abb. 6.17b) macht sich nur auf einer lokalen Ebene bemerkbar und wirkt sich nicht wesentlich auf das gespeicherte Wasservolumen aller Staussen im Untersuchungsgebiet aus. Ein größerer Einfluss zeigt sich nur für die kleinere Stauseen (vgl. Kapitel 6.2.3.1). Das Wasservolumen eines Stausees ist durch die klimatischen und hydrologischen Randbedingungen definiert.

Die Wasserentnahme steigt in beiden Szenarien an, zum einen durch die erhöhte Wasserverfügbarkeit und zum anderen durch den erhöhten Wasserbedarf (Abb. 6.17b). Der Wasserbedarf erhöht sich insbesondere durch die Erweiterung der Bewässerungsflächen, die gleichzeitig den größten Anteil der Wassernachfrage ausmachen, und weiter durch das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, die

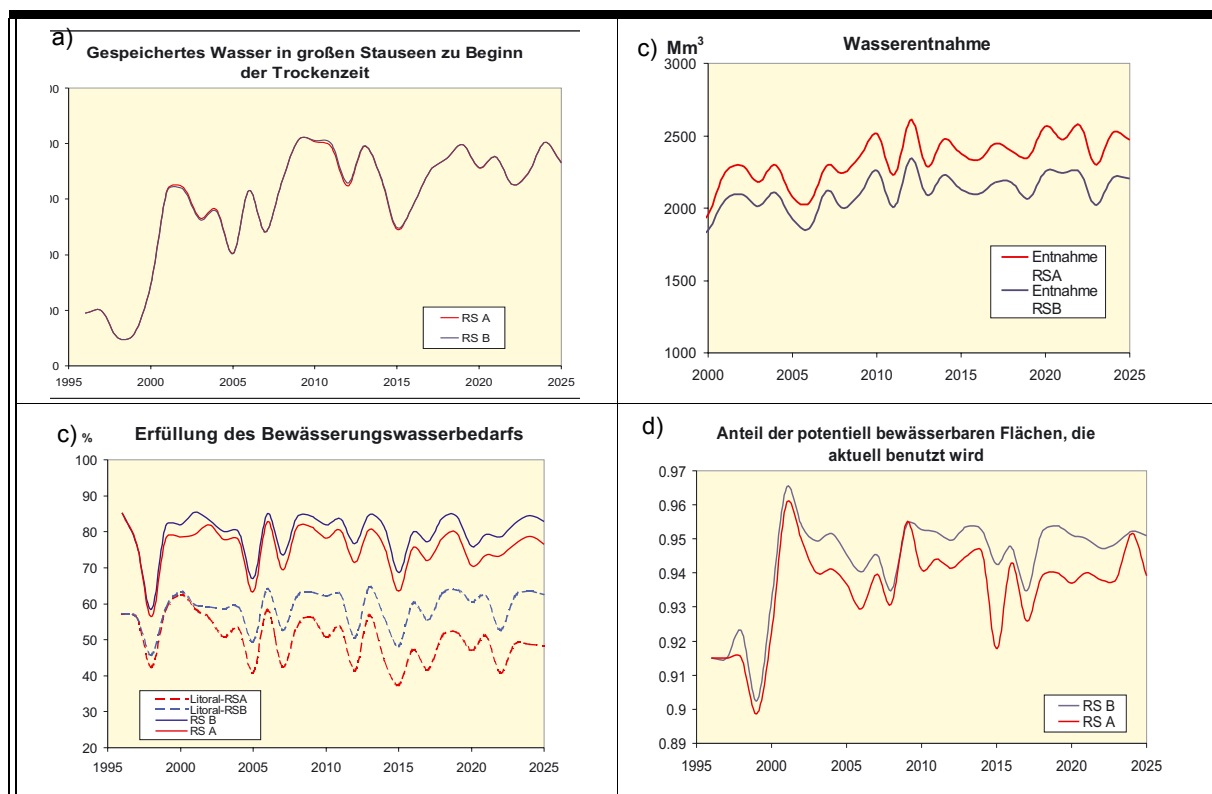


Abb. 6.17 Auswirkungen der unterschiedlichen Referenzszenarien im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation der Referenzszenarien A und B (vgl. Kapitel 6.3.1) mit dem Klimaszenario ECHAM: a) gespeichertes Wasser in großen Stauseen ($> 50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) zum Ende der Regenzeit, b) Wasserentnahme, c) Erfüllung des Wasserbedarfs der Bewässerungslandwirtschaft, d) Anteil der potentiell bewässerten Anbauflächen, die tatsächlich benutzt werden.

als Einflussfaktoren aber weniger ins Gewicht fallen. Die Zunahme der Wasserentnahme wird u.a. durch den Anstieg der gespeicherten Wasservolumina der Stauseen bedingt. Der Unterschied in der Wasserentnahme ist mit dem Umstand zu erklären, dass die Wassernachfrage im RS A aufgrund der größeren Erweiterung der Bewässerungsflächen gegenüber RS B höher ausfällt.

Abbildung 6.17c gibt die Erfüllung des Wasserbedarfs der Bewässerungslandwirtschaft während der Trockenzeit wieder. Da die Wasserversorgung der privaten Haushalte und der Viehhaltung Vorrang beim Wassermanagement hat, ist die Bedarfsdeckung hier auch abhängig von der Wassernachfrage dieser Sektoren. Im RS A zeigt sich ein leichter Abwärtstrend, der durch die stärker steigende Anzahl von Bewässerungsflächen erklärbar ist, deren

Bedarf nicht erfüllt werden kann. Im RS B ist ein Trend nicht erkennbar. Die jährliche Variabilität der Klimaschwankungen ist aber prägnanter als die Unterschiede zwischen RS A und RS B. Regional ergeben sich größere Unterschiede, was im Zusammenhang mit der jeweiligen Ausdehnung der Bewässerungsflächen vor Ort steht. Besonders geringe Erfüllungsquotienten sind für Süd-Piauí und die Küstenregion feststellbar. Gleichzeitig zeigen sich in der regionalen Betrachtung größere Differenzen zwischen RS A und RS B.

Die Unterschiede zwischen RS A und RS B hinsichtlich der Erfüllung des Bewässerungswasserbedarfs fallen noch größer aus, wenn die tatsächlich genutzten Bewässerungsflächen in die Betrachtung mit einbezogen werden. Abbildung 6.17d verdeutlicht, dass im RS A nach einer starken Erhöhung der Flächen zu

Beginn der Szenarioperiode, aufgrund der gestiegenen Wasserverfügbarkeit (vgl. Abb. 6.17a), die Anzahl der tatsächlich bewässerten Flächen rückläufig ist. Die Strategie einer starken Erhöhung der Anzahl der Bewässerungsflächen, die im RS A verfolgt wird, erscheint daher nicht sinnvoll.

In RS A und B wird angenommen, dass die Summe der Investitionsmittel für Staudamm-bau konstant hoch bleibt (8 Mio. R\$). Die Auswirkungen einer Konstanthaltung werden in Abbildung 6.18 anhand der Entwicklung der gespeicherten Volumina der großen Stauseen in Ceará dargestellt (DÖLL ET AL., 2003B). Eine Erhöhung der Investitionsmittel führt zu einer Steigerung der gespeicherten Volumina. Gerade in den trockenen Jahren, in denen sich der Wasserbedarf erhöht, bleiben die gespeicherten Wasservolumina aber gleich groß.

Die Unterschiede zwischen den beiden Referenzszenarien beruhen auf einer unterschiedlichen Reihenfolge des Baus der Stauseen.

Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass die Schwelle, ab der die Effizienz neuer Stauseen sinkt, fast erreicht ist. Werden die Auswirkungen auf die Erfüllung des Wasserbedarfs betrachtet, so ergeben sich durch eine Halbierung der Investitionsmittel nur geringe Unterschiede. Dieses Ergebnis ist im engen Zusammenhang mit der Wassernutzung zu sehen. Wird z.B. die Bewässerungsfläche und die Anzahl der Nutzer konstant gehalten, so sind weitaus höhere Effektivitätsraten der neu gebauten Stauseen feststellbar (GÜNTNER, 2002).

Auch der Bau kleinerer Stauseen im Oberlauf von größeren Stauseen beeinflusst das Ergebnis stark.

6.3.2.2 Landwirtschaft

Die Erträge unbewässert angebaute Pflanzen sind fast ausschließlich durch die klimatischen Rahmenbedingungen bestimmt, die in beiden Szenarien gleich sind. Lediglich durch

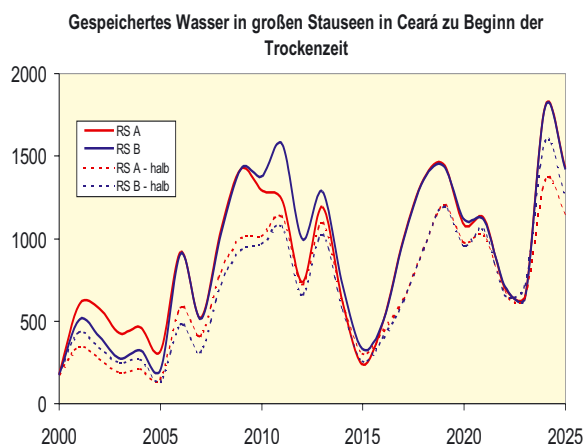


Abb. 6.18 Zusätzlich gespeichertes Wasser durch die nach 1996 gebauten großen Stauseen zu Beginn der Trockenzeit in Ceará. Vergleich zwischen dem Beibehalt der Investitionskosten und der Halbierung der selbigen.

Änderung der Betriebsflächen und daraus resultierenden Veränderungen der Flächenanteile entstehen leichte Verschiebungen. Deswegen ergibt der Vergleich von RS A und RS B vernachlässigbare Unterschiede. Ähnlich geringe Unterschiede sind auch für die Munizipien mit hohen Ernteverlusten feststellbar, die massgeblich durch den Verlust bei unbewässert angebauten Pflanzen bestimmt sind. Ein Trend bis 2025 ist nicht erkennbar, sondern nur eine anhaltend hohe Variabilität (vgl. Abb. 6.19a und Abb. 6.15).

Für die Ergebnisse der bewässerten Produktion sind die Einflüsse der Szenarienannahmen dominant. Klimatisch bedingte Änderungen sind nicht erkennbar; von vorrangiger Bedeutung sind die Änderungen der Bewässerungsflächen (vgl. Kapitel 6.2.2.4). im Kontext der Erfüllung des Wasserbedarfs. Die Produktion steigt in beiden Szenarien für die meisten Pflanzen an (vgl. Tabelle 6.13, Abb. 6.19b). In Einzelfällen kann es aufgrund von Koppel-effekten der Flächenverteilung und Konzentration auf Munizipien mit hoher Wasserknappheit auch zu einem leichten Rückgang kommen.

Der Vergleich der Szenarien ergibt fast durchgängig stärkere Anstiege der Produktion

Pflanzen	Prod RSA	Prod RSB	Ert. RSA	Ertr. RSB
Bananen	21	-7	-8	4
Baumwolle	24	26	-14	0
Bohnen	67	36	-7	-4
Cashew	78	58	-22	-16
Kokosnuss	61	72	0	1
Mais	65	36	-14	-11
Mango	39	36	-17	-9
Melonen	-3	2	-17	-6
Reis	16	29	-15	-5
Tomate	11	8	2	4

Tabelle 6.13: Trend der Änderungen der bewässerten Erträge und der Produktion für zwei Referenzszenarien für den Zeitraum 2001-2025.

im RS A. Die Erträge der bewässert angebauten Pflanzen sinken dagegen mehrheitlich im RS A und fast vollständig im RS B, weil das verfügbare Wasser nun für die Bewässerung einer größeren Anzahl von Flächen verwendet wird.

6.3.2.3 Sozio-ökonomische Entwicklung

Die Bevölkerungsentwicklung wird gleichzeitig vom Modell errechnet und als Szenarioannahme definiert. Diese Entwicklung der Gesamtbevölkerung ist somit als Szenarioeingabe vorgegeben. Das Modell ist in der Lage, diese gut wiederzugeben.

Das Einkommensgefälle zwischen Stadt und Land verschärft sich in Dürrejahre und beschleunigt Migrationsprozesse. Die Auswirkungen in den einzelnen Szenarioregionen zeigt Abbildung 6.19c anhand der Rate der kumulativen Migration. Deutlich sind Prozesse der Abwanderung aus den ländlichen Regionen in die Städte zu erkennen. Die Migrationsverläufe ähneln sich qualitativ in beiden Szenarien, unterscheiden sich quantitativ aber deutlich. So ist die Abwanderung aus dem Hinterland genauso

wie die Zuwanderung in die Städte, insbesondere die Hauptstadt von Ceará (Fortaleza) im RS A stärker als im RS B.

Noch einmal ist darauf zu verweisen, dass die absoluten Zahlen zu den Migrationsprozessen sehr unsicher sind (vgl. Kapitel 6.2.4). Eine Validierung dieser Daten konnte nur anhand von Daten weniger Jahre erfolgen (vgl. Kapitel 5.3.3).

Betrachtet man die Bevölkerungsentwicklung im Sertão (dieses Gebiet umfasst vier Regionen in Ceará und Piauí mit potentiell viel und wenig Wasser), so wird ein Rückgang der Bevölkerung im RS A und ein leichtes Wachstum der Bevölkerung im RS B sichtbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im RS B aufgrund der positiven wirtschaftlichen Entwicklung regionaler Zentren weniger Personen emigrieren.

Da das Agrar-BIP eine durchgängig hohe Variabilität aufweist und Angaben zu Preisen u.ä. sehr unsicher sind, ist eine Wachstumsrate nicht bestimmbar (vgl. Kapitel 6.2.7). Dennoch sind Unterschiede zwischen den Szenarien aufzeigbar: Im RS A wächst das Agrar-BIP um 0.8% pro Jahr schneller als im RS B. Allerdings fällt die regionale Verteilung der Zuwachsraten ungleich aus. Die Regionen im Hinterland profitieren nur wenig, sodass im RS A die Migration aus dem Hinterland in die Städte größer ist als im RS B.

Abschließend stellt sich aber die Frage, ob diese Prozesse überhaupt beeinflusst werden können. Unter Umständen erlauben die natürlichen Rahmenbedingungen, d.h. die Knappheit von Wasser und die geringe Fruchtbarkeit der Böden, keinen hohen Zuwachs der Bevölkerung im Hinterland, solange die Landbewirtschaftung dort die dominierende Form des Lebensunterhalts ist.

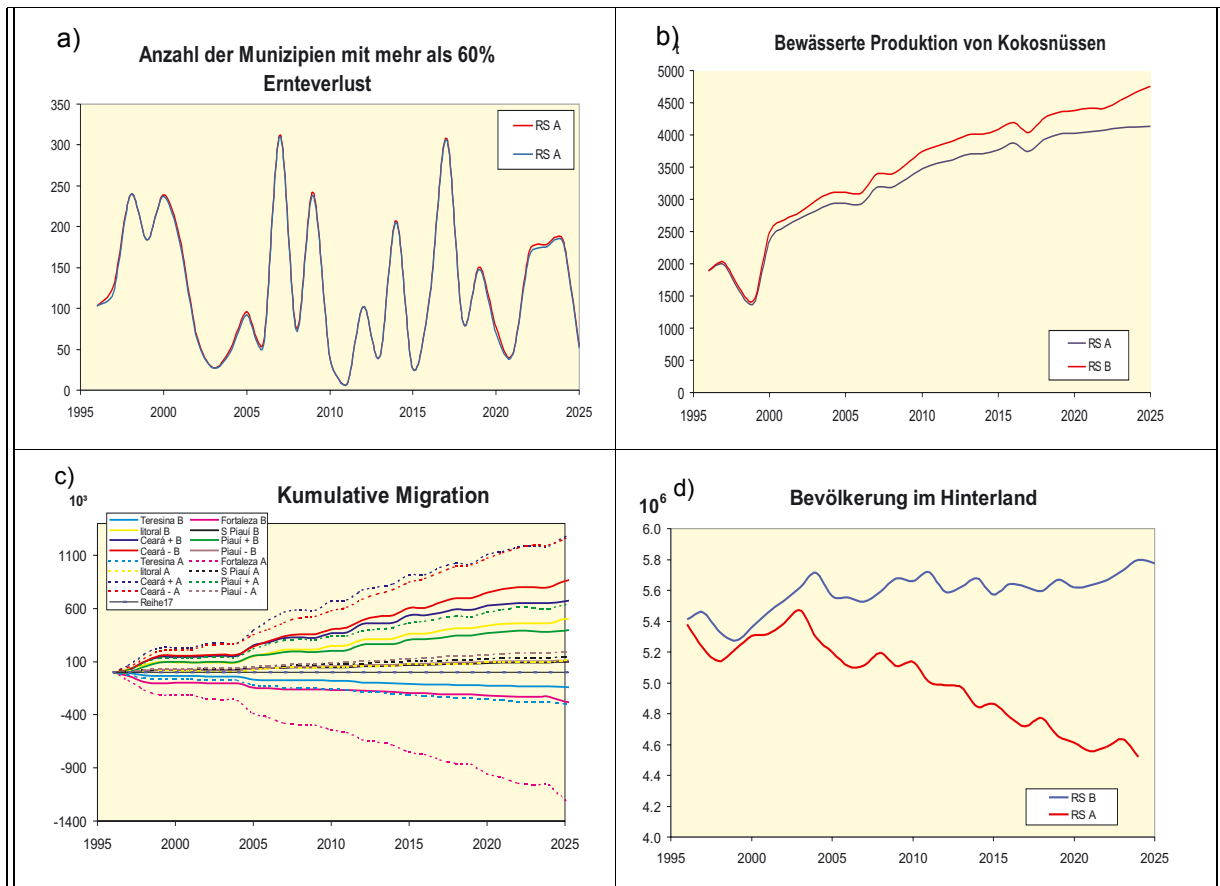


Abb. 6.19 Auswirkungen der unterschiedlichen Referenzszenarien im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der Simulation der Referenzszenarien A und B (vgl. Kapitel 6.3.1) mit dem Klimaszenario ECHAM: a) Bewässerte Produktion von Kokosnüssen, b) Anzahl der Munizipien mit mehr als 60% Ernteverlust, die Gesamtzahl beträgt 332, c) Bevölkerung im Hinterland, d) Kumulative Migration für die Regionen im Untersuchungsgebiet (durchgezogen: RS B, gestrichelt: RS A).

7.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

7.1.1 Modellzweck

Semi-aride Regionen sind durch knappe Wasserressourcen und einen steigenden Wasserbedarf gekennzeichnet. Sie sind deshalb besonders anfällig für Auswirkungen der Klimaänderung wie z.B. einen Rückgang der Niederschläge, der weitreichende Auswirkungen auf die Lebensbedingungen und die Lebensqualität in diesen Regionen haben kann, die durch eine hohe Unterentwicklung und Armut gekennzeichnet sind.

Für die Untersuchung der Auswirkungen der Klimaänderung sind dynamische integrierte regionale Modelle ein wichtiges Werkzeug, da sich mit ihnen die komplexen Wechselwirkungen von Natur und Gesellschaft ebenso gut abbilden wie Handlungsmaßnahmen testen lassen. Solche Modelle lagen für semi-aride Regionen bislang nicht vor. In dem deutsch-brasilianischen Verbundprojekt WAVES (*Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semi-arid Northeast of Brazil*) wurde deshalb das Semi-arid Integrated Model SIM entwickelt. Als Untersuchungsgebiet dienten die beiden Bundesstaaten Ceará und Piauí im semi-ariden Nordosten von Brasilien. Untersucht wurden mögliche Wechselwirkungen zwischen Klimaänderung,

Wasserverfügbarkeit, landwirtschaftlicher Produktion, Lebensqualität der ländlichen Bevölkerung und Migration.

Die vorliegende Arbeit umfasste in diesem Kontext folgende Schwerpunkte. Zum einem trug sie wesentlich zur Erstellung des Gesamtmodells bei, zum anderen validierte sie das Gesamtmodell und analysierte es auf Unsicherheiten. Weiterhin wurden Szenariorechnungen durchgeführt. Zielsetzung der Arbeit war eine Bewertung, wie gut das Modell die regionalen Systemprozesse einschließlich der Rückkopplungen abbildet (*Modellvalidierung*) und wie verlässlich die Modellergebnisse sind (*Modellanalyse*). Weiterhin sollten Abschätzungen hinsichtlich der Auswirkungen der Klimaänderung (*Modellanwendung*) getroffen werden. Die Ergebnisse werden im folgenden in jeweils einem Abschnitt zusammengefasst und bewertet. Ebenso wird der Verbesserungsbedarf des Modells analysiert (*Modellerweiterung*).

7.1.2 Modellkonzept

Aufbauend auf einer Literaturanalyse wurden zu Beginn der Arbeit Grundlagen der integrierten Modellierung und Handlungsempfehlungen zur Erstellung von Modellen diskutiert. Daraus fol-

gend wurde eine umfassende Systemanalyse, mit der die wichtigsten abzubildenden Prozesse identifiziert wurden, an den Anfang gestellt. Des weiteren galt es die Prozesse zu identifizieren, die das System beeinflussen, aber nicht vom System beeinflusst werden.

Für den Aufbau von SIM wurde eine modulare Struktur gewählt, die unterschiedliche disziplinäre Teilmodelle umfasst (die Klimaszenarien, das hydrologische Modell WASA, das landwirtschaftliche Modell YES, das Wassernutzungsmodell NoWUM, das Migrationsmodell MIGFLOW, das agrarökonomische Modell RASMO und das demographische Modell) und in einer dynamischen Betrachtungsweise miteinander verbindet. Externe treibende Kräfte gehen als Szenarioannahmen ein. Um die Spezifika disziplinärer Modelle wahren zu können, wurde kein einheitlicher Modellierungsansatz vorgegeben. Die Verknüpfung erfolgt über gut definierte Variablen und Schnittstellen, wobei teilweise verknüpfende Elemente zu entwickeln waren, um die Variablen in eine Beziehung zu einander zu setzen.

Das Modell rechnet deterministisch und in diskreten Zeitschritten. Es umfasst drei räumliche Skalen: Als kleinste räumliche Diskretionseinheit wurde allen Teilmodellen die Ebene des Munizips (kleinste räumliche Verwaltungseinheit) zu Grunde gelegt. Die räumliche Ausdehnung umfasst die beiden Bundesstaaten, was die Berechnung wichtiger Größen (z.B. landwirtschaftliche Produktion oder Migration) auf einer entscheidungsrelevanten Ebene ermöglicht. Zusätzlich wurde eine regionale Skala eingeführt. Die zeitliche Auflösung reicht je nach Modell von einem Tag bis zu zehn Jahren, der Zeitraum dagegen von 25 bis 50 Jahre. Dies ermöglicht die Analyse von Entwicklungen und Handlungsstrategien mit weitreichenden Auswirkungen in Szenarienstudien. Die Skalenverbindungen beruhen auf top-down- und bottom-up-Analysen einzelner wich-

tiger Prozessabläufe, die über die Teilmodelle in das Gesamtmodell einfließen.

7.1.3 Modellvalidierung

Integrierte Modelle erfassen viele unterschiedliche Prozesse. Der hohe Komplexitätsgrad erschwert in der Regel eine umfassende Validierung der Modelle, die durch fehlende oder qualitativ schlechte Daten weiter behindert werden kann. Dieses Problem zeigt sich auch für das SIM. Vergleichbare Tests können aber so lange durchgeführt werden, bis eine ausreichende Sicherheit dahingehend erreicht ist, dass der Modelloutput dem Modellzweck entspricht. Aufgrund der unzureichenden Qualität der verfügbaren Daten für das Untersuchungsgebiet wurden die Teilmodelle identifiziert, für die ein Vergleich der Beobachtungsdaten mit den simulierten Ergebnissen möglich ist. Dies ergab sich für das landwirtschaftliche Produktionsmodell, das hydrologische Modell und das sozio-kulturelle Modell. Eine weitergehende Untersuchung erfolgte durch Unsicherheitsanalysen.

Auf eine Kalibrierung der Teilmodelle wurde möglichst verzichtet, da ansonsten keine Daten für die Validierung übrig geblieben wären. Zudem sprach die geringe Qualität der Daten gegen eine Kalibrierung.

Für das maßgeblich in dieser Arbeit entwickelte **landwirtschaftliche Modell YES** ergab der Vergleich der simulierten Modellergebnisse mit erhobenen historischen Daten folgende Ergebnisse:

Die Wiedergabe des zeitlichen Verlaufs von jährlicher mittlerer Produktion und jährlichen mittleren Erträgen gelingt zumeist gut, wobei das Modell zu einer besseren Abbildung der Produktion tendiert und bei den Erträgen die unbewässert angebauten Pflanzen besser erfasst. Die Abweichungen bei den Erträgen sind zumeist kleiner als 20%, einige wenige belaufen sich auf bis zu 63%. Berücksichtigt man die

Abweichungen der Daten untereinander, die bis zu 15% betragen, ist dies ein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Abweichungen bei der Produktion fallen noch geringfügiger aus. Für die Bewertung der Erfassung des zeitlichen Verlaufs wurde die Korrelation zwischen den erhobenen Daten und den Simulationsergebnissen verglichen. Die Korrelationskoeffizienten liegen meist zwischen 0.4 und 0.9, wobei eine Betrachtung der qualitativ besseren Daten für die späteren Jahre oft höhere Werte ergibt, was für die Qualität des Modells spricht.

Die Korrelationskoeffizienten zeigen im Durchschnitt für trockene Jahre höhere Werte als für feuchte Jahre, wofür die bessere Prozessbeschreibung der wasserreduzierenden Einflussfaktoren ursächlich ist. Plötzliche Änderungen des Mittelwertes, der Variation in den Daten oder Ausreißerwerte werden vom Modell nicht erfasst. Da anzunehmen ist, dass diese Phänomene durch Fehler in den Datenreihen verursacht werden, ist dies aber nicht weiter problematisch.

Die prozentualen Unterschiede der Variationskoeffizienten zwischen den simulierten und erhobenen Werten für Produktion und Erträge bewegen sich zumeist in einer Größenordnung von $\pm 60\%$, sodass die interannuelle Variabilität des Klimas angemessen abgebildet wird. Für Ceará ergeben sich meistens bessere Ergebnisse als für Piauí, was auf die schlechtere Qualität der Daten für Piauí, vor allem zu Böden und Klima in Südpiauí, zurückzuführen ist.

Die **räumlichen Muster** auf regionaler Ebene werden sehr gut dargestellt. Es war nicht Ziel, auf kommunaler Ebene validierbare Ergebnisse zu bekommen. Dennoch ermittelt das Modell für einige Kulturpflanzen auch für diesen Bereich Korrelationskoeffizienten, von denen mehrere größer als 0.4 sind.

Die Validierung des in dieser Arbeit entwickelten landwirtschaftlichen Modells YES ergab eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den erhobenen Da-

ten. Erträge und Produktion von unbewässert angebauten Pflanzen pro Jahr lassen sich auf der regionalen Ebene angemessen wiedergeben. Sofern Angaben zu den Bewässerungsflächen vorliegen, gilt dies auch für bewässert angebaute Pflanzen. Das Modell bildet damit die Auswirkungen der Klimaänderung gut ab.

Für die Validierung des **hydrologischen Modells WASA** wurde auf die Arbeiten von GÜNTNER (2002) zurückgegriffen. Verglichen wurden die simulierten und empirischen Daten zu den Abflussraten und den Füllungsvolumina der Stauseen. Die Werte für die mittleren jährlichen Abflussraten bewegen sich in einer Größenordnung von $\pm 20\%$. Auch die Modellierung der Füllungsvolumina der Stauseen fällt mit Abweichungen von $\pm 20\%$ zufriedenstellend aus. Untersuchungen zu den Auswirkungen der Kopplung von WASA und SIM zeigen Abweichungen in einer geringeren Größe und erlauben eine Übertragbarkeit der Validierungsergebnisse auf das Gesamtmodell. Insgesamt gibt das Modell das hydrologische Verhalten gut wieder, sowohl bezüglich der intra- als auch der interannuellen Variabilität.

Für die Wiedergabe der **Bevölkerungsentwicklung** in beiden Bundesstaaten zeigt der Vergleich der erhobenen und simulierten Daten eine sehr hohe Korrelation von 0.98. Auch die räumliche Verteilung wird ebenso wie die Änderung der Altersverteilung in der Bevölkerung über einen Zeitraum von 30 Jahren gut abgebildet. Hinsichtlich der Migrationsprozesse sind lediglich Aussagen zur ungefähren Größe und nicht über zeitliche Trends möglich, da Daten nur für den Zeitraum 1991-2000 vorhanden sind. Die simulierten Daten stimmen ohne Kalibrierung in der Größenordnung aber mit den empirischen Daten überein.

Unter Berücksichtigung der z.T. schlechten Qualität bzw. unzureichenden Quantität der Daten haben sich alle untersuchten Teilmodelle insoweit als validierbar erwiesen, dass eine verlässliche Abbildung der möglichen Auswir-

kungen der Klimaänderung im Untersuchungsgebiet für jährliche Werte auf regionaler Ebene gelingt.

7.1.4 Modellanalyse

Die Betrachtung des Verhaltens einzelner Parameter und der Modellstruktur gewinnt bei komplexen Modellen besonders an Bedeutung, da Daten nicht in ausreichender Quantität oder Qualität für die Modellvalidierung zur Verfügung stehen. Deshalb wurden Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen durchgeführt, bei denen einzelne Parameter variiert, der Einfluss der Anfangsbedingungen untersucht und Teile der Modellstruktur verändert wurden. Allerdings konnte nicht jeder Parameter getestet werden, da die Gesamtzahl aller Parameter und Variablen sehr groß ist. Aus den Bereichen Hydrologie, Landwirtschaft und Demographie wurden solche Parameter ausgewählt, von denen eine hohe Unsicherheit angenommen wurde.

Eine Vorgabe für integrierte Modelle lautet, dass der Quotient von für die Modellergebnisse wichtigen und unwichtigen Parametern, die durch den Vergleich von Sensitivitätskoeffizienten bestimmt werden, hoch sein sollte, damit das Modell nicht durch externe Randbedingungen definiert wird. Dies ist für SIM der Fall.

Allerdings sind die Simulationsergebnisse mit SIM teilweise durch große Unsicherheiten gekennzeichnet. Es zeigt sich, dass das Modell die natürlichen Prozesse besser abbildet als die gesellschaftlichen Prozesse. Hierfür sind mehrere Faktoren ausschlaggebend. Erstens ist die Datenlage für die natürlichen Prozesse im Untersuchungsgebiet vergleichsweise besser. Zweitens ist die quantitative Modellierung in den Naturwissenschaften weiter vorangeschritten als in den Sozialwissenschaften, so dass hier aussagekräftigere Methoden und Modelle zur Verfügung standen.

Der **landwirtschaftliche** Gesamtertrag wird stark durch das unsichere Verhältnis von bewässerten und unbewässerten Erträgen beeinflusst. Diese sollten daher in Anwendungen möglichst getrennt betrachtet werden. Der Parameter *bw*, der die Rückskalierung der Bewässerungsflächen beschreibt, hat große Auswirkungen auf die Erträge und die Produktion. Er ist schwer zu bestimmen, wodurch die Erträge der bewässert angebauten Pflanzen unsicherer bzw. immer im Zusammenhang mit den Szenarioannahmen zu den bewässerten Flächen zu sehen sind. Weniger einflussreich erweist er sich für entferntere Variablen wie das Agrar-BIP oder Migrationsprozesse. Die Berechnung der tatsächlich bewässerten Flächen ist von geringerer Bedeutung für den durchschnittlichen Ertrag auf der Gesamtebene. Auswirkungen zeigen sich lediglich für einzelne Munizipien.

Variationen der Parameter *kc* und *l*, die den Wassermangel beschreiben, ergeben Änderungen in den Erträgen der Regenfeldbaupflanzen. Der Variationskoeffizient liegt für die Mittelwerte zwischen 0.1 und 0.15. Außerdem ist feststellbar, dass die *kc*-Werte, welche die Pflanzenevapotranspiration bestimmen, durchgängig wichtiger sind als die *l*-Werte, die die Länge der Wachstumsphase bestimmen. Auch hier sinkt der Einfluss der Parametervariation, je weiter die Variablen entfernt sind.

Andere Parametervariationen wie die Änderung des Parameters *seeding date*, der den Aussaattermin bestimmt, haben nur Auswirkungen auf die unbewässert angebauten Pflanzen. Die Sensitivitätskoeffizienten betragen zumeist 0.9, in Einzelfällen aber auch bis zu 4.8. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung wurde der größte Einfluss für die Klima- und Bodenreduktionsfaktoren ermittelt. Weniger wichtig sind die räumliche Verteilung der Bewirtschaftungsformen und die Bodeneigenschaften, die über das hydrologische Modell eingehen.

Im Bereich **Demographie** ergibt sich ein sehr hoher Unsicherheitsfaktor für die Ergebnisse zu den Migrationsprozessen. Der in der Unsicherheitsanalyse ermittelte Variationskoeffizient beläuft sich auf eine Größenordnung von 0.31 bis 0.35. Weniger hoch ist dieser bei den Einkommen; der Variationskoeffizient beträgt hier 0.1. Von den variierten Parametern haben die Kosten der Migration und die Fertilitätsrate den größten Einfluss auf die Unsicherheit in den Ergebnissen.

Der Test der Variablen auf die **Abhängigkeit von Anfangsbedingungen** zeigt einen vernachlässigbaren Einfluss für die hydrologischen Variablen, die in der Kausalkette vorne stehen. Bei den sozio-ökonomischen Variablen, die weiter entfernt sind (landwirtschaftliches Einkommen und Entwicklung der Gesamtbevölkerung), ergibt sich dagegen anhand starker nicht-linearer Reaktionen ein deutlicher Einfluss der Anfangsbedingungen, der mit zunehmenden Anzahl der Simulationsjahre aber rückläufig ist. Bei Berechnungen ist zu beachten, dass die Simulationsergebnisse der sozio-ökonomischen Variablen für die ersten (zehn) Jahre wenig aussagekräftig sind. Insgesamt verdeutlichen die Tests die Stabilität des Systems.

Die **Kopplung der Modelle** zur Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung erweist sich als wichtig für die Identifikation von Wechselwirkungen und Rückkopplungen zwischen Speichervolumina der Stauseen, Wasserentnahme und Wasserbedarf, sowie deren Quantifizierung. Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit, die Teilmodelle in einem integrierten Modell zusammenzuführen.

In allen Bereichen, in denen Variationen von Parametern oder Modellstrukturen durchgeführt worden sind, wurden nicht nur der direkte Einfluss der Veränderungen, sondern auch die Auswirkungen auf weiter entfernte Variablen getestet. Die Höhe der Auswirkungen ist ein Indiz für die Stärke der Kopplung.

Die Analyse für SIM zeigt, dass sich Auswirkungen von Änderungen einzelner Parameter, Inputvariablen oder Prozessänderungen zu meist abschwächen, je weiter die Variablen im Wirkungsgeflecht entfernt sind. So haben z.B. Änderungen von Parametern von WASA einen geringeren Einfluss auf Variablen von YES wie z.B. Erträge und einen geringen Einfluss auf Variablen des demographischen Modells wie das BIP. Starke nichtlineare Reaktionen sind nicht erkennbar. In der umgekehrten Betrachtung beeinflussen Parametervariationen des demographischen Modells weniger stark die Variablen von YES und am wenigsten stark die Variablen von WASA. Andererseits fallen Auswirkungen von Änderungen des Niederschlags in WASA höher aus als die eigentliche Ursprungsänderung innerhalb des Niederschlags.

7.1.5 Modellanwendungen

7.1.5.1 Klimaszenarien

Für die Bewertung der Auswirkungen der Klimaänderung wurden drei verschiedene Szenarien für den Zeitraum 2000-2050 auf der Grundlage der Ergebnisse von zwei *General Circulation Models* (GCMs) berechnet, deren Ergebnisse mit statistischen Methoden unter Berücksichtigung langjähriger Beobachtungswerte herunterskaliert wurden (GERSTENGARBE UND WERNER, 2003). Im ersten Szenario, das auf den Ergebnissen von ECHAM4 beruht, kommt es zu einer Reduzierung des Niederschlags um 24% über den Zeitraum 2000-2050. Im zweiten Szenario, das auf HADCM2 basiert, findet dagegen eine Erhöhung des Niederschlags um 12% statt. Ausserdem wurde ein Szenario ohne Klimaänderungen betrachtet. Die Plausibilität sowohl der Zunahme als auch Abnahme der Niederschläge verdeutlicht die großen Unsicherheiten, die für die Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaänderung bestehen. Insgesamt zeigt sich für die Untersuchungsregion eine hohe Sensibilität ge-

genüber Klimaänderungen und bestehender Klimavariabilität.

Auswirkungen der Klimaänderungen werden zumeist erst ab dem Jahr 2025 sichtbar. Im ECHAM-Szenario kommt es zu einer Verschärfung der Wasserknappheit durch rückläufige Abflussraten und dadurch sinkende Stauungsvolumina der Stauseen bei gleichzeitig steigendem Wasserbedarf durch die Ausdehnung von Bewässerungsflächen und Bevölkerungswachstum. Der allgemeine Wasserbedarf wird nicht gedeckt. Es ergeben sich stark rückläufige Erträge des unbewässerten Pflanzenanbaus. Dabei kommt es vor allen in den Regionen zu einem besonders starken Rückgang der Erträge, die bereits jetzt durch geringe Durchschnittserträge aufgrund schlechter standörtlicher Bedingungen gekennzeichnet sind. Die Ausdehnung der Bewässerungsflächen führt zu einer steigenden Produktion; ab dem Jahr 2030 können aber mehr und mehr dieser Flächen nicht mehr bewässert werden. Dies schlägt sich in einem starken Rückgang der Produktion, einer sinkenden Deckung des Wasserbedarfs und einer Zunahme der Anzahl der Munizipien mit hohen Ernteverlusten (>60%) nieder. Die Migration aus dem Hinterland hält an und ist sehr variabel; Nothilfeprogramme wirken sich reduzierend auf die Höhe und die Variabilität aus.

Im niederschlagsreicheren HADCM-Szenario zeigt sich weder eine Verschärfung noch eine Reduzierung der Wasserknappheit, da höhere Niederschläge durch einen höheren Wasserbedarf kompensiert und durch die hohe Variabilität verdeckt werden. Es ergeben sich leichte Ertragssteigerungen des unbewässerten Pflanzenanbaus und ein geringer Rückgang der Anzahl der Munizipien mit hohen Ernteverlusten, denen aber der Fortbestand von Dürrejahre mit Ernteverlusten aufgrund der hohen Variabilität gegenüber steht.

Die Änderungen der Erträge wirken sich auf die landwirtschaftlichen Einkommen aus. Im

Vergleich der Szenarien steigt das Agrar-BIP im HADCM-Szenario stärker. Die Einkommensunterschiede zwischen Agrarsektor und anderen Sektoren nehmen in beiden Szenarien zu. In Folge dessen hält die Migration aus dem Hinterland in die Städte an.

Die Klimaszenarien verdeutlichen, dass Klimaänderungen im Untersuchungsgebiet z.T. weitreichende Auswirkungen haben können. Sollte es zu einem Rückgang der Niederschläge kommen, wie es im ECHAM-Szenario angenommen wird, wird sich das Problem der Wasserknappheit ab 2025 verschärfen, mit negativen Folgen für die Möglichkeiten der Landbewirtschaftung. Auch in dem vergleichsweise günstigeren HADCM-Szenario zeigt sich kein bedeutender Rückgang der Anfälligkeit für die Auswirkungen von Klimaänderungen.

7.1.5.2 Referenzszenarien

Es wurden weiter zwei unterschiedliche Referenzszenarien berechnet, um die Auswirkungen möglicher sozio-ökonomischer Entwicklungen im Untersuchungsgebiet abzuschätzen (vgl. DÖLL ET AL., 2003). Das erste Szenario (RS A) skizziert eine Entwicklung vor dem Hintergrund einer beschleunigten Globalisierung mit dynamischen Wachstumsraten. Der Fokus liegt hier auf der Ausweitung der Bewässerungsflächen der intensiven Landwirtschaft und dem Bau großer Stauseen, über den der steigende Wasserbedarf abgedeckt werden soll. Das zweite Szenario (RS B) beschreibt dagegen eine Entwicklung vor dem Hintergrund einer verhaltenen Globalisierung mit mäßigen Wachstumsraten, wo eine Konzentration auf die ländliche Regionalentwicklung stattfindet, von der vor allem die Städte des Hinterlandes und Subsistenzfarmer profitieren. Die Förderung der Bewässerungslandwirtschaft und der Bau großer Stauseen wird nicht in demselben hohen Ausmaß wie im RS A verfolgt. Die Referenzszenarien umfassen den Zeitraum 1996-

2025 und wurden mit dem gleichen Klimaszenario (ECHAM4) berechnet.

Die *Simulation des RS A* ergibt, dass sich die Problematik der Wasserknappheit weiter verschärft. Ursächlich hierfür sind aber nicht klimatische Einflussfaktoren, sondern der ineffiziente Ausbau der Bewässerungsflächen, der zu einer Verknappung des verfügbaren Wassers führt, trotz anhaltendem Ausbau der Wasserspeicherkapazitäten. Das Agrar-BIP weist einen höheren Zuwachs auf als in RS B, dennoch kommt es zu keiner größeren Verringerung der Migration. Für die beiden wichtigsten Probleme der Untersuchungsregion ist somit keine Entspannung feststellbar. Im RS B hält die Wasserknappheit zwar ebenfalls an, aber die Diskrepanz zwischen Wassernachfrage und Wasserversorgung erhöht sich nicht. Zudem fällt die Migration geringer aus.

Strategien des Ausbaus von Stauseen und landwirtschaftlichen Bewässerungsflächen stoßen aufgrund der Wasserknappheit in beiden Szenarien an Effizienzgrenzen. Die Schwelle, ab der die Effizienz neuer Stauseen zu sinken beginnt, scheint schon fast erreicht zu sein. Eine Halbierung der Investitionsmittel führt zu einer leichten Abnahme der gespeicherten Volumina. In trockenen Jahren, in denen sich der Wasserbedarf erhöht, bleiben die gespeicherten Wasservolumina in diesem Fall konstant. Kleine Stauseen scheinen zunächst weniger von Klimaänderungen betroffen zu sein. Ein forcierter Ausbau wirkt sich aber auf das gespeicherte Volumen der nachgeschalteten großen Stauseen aus. Zudem trocknen kleine Stauseen schneller aus.

Effizienzgrenzen zeigen sich auch für den Ausbau der Bewässerungsflächen. Selbst eine deutliche Erhöhung der Speicherkapazitäten der Wasserversorgung würde nicht den Effekt erbringen, dass der Wasserbedarf auch erfüllt werden kann. Der Nutzen dieser Entwicklungsstrategie ist fraglich: Zwar steigt das Agrar-BIP im RS A stärker als im RS B, aber die Variabi-

lität bleibt bestehen und die Lebensbedingungen im Hinterland verbessern sich kaum.

7.1.5.3 *Schlussfolgerungen für die Region*

Die natürlichen Lebensbedingungen der Untersuchungsregion setzen jeder regionalen Entwicklungsstrategie Grenzen. Eine bessere Datenerfassung ist notwendig, um die Auswirkungen der Klimaänderungen für regionale Entwicklungsstrategien und deren Auswirkungen selbst besser abschätzen zu können. Maßnahmen zur Stärkung der Anpassungsfähigkeit dieser Region an die Folgen der Klimaänderungen bedürfen einer langfristigen politischen Planung, die die Auswahl von Entwicklungsstrategien nicht nur unter dem Gesichtspunkt von Effizienzverbesserungen unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen, sondern auch unter dem Gesichtspunkt unterschiedlicher klimatischer Rahmenbedingungen in der Zukunft trifft. So legen z.B. Infrastrukturprojekte wie der Bau von Stauseen die allgemeine Struktur der regionalen Wasserversorgung auf Jahrzehnte hinaus fest. Ohne eine Berücksichtigung des Einflusses möglicher geänderter klimatischer Rahmenbedingungen können Planungen hier einen falschen Weg einschlagen, dessen Auswirkungen viele Jahre später nur schwer zu korrigieren sind.

Abschließend stellt sich aber die Frage, inwieweit die Prozesse der Migration beeinflusst werden können. Unter Umständen erlauben die natürlichen Rahmenbedingungen, d.h. die Knappheit von Wasser und die geringe Fruchtbarkeit der Böden, keinen starken Zuwachs der Bevölkerung im Hinterland, solange die Landwirtschaft dort die dominierende Form des Lebensunterhalts darstellt.

7.1.6 Gesamtbewertung des Modells

Das Modellkonzept und die Integrationsstrategie des vorliegenden Semi-Arid Integrated Model (SIM) erweisen sich insgesamt als zielführend:

- Das Modell bildet die komplexen Mechanismen und Wechselwirkungen des Kausalgeflechts von Klimaänderung, Wasserverfügbarkeit, Landwirtschaft und sozio-ökonomischen Entwicklungen in der Untersuchungsregion gut ab.
- Mit dem Modell können die Auswirkungen regionaler Entwicklungsstrategien und der Einfluss gesamtwirtschaftlicher Rahmenbedingungen grundsätzlich untersucht werden.
- Das Modell erzeugt entscheidungsrelevante Ergebnisse, die Handlungsspielräume für Adaptionstrategien aufzeigen.

Bei der Anwendung des Modells sind bestehende Unsicherheiten aufgrund der schlechten Qualität der Datenlage zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Teilmodelle, die auf elaborierten konzeptionellen Ansätzen und einer besseren Datengrundlage aufbauen, sind belastbarer als die Teilmodelle, die neu zu entwickeln waren.

Die Ergebnisse der Teilmodelle zur Hydrologie, Agrarproduktion und Bevölkerungswachstum sind an der Skala der Bundesstaaten und Regionen gut definiert, an kleineren Skalen dagegen unsicherer.

Das Modell kann daher unterstützend zur Analyse und Konzeption von regionalen Entwicklungsstrategien im Wasser- und Landwirtschaftsbereich verwandt werden. Dabei können Auswirkungen von Migrationsprozessen berücksichtigt werden. Die Modellaussagen zur Lebensqualität und zu sozio-ökonomischen Folgen sind aber mit zu vielen Unsicherheiten (Preise, Kosten) behaftet, sodass das Modell in diesem Kontext nur bedingt eingesetzt werden kann.

7.2 Ausblick

7.2.1 Erweiterung und Verbesserung des Modells

Für eine Verbesserung der Gültigkeit und Anwendbarkeit des Modells ist eine Erweiterung um weitere Teilmodelle oder aber eine Verbesserung bestehender Teilmodelle in den Bereichen sinnvoll, die bisher nicht oder nur rudimentär abgebildet sind. Dies umfasst die Bereiche:

- (1) der regionalen und gesamtstaatlichen Ökonomie,
- (2) der sozio-kulturellen Prozesse und
- (3) einzelner naturräumlicher Aspekte.

(1) Die nicht-landwirtschaftlichen ökonomischen Sektoren werden bislang nicht erfasst. Aspekte wie die Wasserverfügbarkeit oder Mi-

grationsprozesse werden entscheidend von den allgemeinen ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Bislang gehen makro-ökonomische Einflüsse nur relativ grob als Szenarioannahmen in das Modell ein.

Eine bessere Kenntnis dieser Einflüsse ist für die Abschätzung von Handlungsmöglichkeiten im Umgang mit den Folgen der Klimaänderungen hilfreich. Ein Wachstum dieser nicht-landwirtschaftlichen Sektoren kann zu verbesserten Entwicklungschancen führen, woraus eine geringere Anfälligkeit gegenüber Dürren oder Wassermangel resultieren kann (z.B. über bessere Infrastruktur oder bessere Anschlüsse an die Wasserversorgung). Andererseits kann ein stärkeres wirtschaftliches Wachstum zu einer vermehrten Inanspruchnahme natürlicher

Ressourcen (z.B. Wasser) führen, was die ökologische Verletzbarkeit der Untersuchungsregion erhöht. Die Entwicklung eines Teilmodells zur regionalen Ökonomie, das mit der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung verkoppelt ist, würde diesen Unklarheiten Rechnung tragen.

(2) Der Bereich der Wechselwirkung von Lebensqualität und Migration wird bislang vom Modell nur rudimentär abgebildet. Insbesondere die Variabilität und die Verteilung von Migration wird bislang nicht erfasst. Hier böte sich eine akteursbasierte Modellierung mit Unterscheidung nach Regionen und Haushalten an. Bislang konzentriert sich das Modell auf die Migration als einzige Anpassungsform auf schlechte Lebensqualität im Untersuchungsgebiet und vernachlässigt mögliche andere Formen der sozio-kulturellen Anpassung. Neben der *Migration* wären Strategien der *Innovation* (Verbesserung der Lebensbedingungen vor Ort) oder des *Beharrens* (Beibehalten der bisherigen Strategie) zu berücksichtigen.

(3) Auch im Bereich der naturräumlichen Modellierung bestehen Verbesserungsmöglichkeiten, etwa hinsichtlich der Modellierung der Verlandung von Stauseen, von Erosionsprozessen oder der Einbeziehung der Wasserqualität von Staussen. Ebenso könnten Entscheidungen im Wassermanagement dynamisiert und an makroökonomische Größen gekoppelt werden. Im Bereich der Landwirtschaft könnte eine Dynamisierung der Bodeneigenschaften Auskunft über die Auswirkungen von Bodendegeneration geben. In einem zweiten - datenaufwendigeren - Schritt könnten auch Rückkopplungen über die aus zu intensiver Landwirtschaft entstehenden Prozesse der Bodendegeneration einbezogen werden.

Neben diesen Erweiterungen oder Verbesserungen des Modells wäre es hilfreich, mehr integrierte Szenarien oder auch zusätzliche Interventionsszenarien zu berechnen, wie z.B. zu den Auswirkungen von Überleitungsprojekten

(z.B. die geplante Überleitung aus dem Rio Sao Francisco nach Ceará oder kleinere Projekte innerhalb der vorhandenen Flußsysteme). Dies würde es ermöglichen, ein umfangreicheres Bild möglicher Entwicklungen zu zeichnen, wodurch nicht nur eine verdichtete Beschreibung des Untersuchungsgebiets erreicht würde. Ebenso könnten Folgen möglicher Handlungen besser abgeschätzt werden.

Allgemein ließe sich damit das Modell auch weiter auf Stärken und Schwächen testen und einer weiteren Feinabstimmung und Fehlerkorrektur unterziehen. Dies gilt für die Änderung oder Anpassung der Szenarien im Fall von Inkonsistenzen oder Plausibilitätslücken und für die Änderung oder Anpassung der Modelle im Fall von ungenügenden Prozessrückkopplungen bzw. unzureichenden oder falschen Sensitivitäten für einzelne Prozesse. Ebenso kann hierdurch die Notwendigkeit neuer integrierter Szenarien ermittelt werden, aber auch die Notwendigkeit simulierbarer Indikatoren zur Interpretation dieser Szenarien. Bei der Erstellung der Szenarien müsste auch weiterhin darauf geachtet werden, dass sie in enger Zusammenarbeit mit den potentiellen Anwendern entwickelt werden.

Eine umfangreichere Modelldokumentation, die alle wichtigen Gleichungen, Parameter und Variablen des Modells sowie eine Beschreibung der Umsetzung in einen Computercode enthält, wäre ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Anwendbarkeit des Modells. Diese könnte auch durch eine web-basierte Benutzeroberfläche weiter gesteigert werden, die zur Zeit im Rahmen einer Diplomarbeit an der Universität Potsdam entwickelt wird. Die Benutzeroberfläche wird es Anwendern ohne Vorkenntnisse ermöglichen, verschiedene Szenarienannahmen selbstgewählt zu variieren und deren Auswirkungen auf wichtige Ausgabevariablen zu betrachten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten nicht alle Modellaspekt gleichmaßen gut analysiert werden. Weitere Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen wären deshalb hilfreich. Dies gilt vor allem für die Prüfung der Unsicherheiten im agrarökonomischen Modell RASMO.

7.2.2 Übertragbarkeit des Modells

Eine Übertragbarkeit des Modells auf andere semi-aride Regionen ist prinzipiell möglich. Dafür sollte eine Anpassung des Modells an die jeweiligen regionalen Gegebenheiten (vor allem sozio-ökonomische und sozio-kulturelle Rahmenbedingungen) erfolgen. Es wäre zu gewährleisten, dass die notwendigen Input-Daten für die jeweiligen Teilmodelle vorliegen (u.a. Klima, Bodeneigenschaften oder landwirtschaftliche Anbauflächen). Der hiermit verbundene Arbeitsaufwand ist aufgrund der Anforderung, sehr viele Daten sammeln zu müssen, als hoch einzuschätzen. Die gut definierten Schnittstellen erleichtern aber den Einbau in das Modell.

Eine Anwendung des Modells in anderen semi-ariden Gebieten mit einer besseren Datenlage könnte auch zu einer besseren Validierung des Gesamtmodells beitragen und die Möglichkeit der Verallgemeinerung von Ergebnissen für semi-aride Regionen testen. Dies wäre sowohl für die integrierte Modellierung semi-arider Regionen als auch für die Rückkoppelung mit der Global Change Forschung nützlich. Nicht zuletzt könnte durch ein solches Vorgehen auch zu einer Homogenisierung unterschiedlicher Modellierungsansätze im Bereich der integrierten Modellierung auf regionaler Ebene beigetragen werden.

Literatur

Kapitel



- Alcamo, J., Kreilemann, G.J.J., Krol, M. und Zuidema, G. (1994): Modeling the Global Society-Biosphere-Climate System. Part 1: Model Description and Testing. - *Water, Air and Soil Pollution*, 76, 1-35.
- Alcamo, J., Shaw, R. und Horijk, L. (Hrsg.) (1990): *The RAINS Model of Acidification: Science and Strategies in Europe*. Dordrecht, London, Boston: Kluwer.
- Bailey, P., Gough, M.C. und Mc Granahan (1996): *Methods for Integrated Environmental Assessment: Research Directions for the European Union*, Stockholm: Stockholm Environmental Institute.
- Beck, M.B. und Chen, J. (2000): Assessing the Quality of Models Designed for Predictive Tasks. in: Saltelli, J. et al. (Hrsg.): *Mathematical and Statistical Methods for Sensitivity Analysis*. New York: Wiley&Sons.
- Bezerra, C.L., da Cunha Trigueiro, E.R., Castro, A.A.J.F. und Castro, A.S.F. (2003): Survey of the Vegetation in the State of Ceará. in: Gaiser, T., Krol, M.S., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.): *Global change and regional impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid Northeast of Brazil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Böhm, U., Gerstengarbe, F.-W., Hauße, D., Kücken, M., Österle, H. und Werner, P.C. (2003): Dynamical regional climate modelling and sensitivity experiments for the Northeast of Brazil. in: Gaiser, T., Krol, M.S., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.): *Global change and regional impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid Northeast of Brazil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Braga, R. (1997): *Model validation methods special reference to crop simulation models*. Download unter: http://www.esaelvas.pt/ricardo_braga/validation2.PDF (10.10.2003).
- Bronstert, A., A. Jaeger, A. Güntner, M. Hauschild, P. Döll und M. Krol (2000), Integrated modelling of water availability and water use in the semiarid Northeast of Brazil, *Physics and Chemistry of the Earth*, 25 (3), 227-232.
- Bronstert, A., Brovkin, V., Krol, M., Lüdeke, M., Petschel-Held, G., Svirezhev, Y. und Wenzel, V. (1997): *Integrated Systems Analysis at PIK: A Brief Epistemology*. PIK-Report 27, Potsdam: Potsdam Institut für Klimafolgenforschung.
- Brooks, R.J.; A.M. Tobias (1996). Choosing the Best Model: Level of Detail, Complexity, and Model Performance. *Math. Comp. Modelling*, 24, 1-14.
- Brühl, D. (1989). *A terra era nossa vida - Armut und Familie in Nordostbrasilien. Eine Untersuchung zum familiären Wandel im Stadt-Land-Vergleich*. Frankfurt a.M.: Verlag für interkulturelle Kommunikation.
- Cadier, E. (1996): Hydrologie des petits bassins du Nordeste Bresilien semi-aride: typologie des bassins et transposition ecoulement annuels. *Journal of Hydrology*, 182, 117-141.
- Castro, A.A., Printz, A., Araújo Mendes, M.R., de Assis Rodrigues Soares, F., Soares Oliveira, J.O., Sousa Albino, R., Lange, F.M. und

- Soares de Farias, R.R. (2003): Cerrado and Caatinga in the Picos Area. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 323-333.
- Claussen, M. (1998): Commentary: On the Inconsistency at the Interface of Climate Impact Studies and Global Simulations. in: Schellnhuber, H.J. und Wenzel, V. (1998): *Earth System Analysis. Integrating Science for Sustainability*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 273-276.
- COGERH (1998): *Estudo preliminar da operação conjunta do sistema Jaguaribe e sistema Metropolitano*. Fortaleza: COGERH.
- Cohen, S.J. (1997): *MacKenzie Basin Impact Study (MBIS). Final Report*. Toronto: Atmospheric Environment Service, Environment Canada.
- de Araújo, J.C., Fernandes, L., Machado Junior, J.C., Lima Oliveira, M.R. und Cunha Sousa, T. (2003): Sedimentation of reservoirs in Semiarid Brazil. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 205-216.
- Dent, J.B. und Blackie, M.J. (1979). *Systems Simulation in agriculture*. London: Applied Science.
- Döll, P., Hauschild, M., Mondono, E.M. und de Araújo, J.C. (2003a): Modeling of Present and Future Water Use in Piauí and Ceará as a Basis for Water Resources Planning. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 239-251.
- Döll, P., Krol, M., Fuhr, D., Gaiser, T. Herfort, J., Höynck, S., Jaeger, A., Külls, C., Mondono, E.M., Printz, A. und Voerkel, S. (2003b): Integrated Scenarios of regional Development in Ceará und Piauí. - in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 19-41.
- Downlatabadi, H. (1995): Integrated Assessments of Climate Change. An Incomplete Overview, *Energy Policy*, 23 (4/5), 289-296.
- Dowlatabadi, H. und Morgan, M.G. (1993): A Model Framework for Integrated Studies of the Climate Problem. *Energy Policy*, 21 (3), 209-221.
- Edmonds, J.A., Wise, M. und MacCracken, C. (1994): *Advanced Energy Technologies and Climate Change: An Analysis using the Global Change Assessment Modell (GCAM)*. PNL-9798, UC-402. Richland, Washington: Pacific Northwest Laboratory.
- Edmonds, J. und Reilly, J.M. (1995): *Global Energy: Assessing the Future*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- FAO - World Food and Agriculture Organisation (1992): *CROPWAT - A Computer Program for Irrigation Planning and Management*. FAO Irrigation and Drainage Paper 46, Rome: FAO.
- FAO (1983): *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*. Soils Bulletins 52. Rome: FAO.
- FAO (1979): *Yield response to water*. Irrigation and Drainage Paper 33, Rome: FAO.
- FAO - Food and Agriculture Organization (1976): *A framework for land evaluation*. Soils Bulletins 32. Rome: FAO.
- FAO (1993): *Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER): Procedures Manual*. World Soil Resources Reports 74, Rome: FAO.
- Fernandes, A. (1990): *Estudo Fitogeográfico do Brasil*. Fortaleza: Editora Stylos Comunicações.
- Frischkorn, H., de Araújo, J.C. und Santiago, M.M.F. (2003): Water Resources of Ceará and Piauí. Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 87-94.
- Fuhr, D. (with contributions from Grebe, M., Döring, A., da Rocha, F.M. und Lantermann, E-D.) (2003): Quality of Life and Mi-

- gration - Concepts and Results of the Socio-Economic Survey in Tauá and Picos. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 349-360.
- Fuhr, D., Grebe, M., daRocha, F.M. und Döring, A. (2000): Migration und Lebensqualität im semi-ariden Nordosten von Brasilien. Statusbericht der ersten Hauptphase des WAVES-Projekt von der Arbeitsgruppe Sozio-kulturelle Analysen (unveröffentlichtes Dokument).
- Funtowicz, S.O. und Ravetz, J.R. (1991): A New Scientific Methodology for Global Environmental Issues. in: Constanza, R. (Hrsg.) *The Science and Management of Sustainability*. New York: Columbia University Press.
- Gaese, H. (2003): Degradation Factors in a Risk-Prone Area: the Semiarid Northeast of Brazil. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 125-133.
- Gaese, H. und Hinterthür, H. (1999): *Verbundprojekt WAVES. Statusbericht der ersten Hauptphase. Arbeitsgruppe „Regionales Agrarsektormodell“*. Köln: Institut für Tropentechnologie der Fachhochschule Köln.
- Gaiser, T., Gaiser, T., Ferreira, L.G.R. und Stahr, K. (2003a): General View of the WAVES-Program. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1-16.
- Gaiser, T., Graef, F., Hilger, T., Ferreira, L.G.R. und Stahr, K. (2003b): An Information System for Land Resources in Ceará und Piauí. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 267-278.
- Gerstengarbe, F.W. und Werner, P.C. (2003): Climate Analysis and Scenarios for Northeast Brazil. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 137-151.
- Gerstengarbe, F.-W. und Werner, P.C. (1999): Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime. *Climate Research*, 11(2), 97-107.
- Gleick, P.H. (1996): Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. *Water International*, 21, 83-92.
- Grebe, M., A. Döring, D. Fuhr und Matias, F. (2000): *Modeling Migration and Quality of Life*. Proceedings of the Third International WAVES-Workshop in Freising - Weihenstephan, March 2000. Freising, 55-59.
- Güntner, A. (2002): *Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil*. Dissertation at the Faculty of Mathematics and Sciences at the University of Potsdam.
- Harrison, S.R. (1990): Regression of a model on real-system output: An invalid test of model validity. *Agricultural Systems*, 34, 183.
- Hastenrath, S. (1991): *Climate Dynamics of the Tropics*. Dordrecht, London, Boston: Kluwer.
- Hastenrath, S. und Greischar, L. (1993): Further work on northeast Brazil rainfall anomalies. *Journal of Climate*, 6, 743-758.
- Hauschild, M. und Döll, P. (2000): *Water Use in Semi-arid Northeastern Brazil - Modeling and Scenario Analysis*. Kassel World Water Series, Report No. 3, Center for Environmental Systems Research. Kassel: University of Kassel.
- Hees, W. (1996): *Grundlos für Großgrund. Die unendliche Geschichte der Agrarreform*. Blätter des IZ3W, 215, 9-11.
- Hischmoeller, M. und Hoppe, R. (1995): Coping with Intractable Controversies. The Case for Problem Structuring in Policy Design and Analysis. *Knowledge and Policy*, 8 (4), 40-60.

- Hoffmann, F.O. und Hammond, J.S. (1994): Propagation of Uncertainty in Risk Assessments: The Need to Distinguish Between Uncertainty Due to Lack of Knowledge and Uncertainty Due to Variability. *Risk Analysis*, 14 (5), 707-712.
- Hordijk, L. (1991): Use of the RAINS-Model in Acid Rain Negotiations in Europe. *Environmental Science and Technology*, 25 (4), 596-602.
- Houghton, J.T., Filho, M., Callander, E., Harris, N., Kattenberg, A. und Maskell, K. (Hrsg.) (1996): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Höynck, S. (2003): Structure and Possible Development of the Agricultural Sector of Ceará and Piauí. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 375-388.
- Hulme, M., und Sheard, N. (1999): *Cenários de alterações climáticas para o Brasil*, Climate Research Unit, Norwich, UK.
- Hydroisotop (2000): *Verbundprojekt WAVES. Abschlussbericht für die Haupt- und Aufstockungsphase. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse*. Schweitenkirchen: Hydroisotop.
- IBGE (2002): *população 2002*, <http://www.ibge.gov.br>
- IBGE (Hrsg.) (2000): *Censo Demográfico - Synopse Prelimina*. im Internet unter: <http://www.1.ibge.gov.br/ibge/estatistica/populacao/censo2000/default.htm>
- IBGE (Hrsg.) (1998a): *Censos Economicos de 1995 - 1996. Censo Agropecuário Ceará*. IBGE. No. 11. Rio de Janeiro: IBGE
- IBGE (Hrsg.) (1998b): *Censos Economicos de 1995 - 1996. Censo Agropecuário Piauí*. IBGE. No. 10. Rio de Janeiro: IBGE
- IBGE (Hrsg.) (1997b): *Contagem da População 1996*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE (Hrsg.) (1997a). *Censo demográfico 1991. Famílias e domicílios, N°10-Piauí*, Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE (Hrsg.) (1996a): *Anuário Estatístico do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE (Hrsg.) (1996b): *Produção Agrícola Municipal*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE (Hrsg.) (1996c). *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 1996*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE (Hrsg.) (1991) *Censo Demográfico*. Rio de Janeiro: IBGE
- IBGE (Hrsg.) (1985a): *Censos Economicos de 1985. Censo Agropecuário Ceará*. IBGE. No. 11. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE (Hrsg.) (1985b): *Censos Economicos de 1985. Censo Agropecuário Piauí*. IBGE. No. 10. Rio de Janeiro: IBGE.
- Iman, R.L. und Helton, J.C. (1988): An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis for Computer Models. *Risk Analysis*, 8, 71-90.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2001): *Climate Change 2001. Working Group I: The Scientific Basis. Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group III*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- IPCC-DDC (1999): *GGCM Climate Change Scenarios and observed Climate Data Sets*. - <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>.
- IPLANCE (1996): *Coletânea de Estatísticas da Produção Agrícola Cearense de 1947 - 1995*. Fortaleza: IPLANCE.
- IPLANCE (1995): A dinamica do movimento populacional no ceara 1950-1991
- Janssen, P.H.M., Heuberger, P.S.C. und Sanders, R. (1992): *UNCSAM 1.1: a Software Package for Sensitivity and Uncertainty Analysis*. Report 959191994. Bilthoven, NL: RIVM.
- Janssen, P.H.M., Heuberger, P.S.C. und Sanders, R. (1994): UNCSAM: A Tool for Automatic Sensitivity and Uncertainty Analysis. *Environmental Software*, 9, 1-11.
- Johns, T.C., Carnell, R.E., Crossley, J.F., Gregory, J.M., Mitchell, J.F.B., Senior, C.A., Tett, S.F.B. und Wood, R.A. (1997): The Second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Climate Dynamics*, 13, 103-134.
- Kann, A. und Weyant, P. (2000): Approaches for Performing Uncertainty Analysis in

- Large-Scale Energy/Economic Policy Models. *Environmental Modeling and Assessment*, 5, 29-46.
- Kousky, V.E. (1979): Frontal influences on Northeast Brazil. *Mon. Weather. Rev.*, 107, 1140-1153.
- Kousky, V.E. (1980): Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. *Mon. Weather. Rev.*, 108, 488-498.
- Kousky, V.E. und Gan, M.A. (1981): Upper Tropospheric Cyclonic Vortices in the Tropical South-Atlantic. - *Tellus*, 33, 538-551.
- Krol, M.S. und Bronstert, A. (1997): *Final report on the pre-phase and interim funding period of WAVES. Sub-project Integrated Modelling*. Potsdam: Potsdam Institut für Klimafolgenforschung.
- Krol, M.S., Jaeger, A. und Bronstert, A. (2003): Integrated Modeling of Climate Change Impacts in Northeastern Brasil. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 43-56.
- Krol, M.S., Jaeger, A. und Bronstert, A. (2002): *Verbundprojekt WAVES. Schlussbericht der Arbeitsgruppe „Integrierte Modellierung“*. Potsdam: Potsdam Institut für Klimafolgenforschung.
- Law, A.M. und Kelton, W.D. (1991): *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Magalhães, A.R., Filho, H.C., Garagorry, F.L., Gasques, J.G., Molion, L.C.B., Neto, M.d.S.A., Nobre, C.A., Porto, E.R. und Reboucas, O.E. (1988): The effects of climatic variations on agriculture in Northeast Brazil. In: M.L. Parry, T.R. Carter & N.T. Konijn (Hrsg.): *The impacts of climatic variations on agriculture, Vol.2, Assessments in semi-arid regions*. Dordrecht, London, Boston.: Kluwer, 273-382.
- Manne, A. S., R. Mendelsohn und R. G. Richels (1995): MERGE - A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies. *Energy Policy*, 23(1), 17-34.
- Meadows, D., Richardson, J. und Bruckmann, G. (1982): *Groping in the Dark - the First Decade of Global Modeling*. New York: John Wiley&Sons.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. und Behrens, W.H. III (1972): *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on Predicament of Mankind*. New York: Universe.
- Mitchell, G., Griffs, R., Benson, V. und Williams, J. (1997): *About the EPIC-Model*. Download unter: <http://brcsun0.tamu.edu/epic/introduction/aboutepicmodel.html> (27.6.2003).
- Monteith, J.L. (1965): Evaporation and environment. *Symo. Soc. Exp. Biology*, 19, 205-234.
- Morgan, M.G. und Dowlatabadi, H. (1996): Learning from Integrated Assessment of Climate Change. *Climatic Change*, 34, 337-368.
- Morgan, M.G. und Henrion, M. (1990): *Uncertainty. A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- New, M.G., M. Hulme und Jones, P.D. (1999), Representing 20th century space-time climate variability. I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology, *Journal of Climate*, 12, 829-856.
- Nobre, C.A. und Molion, L.B.C. (1988): The climatology of droughts and drought prediction. In: M. Parry, T.R. Carter und Konijn, N.T. (Hrsg.): *The impact of climatic variations on agriculture, Vol.2, Assessments in semi-arid regions*. Kluwer Academic, Norwell, Mass., U.S.A., 305-324.
- Nobre, C.A., Yanasse, H.H. und Yansse, C.C.F. (1984): Previsao de secas no Nordeste pelo método das periodicidades: usos e abusos. Second WMO-Symposium on Tropical Droughts, *TPM Report Series*, 15, 113-116.
- Nordhaus, W.D. (1992): *The DICE-Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate Economy*. New Haven, USA: Yale University Press.
- Nordhaus, W.D. (1979): *The Efficient Use of Energy Resources*. New Haven: Yale University Press.
- Oreskes, N.; K. Shrader-Frechette und Belitz, K. (1994). Verification, Validation and Con-

- firmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, 263, 641-646
- Page, B. (1991): *Diskrete Simulation - Eine Einführung mit Modula-2*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Parry, M.L., Carter, T.R. und Konijn, N.T. (Hrsg.) (1988): *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*. Volume 2: Assessments in Semi-Arid Regions. Dordrecht, London, Boston: Kluwer.
- Parson, E.A. und Fisher-Vanden, K. (1997): Integrated Assessment Models of Global Climate Change. *Annual Review of Energy and the Environment*, 22, 589-628.
- Parson, E.A. und Fisher-Vanden, K. (1995): *Searching for Integrated Assessment: A Preliminary Investigation of Methods, Models, and Projects in the Integrated Assessment of Global Climatic Change*. Michigan, USA: Consortium for International Earth Science Information Network (CIESIN), UNiversity Center.
- Parson, E.A. (1995): Integrated Assessment and Environmental Policy-Making, In Pursuit of Usefulness, *Energy Policy*, 23 (4/5), 463-476.
- Penman, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society London*, A 193, 120-145.
- PNUD, IPEA, FJP und IBGE (1998): *Atlas do desenvolvimento humano no Brasil*. - Belo Horizonte, Br.: PNUD.
- Ramos, R.P.L. (1975): Precipitation Characteristics in the Northeast Brazil Dry Region. *Journal of Geophysical Research*, 80, 1665-1678.
- Reilly, J. (1994): Crops and climate change. *Nature*, 367, 118-119.
- Robinson, S. (1999): Simulation, Verification, Validation and Confidence: A Tutorial. *Transactions*, 16, 63-69.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorella, M., Schlese, U. und Schulzweida, U. (1996): *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate*. Report No. 218, Max-Planck Institute for Meteorology (MPI). Hamburg: MPI.
- Rotmans, J. (1998): Global Change and Sustainable Development: Towards an Integrated Conceptual Model. in: Schellnhuber, H.-J. und Wenzel, V. (Hrsg.): *Earth System Analysis. Integrating Science for Sustainability*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 421-453.
- Rotmans, J. (1990): *IMAGE: an Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect*. Dordrecht, London, Boston: Kluwer.
- Rotmans, J. und van Asselt, M. (2001): Uncertainty Management in Integrated assessment Modeling: Towards a Pluralistic Approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 9, 101-130.
- Rotmans, J. und Dowlatabadi, H. (1998): Integrated Assessment of Climate Change: Evaluations of Methods and Strategies. in: Rayner, S. und Malone, E. (Hrsg.): *Human Choice and Climate Change: An International Social Science Assessment*. Washington: Batelle Press.
- Rotmans, J. und Dowlatabadi, H. (1997): Integrated Assessment of Climate Change: Evolution of Methods and Strategies. in: *Human Choices and Climate Change: A State of the Art Report*, Richland: Batelle Pacific Northwest Laboratories.
- Rotmans, J. und deVries, H.J.M. (Hrsg.) (1997): *Perspectives on Climate Change: The Targets approach*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Rowe, W.D. (1994): Understanding Uncertainty, *Risk Analysis*, 14 (5), 743-750.
- Rykiel, E.J. Jr. (1996): Testing Ecological Models: the Meaning of Validation. *Ecological Modelling*, 90, 229-244.
- Sargent, R.G. (1999): Validation and Verification of Simulation Models. in: Farrington, P.A., Nemhard, H.B., Sturrock, D.T. und Evans, G.W. (Hrsg.): *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 39-48.
- Sargent, R.G. (1984): Simulation Model Validation. in: Ören, T.I., Zeigler, B.P. und Elzas, M.S. (Hrsg.): *Simulation and Model-Based Methodologies: An Integrative View*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Schellnhuber, H.-J. (1998): Discourse: Earth System Analysis - The Scope of the Challenge. in: Schellnhuber, H.-J. und Wenzel V. (Hrsg.): *Earth System Analysis. Integrating Science for Sustainability*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 3-195.

- Schimmelpfennig, D. (1996): Uncertainty in Economic Models of Climate Change, *Climatic Change*, 33 (2), 213-234.
- Seibert, P. (1996). *Farbatlas Südamerika - Landschaften und Vegetation*. Stuttgart: Ulmer.
- Shepard, D. (1968): *A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data*. ACM Natinal Conference Proceedings, Harvard College, Cambridge, M.: Harvard University.
- SUDENE (1980): *PLIRHINE - Plano de Aproveitamento Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste Brasil*. RECIFE, Br.: SUDENE.
- SUDENE (1989): *Populacao e Emprego*, 25; *Projecoes de populacao das microrregioes e dos municipios do nordeste 1985/2000*. Recife, Br.: SUDENE.
- Swartz, M. und Thomson, M. (1990): *Divided we stand: Redefining Politics, Technology and Social Choice*, London: Harvester Wheatsheaf.
- Swartzman, G.L. und Kaluzny, S.P. (1987): *Ecological Simulation Primer*. New York, N.Y.: MacMillan.
- Sys, C., Van Ranst, E. und Debaveye, J. (1991): *Land Evaluation. Part II: Methods in Land Evaluation*. General Administration for Development Cooperation, Brüssel, Belgien.
- Sys, C. (1993): *Land Evaluation in the tropics. Pédologie*, 43, 117-142.
- Tavares, R. (1995). Land a. democracy: Reconsidering the Agrarian Question. in: NACLA (Hrsg.): *Report on the Americas*. New York: NACLA, 23-30.
- Timmermanns, P. und Munn, R.E. (1997): The Tiger in the Dining Room. Designing and Evaluating Integrated Assessments of Atmospheric Change. *Environmental Modelling and Assessment*, 4, 45-58
- UNEP - United Nations Environment Programme (2001): *Global Environmental Outlook 3 (GEO 3): Past, Present and Future Perspectives*. London: Earthscan.
- Universität Hohenheim, Universität Gesamthochschule Kassel, Technische Universität München, Hydroisotop GmbH Schweitenkirchen, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Fachhochschule Köln, Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal do Piauí. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos und Departamento de Hidrometeorologia Piauí (2000): *Verbundprojekt WAVES. Statusbericht der ersten Hauptphase. Band 1: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse*. Stuttgart: Universität Hohenheim (unveröffentlichtes Manuskript).
- USDA (1990): *EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator*. 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1768. Washington D.C., USA..
- van der Sluijs, J. (1996): *Integrated Assessment Models and the Management of Uncertainties*. Working Paper 96-119, Laxenburg, Österreich: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Veloso, F. (1998). *Planejamento regional e transformação de agricultura tradicional - Lições da experiência no estado do Piauí*. Tese de Doutorado. São Paulo
- Villa, Marco Antonio (2000) *'Vida e morte no sertão, História das secas no Nordeste nos séculos XIX e XX'*. Sao Paulo: Editora Ática.
- Voerkelius, S., Külls, C., Santiago, M.M.F., Frischkorn, H., dos Santos Semrau, L.A., Heinrichs, G und López Gil, M.M. (2003): Investigation on Water Management and Water Quality in Picos/PI and Tauá/CE. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 173184.
- Wade, L.J. (1991): Optimising plant stand in response to climatic risk. In: Muchow, RC. und Bellamy, J.A. (Hrsg.): *Climatic Risk in Crop Production - Models and Management for the Semi-arid Tropics and Sub-tropics*. Wallingford, UK: CAB International, 263-282.
- Wallsten, T. S. und R. G. Whitfield (1990): *Assessing the risks to young children of three effects associated with elevated blood lead levels*. Argonne Nat. Lab. Report AML/AA-32.
- WBGU (1999): *Welt im Wandel. Strategien zur Bewältigung globaler Umweltprobleme. Jahresgutachten 1998*. Berlin: Springer.

- Weyant, J., Davidson, O., Dowlatabadi, H., Edmonds, J., Grubb, M., Parson, E.A., Richels, R. Rotmans, R., Shukla, P.R. und Tol, R.S.J. (1996): Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results. in: Bruce, J.P., Haites, E.F. and Lee, H. (Hrsg.): *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 367-396.
- Werner, P.C. und Gerstengarbe, F.W. (2003): The Climate of Piauí and Ceará. in: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H. und de Araújo, J.C. (Hrsg.) (2003): *Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brasil*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 81-86.
- Werner, P.C. und Gerstengarbe, F.-W. (1997): Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research*, 8, 171-182.
- Wright, J.L.(1982): New Evapotranspiration Crop Coefficients, *J. of Irrig. and Drain Div.*, ASCE, 96(IR1), 193-201.
- Yin, Y., Cohen, S. und Huang, G.H. (2000): Global Climate Change and Regional Sustainable Development: the Case of Mackenzie Basin in Canada. *Integrated Assessment*, 1, 21-36.
- Zwerver, S., von Rompaey, R.S.A.R., Kock, M.T.J. und Berk, M.M. (Hrsg.) (1995): *Climate Change Research: Evaluation and Policy Implications*, Studies in Environmental Science 65 B, London: Elsevier

Liste der entstandenden Veröffentlichungen

- Krol, M.S., Jaeger, A. und Bronstert, A. (2003): Integrated Modelling of Climate Change impacts in Northeastern Brazil. in: Gaiser, T., Krol, M.S., Frischkorn, H. und Araújo, J.C. (Eds.): *Global Change and Regional Impacts: Water availability and Vulnerability of Eco-systems and Society in the semiarid Northeast of Brazil*. Berlin: Springer, 43-56.
- Döll, P., Krol, M., Fuhr, D., Gaiser, T., Herfort, J., Höynck, Jaeger, A., Külls, C., Meniondo, M., Printz, A. und Vörkelius, S. (2003): Integrated Scenarios of Regional Development in Ceará and Piauí. in: Gaiser, T., Krol, M.S., Frischkorn, H. und Araújo, J.C. (Eds.): *Global Change and Regional Impacts: Water availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the semiarid Northeast of Brazil*. Berlin: Springer, 19-41.
- Krol, M., Jaeger, A., Bronstert, A. und Krywkow, J. (2001): The Semi-arid Integrated Model SIM. A Regional Integrated Model Assessing Water Availability and Vulnerability of Eco-systems and Society in NE-Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(7-8), 529-534.
- Jaeger, A., Krol, M. und Bronstert, A. (2001): The Semi-arid Integrated Model SIM. *Proceedings of the German-Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems*. Hamburg.
- Bronstert, A., Jaeger, A., Güntner, A., Hauschild, M., Döll, P. und Krol, M. (2000): Integrated Modelling of Water Availability and Water Use in the Semi-arid Northeast of Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth*, 25(3), 227-232.
- Bronstert, A., Krol, M., Jaeger, A. (2000): *WAVES: Water Availability, Vulnerability of Eco-systems and Society in Northeast Brazil - An Overview of the Interdisciplinary Project and Integrated Modelling*. Proceedings, Deutscher Tropentag, 1999 in Berlin. Humboldt Universität zu Berlin, Germany.
- Krol, M., Jaeger, A., Güntner, A., Krywkow, J. und Bronstert, A. (2000): Concepts, Structure and Application Examples of a Multidisciplinary Regional Integrated Model: The "Semi-Arid Integrated Model (SIM)" - Assessing Water Availability, Vulnerability of Ecosystems and Society in Northeast Brazil. *Geophysical Research Abstracts*, 2, 2000, HSB-39.
- Bronstert, A., Güntner, A., Jaeger, A., Krol, M. und Krywkow, J. (1999): Großräumige hydrologische Parametrisierung und Modellierung als Teil der integrierten Modellierung. in: Fohrer, N. und Döll, P. (Eds.): *Modellierung des Wasser- und Stofftransports in großen Einzugsgebieten*. Kassel: Kassel University Press, 31-40.
- Güntner, A., Hauschild, M., Heinrichs, G., Jaeger, A., Bronstert, A., Döll, P., Forster, M., Krol, M. und Lopez Gil, M.M. (1999). Integrated modelling of water availability and water use at different scales in the semiarid Northeast of Brazil. *Proceedings, Deutscher Tropentag 1999 in Berlin*, Humboldt Universität zu Berlin.
- Bronstert, A., Krol, M., Jaeger, A., Güntner, A., Hauschild, M. und Döll, P. (1999): Integrated Modelling of Water Availability and Management in the Semi-arid Northeast of Brazil. *Geophysical Research Abstracts*, 1(2), 360.

Anhang

A

A.1 Geographische Karte von Ceará und Piauí



Abb. A1.1 Die Bundesstaaten Ceará und Piauí.

A.2 Datenübersicht - Landwirtschaft

Variable	Auflösung			Ausdehnung		Quelle
	räumlich	zeitlich	sonstiges	räumlich	zeitlich	
Erträge	Bundesstaat	Jahr	Pflanze	Ceará	1947-1995	IPLANCE, 1996
Erntefläche	Bundesstaat	Jahr	Pflanze	Ceará	1947-1995	IPLANCE, 1996
Produktion	Bundesstaat	Jahr	Pflanze	Ceará	1947-1995	IPLANCE, 1996
Erntefläche	Munizip	Jahr	Pflanze	Ceará, Piauí	1975-1999	IBGE, 1996b
Erträge	Munizip	Jahr	Pflanze	Ceará, Piauí	1975-1999	IBGE, 1996b
Anbaufläche	Munizip	Jahr	Pflanze	Ceará, Piauí	1990-1999	IBGE, 1996b
Produktion	Bundesstaat	Monat	Pflanze	Ceará, Piauí	1985	IBGE 1985a,b
Bewässerte Fläche	Munizip	Jahr	-	Ceará, Piauí	1985	IBGE 1985a,b
Bewässerte Fläche	Munizip	Jahr	-	Ceará, Piauí	1996	IBGE 1998a,b
Produktion	Munizip	Jahr	Pflanze	Ceará, Piauí	1996	IBGE 1998a,b
Erntefläche	Munizip	Jahr	Pflanze	Ceará, Piauí	1996	IBGE 1998a,b
Bewässerte Fläche	Region	Jahr	Pflanze	Ceará	2000	SEAGRI, 2000
Bewässerte Fläche	Munizip	Jahr	-	Ceará, Piauí	1998	COGERH 1998
Bewässerte Fläche	Bundesstaat	Jahr	Pflanze	Ceará, Piauí	1985	IBGE 1985

Tabelle A2.1: Überblick über die zur Validierung und in der Analyse zur Validierung genutzten landwirtschaftlichen Daten. Weiterhin sind die zur Abschätzung der bewässerten Fläche genutzten Daten aufgeführt. (vgl.Kapitel 5.2.1)

A.3 Datenübersicht - Demographie

Variable	Auflösung			Ausdehnung		Quelle
	räumlich	zeitlich	weitere Unterteilung	räumlich	zeitlich	
Expats	Bundesstaat	Jahr		Brasilien	1992,1993, 1995,1996, 2001	IBGE, 1996c
Einwohner	Bundesstaat	Jahr		Ceará, Piauí	1920,40	?
Einwohner	Munizip	Jahr		Ceará, Piauí	1970,1980, 1985-1989	SUDENE, 1989:
Einwohner	Munizip	Jahr	rural, urban	Ceará	1950 1960, 1970, 1980, 1991,1993	IPLANCE, 1995
Einwohner	Munizip	Jahr	Altersgruppen Geschlecht	Ceará, Piauí	1970,1980, 1991	PNUD et al. 1998
Einwohner	Munizip	Jahr	Altersgruppen Geschlecht rural, urban	Ceará, Piauí	1991	IBGE,1991
Einwohner	Munizip	Jahr	Altersgruppen Geschlecht rural, urban	Ceará, Piauí	1996	IBGE 1997b
Einwohner	Munizip	Jahr	Geschlecht rural, urban	Ceará, Piauí	2000	IBGE,2000

Tabelle A3.1: Überblick über die zur Validierung genutzten demographischen Daten und ihre Quellen.

A.4 Modellstruktur

Technische Realisierung

Das Semi-arid Integrated Modell SIM ist hauptsächlich als Fortran Code unter dem Betriebssystem UNIX umgesetzt. Für das Agrarökonomische Sektormodell RASMO wurde die Optimierungssoftware GAMS genutzt.

SIM und Rasmo sind durch eine gemeinsames Skript miteinander verbunden, welches nach einem gewünschten Simulationszeitraum (als Standard 10 Jahre) das Programm RASMO startet und dabei die Simulation von SIM unterbricht (Abb. A4.1.)

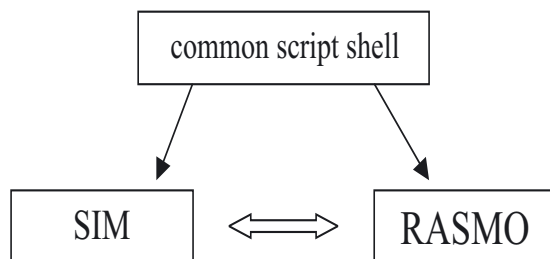


Abb. A4.1 Verbindung von SIM und RASMO

Das Hauptverzeichnis des Modells enthält mehrere Ordner:

climo, hymo, lamo, semo gen

mit den Unterprogrammen,

cbl mit common blocks,

lib mit Bibliotheken der Unterprogramme

data mit Datensätzen für die Modellparameter and Inputdaten und

output indem die Modellergebnisse gespeichert werden.

und das Hauptprogramm *sim*.

Das Hauptprogramm *sim* initialisiert Modelkomponenten, führt die Hauptschleife der Berechnungen mit einem jährlichen Zeitschritt über die Simulationsperiode aus, aktualisiert Variablen für die unterschiedlichen Modellkomponenten und führt eine weitere Simulationsschleife mit einem täglichen Zeitschritt für die Berechnung der Wasserbilanz und der landwirtschaftlichen Produktion durch.

Abb. 4.2 stellt die Organisation des Hauptprogramms mit dem jeweiligen Aufruf der Unterprogramme dar. Zusätzlich bestehen Verbindungen zwischen den Unterprogrammen die durch den Austausch von Variablen entstehen.

Eine kurze Erläuterung der einzelnen Unterprogramme findet sich in Tabelle A4.1.

Das Verzeichnis Gen, das nicht im Schema angezeigt wird, enthält Unterprogramme, auf die von allen Programmen zurückgegriffen wird, wie etwa die Berechnung von Jahresmittelwerten.

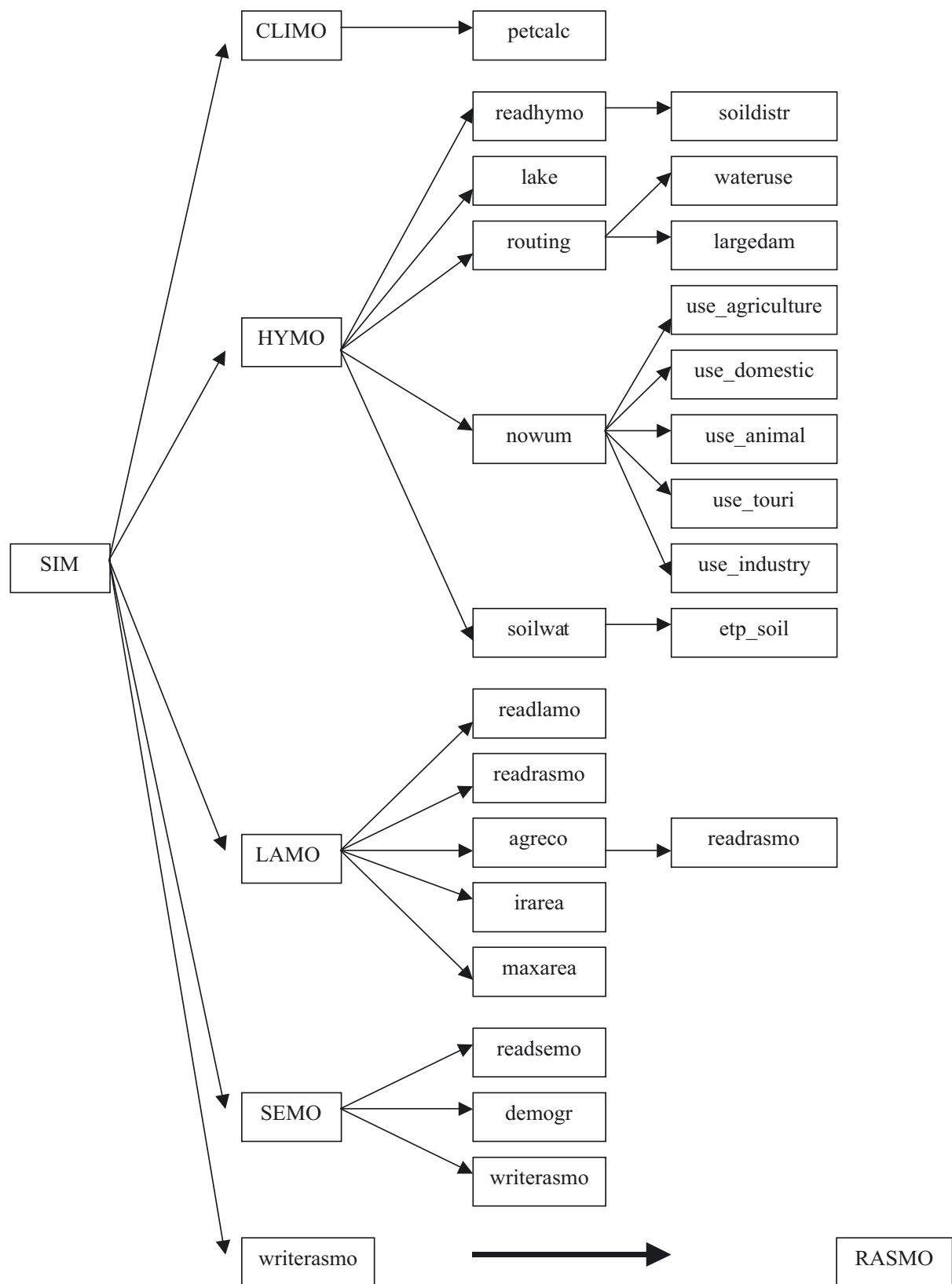


Abb. A4.2 Struktur des Programms des Semi-Arid Integrated Model SIM. Zur Erläuterung der einzelnen Unterprogramme siehe Tabelle A4.1.

Unterprogramm	Programmbeschreibung
CLIMO	liest Klimainputdaten der historischen Rekonstruktion oder Szenariodaten ein
petcalc	berechnet potentielle Evapotranspiration
HYMO	berechnet die Wasserbilanz
readhymo	liest Inputdaten für das hydrologische Modell ein
lake	berechnet Volumina der kleinen Acudes
routing	berechnet den Abfluss zwischen den Munizipien
nowum	berechnet Wassernutzung
wateruse	verbindet Wassernutzung und verfügbares Wasser
soilwat	berechnet Bodenwasserhaushalt
soildistr.	berechnet die Verteilung von Bodenparametern
largedam	berechnet Volumina der großen Stauseen
use_agriculture	berechnet Wassernutzung in der Landwirtschaft
use_domestic	berechnet Wassernutzung in privaten Haushalten
use_animal	berechnet Wassernutzung in der Tierhaltung
use_touri	berechnet Wassernutzung in der Tourismusindustrie
use_industry	berechnet Wassernutzung in der Industrie
etp_soil	berechnet Evapotranspiration des Bodens
LAMO	berechnet landwirtschaftliche Erträge und Produktion
readlamo	liest Inputdaten für das landwirt. Modell ein
readrasmo	liest Inputdaten der Agrarökonomie, die von RASMO simuliert worden sind
agreco	berechnet Farmeinkommen
irarea	berechnet die tatsächlich bewässerte Fläche
maxarea	berechnet die Anbaufläche und die maximale Bewässerungsfläche aus Szenarioannahmen und RASMO Output
SEMO	berechnet Lebensqualität, Migration und BIP
readsemo	liest Inputdaten für das SEMO-Modell
demogr.	simuliert demographische Entwicklungen
writerasmo	schreibt den Output von LAMO und SEMO in einen File, auf den RASMO zugreift

Tabelle A4.1: Die wichtigsten Aufgaben der einzelnen Unterprogramme des Semi-Arid Integrated Model SIM.

Modell	Skala							
	räumlich			zeitlich			technische Realisierung	hauptsächlich angewandte Methodik
	Auflösung	Ausdehnung	überwiegende Ausgabe der Ergebnisse	Auflösung	Ausdehnung	überwiegende Ausgabe der Ergebnisse		
Klima-szenarien	Munizip	Ceará/Piauí	Munizip/Staat	Tage	50 a/ 78 a	mon/a	Datenbank	statistisches Downskaling
WASA	Munizip/ Hydrotop	Ceará/Piauí	Munizip/Staat	Tage	50 a	mon/a	Fortran	deterministisch prozessorientiert
NoWUM	Munizip	Ceará/Piauí	Region/Staat	10d/a	50 a	a	Fortran	Datengetrieben, budgetmodell
RASMO	Munizip	Ceará/Piauí	Munizip	Jahr	-	a	Gams	Optimierungsmodell
YES	Munizip	Ceará/Piauí	Region/Staat	Tage	50 a	a	Fortran	empirisch-deterministisch
SPICE	0.01- 100km ² / Landschafts- einheit	Ceará/Piauí	Landschaftseinheit	-	-	-	Datenbank	Bodendatenbank
MIGFLOW	Munizip	Ceará/Piauí	Region/Staat	a	50 a	a	Fortran	empirisch, Datengetrieben
Demogr. Modell	Munizip	Ceará/Piauí	Region/Staat	Tage	50 a	a	Fortran	deterministisch

Tabelle A4.2: Überblick über die Teilmodelle (zur Definition der vgl. Kapitel 4.3) hinsichtlich ausgewählter Kriterien wie Skala, Programmiersprache, Realisierung.

PIK Report-Reference:

- No. 1 3. Deutsche Klimatagung, Potsdam 11.-14. April 1994
Tagungsband der Vorträge und Poster (April 1994)
- No. 2 Extremer Nordsommer '92
Meteorologische Ausprägung, Wirkungen auf naturnahe und vom Menschen beeinflusste Ökosysteme, gesellschaftliche Perzeption und situationsbezogene politisch-administrative bzw. individuelle Maßnahmen (Vol. 1 - Vol. 4)
H.-J. Schellnhuber, W. Enke, M. Flechsig (Mai 1994)
- No. 3 Using Plant Functional Types in a Global Vegetation Model
W. Cramer (September 1994)
- No. 4 Interannual variability of Central European climate parameters and their relation to the large-scale circulation
P. C. Werner (Oktober 1994)
- No. 5 Coupling Global Models of Vegetation Structure and Ecosystem Processes - An Example from Arctic and Boreal Ecosystems
M. Plöchl, W. Cramer (Oktober 1994)
- No. 6 The use of a European forest model in North America: A study of ecosystem response to climate gradients
H. Bugmann, A. Solomon (Mai 1995)
- No. 7 A comparison of forest gap models: Model structure and behaviour
H. Bugmann, Y. Xiaodong, M. T. Sykes, Ph. Martin, M. Lindner, P. V. Desanker, S. G. Cumming (Mai 1995)
- No. 8 Simulating forest dynamics in complex topography using gridded climatic data
H. Bugmann, A. Fischlin (Mai 1995)
- No. 9 Application of two forest succession models at sites in Northeast Germany
P. Lasch, M. Lindner (Juni 1995)
- No. 10 Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe
M. Lindner, P. Lasch, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 11 Possible Impacts of global warming on tundra and boreal forest ecosystems - Comparison of some biogeochemical models
M. Plöchl, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 12 Wirkung von Klimaveränderungen auf Waldökosysteme
P. Lasch, M. Lindner (August 1995)
- No. 13 MOSES - Modellierung und Simulation ökologischer Systeme - Eine Sprachbeschreibung mit Anwendungsbeispielen
V. Wenzel, M. Kücken, M. Flechsig (Dezember 1995)
- No. 14 TOYS - Materials to the Brandenburg biosphere model / GAIA
Part 1 - Simple models of the "Climate + Biosphere" system
Yu. Svirezhev (ed.), A. Block, W. v. Bloh, V. Brovkin, A. Ganopolski, V. Petoukhov, V. Razzhevaikin (Januar 1996)
- No. 15 Änderung von Hochwassercharakteristiken im Zusammenhang mit Klimaänderungen - Stand der Forschung
A. Bronstert (April 1996)
- No. 16 Entwicklung eines Instruments zur Unterstützung der klimapolitischen Entscheidungsfindung
M. Leimbach (Mai 1996)
- No. 17 Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen - Bericht über das DFG-Rundgespräch am 9. Oktober 1995 in Potsdam
A. Bronstert (ed.) (Juni 1996)
- No. 18 Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, A. Becker (Juli 1996)
- No. 19 Identification of vulnerable subregions in the Elbe drainage basin under global change impact
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Cramer, A. Becker (Juli 1996)
- No. 20 Simulation of soil moisture patterns using a topography-based model at different scales
D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Lahmer, W. Cramer, V. Krysanova (Juli 1996)
- No. 21 International relations and global climate change
D. Sprinz, U. Luterbacher (1st ed. July, 2n ed. December 1996)
- No. 22 Modelling the possible impact of climate change on broad-scale vegetation structure - examples from Northern Europe
W. Cramer (August 1996)

- No. 23 A methode to estimate the statistical security for cluster separation
F.-W. Gerstengarbe, P.C. Werner (Oktober 1996)
- No. 24 Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients
H. Bugmann, W. Cramer (Januar 1997)
- No. 25 The development of climate scenarios
P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe (Januar 1997)
- No. 26 On the Influence of Southern Hemisphere Winds on North Atlantic Deep Water Flow
S. Rahmstorf, M. H. England (Januar 1977)
- No. 27 Integrated systems analysis at PIK: A brief epistemology
A. Bronstert, V. Brovkin, M. Krol, M. Lüdeke, G. Petschel-Held, Yu. Svirezhev, V. Wenzel (März 1997)
- No. 28 Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - A review
M. Lindner (Mai 1997)
- No. 29 Implementation of a Parallel Version of a Regional Climate Model
M. Kücken, U. Schättler (Oktober 1997)
- No. 30 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results
W. Cramer, D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, A. Ruimy, A. Schloss, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 31 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of the seasonal behaviour of NPP, LAI, FPAR along climatic gradients across ecotones
A. Bondeau, J. Kaduk, D. W. Kicklighter, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 32 Evaluation of the physiologically-based forest growth model FORSANA
R. Grote, M. Erhard, F. Suckow (November 1997)
- No. 33 Modelling the Global Carbon Cycle for the Past and Future Evolution of the Earth System
S. Franck, K. Kossacki, Ch. Bounama (Dezember 1997)
- No. 34 Simulation of the global bio-geophysical interactions during the Last Glacial Maximum
C. Kubatzki, M. Claussen (Januar 1998)
- No. 35 CLIMBER-2: A climate system model of intermediate complexity. Part I: Model description and performance for present climate
V. Petoukhov, A. Ganopolski, V. Brovkin, M. Claussen, A. Eliseev, C. Kubatzki, S. Rahmstorf (Februar 1998)
- No. 36 Geocybernetics: Controlling a rather complex dynamical system under uncertainty
H.-J. Schellnhuber, J. Kropp (Februar 1998)
- No. 37 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbondioxid Enrichment (FACE) - Experimentes Maricopa (USA)
Th. Kartschall, S. Grossman, P. Michaelis, F. Wechsung, J. Gräfe, K. Waloszczyk, G. Wechsung, E. Blum, M. Blum (Februar 1998)
- No. 38 Die Berücksichtigung natürlicher Störungen in der Vegetationsdynamik verschiedener Klimagebiete
K. Thonicke (Februar 1998)
- No. 39 Decadal Variability of the Thermohaline Ocean Circulation
S. Rahmstorf (März 1998)
- No. 40 SANA-Project results and PIK contributions
K. Bellmann, M. Erhard, M. Flechsig, R. Grote, F. Suckow (März 1998)
- No. 41 Umwelt und Sicherheit: Die Rolle von Umweltschwellenwerten in der empirisch-quantitativen Modellierung
D. F. Sprinz (März 1998)
- No. 42 Reversing Course: Germany's Response to the Challenge of Transboundary Air Pollution
D. F. Sprinz, A. Wahl (März 1998)
- No. 43 Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten. Zusammenstellung der Beiträge des Workshops am 15. Dezember 1997 in Potsdam
A. Bronstert, V. Krysanova, A. Schröder, A. Becker, H.-R. Bork (eds.) (April 1998)
- No. 44 Capabilities and Limitations of Physically Based Hydrological Modelling on the Hillslope Scale
A. Bronstert (April 1998)
- No. 45 Sensitivity Analysis of a Forest Gap Model Concerning Current and Future Climate Variability
P. Lasch, F. Suckow, G. Bürger, M. Lindner (Juli 1998)

- No. 46 Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern
M. Lindner (Juli 1998)
- No. 47 SPRINT-S: A Parallelization Tool for Experiments with Simulation Models
M. Flechsig (Juli 1998)
- No. 48 The Odra/Oder Flood in Summer 1997: Proceedings of the European Expert Meeting in
Potsdam, 18 May 1998
A. Bronstert, A. Ghazi, J. Hladny, Z. Kundzewicz, L. Menzel (eds.) (September 1998)
- No. 49 Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
H. Österle, J. Glauer, M. Denhard (Januar 1999)
- No. 50 The complete non-hierarchical cluster analysis
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (Januar 1999)
- No. 51 Struktur der Amplitudengleichung des Klimas
A. Hauschild (April 1999)
- No. 52 Measuring the Effectiveness of International Environmental Regimes
C. Helm, D. F. Sprinz (Mai 1999)
- No. 53 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen innerhalb des
Free-Air Carbon Dioxide Enrichment-Experimentes: Ableitung allgemeiner Modellösungen
Th. Kartschall, J. Gräfe, P. Michaelis, K. Waloszczyk, S. Grossman-Clarke (Juni 1999)
- No. 54 Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN
L. Menzel (August 1999)
- No. 55 Dry atmosphere asymptotics
N. Botta, R. Klein, A. Almgren (September 1999)
- No. 56 Wachstum von Kiefern-Ökosystemen in Abhängigkeit von Klima und Stoffeintrag - Eine
regionale Fallstudie auf Landschaftsebene
M. Erhard (Dezember 1999)
- No. 57 Response of a River Catchment to Climatic Change: Application of Expanded Downscaling to
Northern Germany
D.-I. Müller-Wohlfeil, G. Bürger, W. Lahmer (Januar 2000)
- No. 58 Der "Index of Sustainable Economic Welfare" und die Neuen Bundesländer in der
Übergangsphase
V. Wenzel, N. Herrmann (Februar 2000)
- No. 59 Weather Impacts on Natural, Social and Economic Systems (WISE, ENV4-CT97-0448)
German report
M. Flechsig, K. Gerlinger, N. Herrmann, R. J. T. Klein, M. Schneider, H. Sterr, H.-J. Schellnhuber
(Mai 2000)
- No. 60 The Need for De-Aliasing in a Chebyshev Pseudo-Spectral Method
M. Uhlmann (Juni 2000)
- No. 61 National and Regional Climate Change Impact Assessments in the Forestry Sector
- Workshop Summary and Abstracts of Oral and Poster Presentations
M. Lindner (ed.) (Juli 2000)
- No. 62 Bewertung ausgewählter Waldfunktionen unter Klimaänderung in Brandenburg
A. Wenzel (August 2000)
- No. 63 Eine Methode zur Validierung von Klimamodellen für die Klimawirkungsforschung hinsichtlich
der Wiedergabe extremer Ereignisse
U. Böhm (September 2000)
- No. 64 Die Wirkung von erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen auf die Transpiration eines
Weizenbestandes unter Berücksichtigung von Wasser- und Stickstofflimitierung
S. Grossman-Clarke (September 2000)
- No. 65 European Conference on Advances in Flood Research, Proceedings, (Vol. 1 - Vol. 2)
A. Bronstert, Ch. Bismuth, L. Menzel (eds.) (November 2000)
- No. 66 The Rising Tide of Green Unilateralism in World Trade Law - Options for Reconciling the
Emerging North-South Conflict
F. Biermann (Dezember 2000)
- No. 67 Coupling Distributed Fortran Applications Using C++ Wrappers and the CORBA Sequence
Type
Th. Slawig (Dezember 2000)
- No. 68 A Parallel Algorithm for the Discrete Orthogonal Wavelet Transform
M. Uhlmann (Dezember 2000)

- No. 69 SWIM (Soil and Water Integrated Model), User Manual
V. Krysanova, F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan, J. Williams (Dezember 2000)
- No. 70 Stakeholder Successes in Global Environmental Management, Report of Workshop,
Potsdam, 8 December 2000
M. Welp (ed.) (April 2001)
- No. 71 GIS-gestützte Analyse globaler Muster anthropogener Waldschädigung - Eine sektorale
Anwendung des Syndromkonzepts
M. Cassel-Gintz (Juni 2001)
- No. 72 Wavelets Based on Legendre Polynomials
J. Fröhlich, M. Uhlmann (Juli 2001)
- No. 73 Der Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung - Modellierungen
und Folgerungen für das Einzugsgebiet des Glan
D. Reichert (Juli 2001)
- No. 74 Weltumweltpolitik - Global Change als Herausforderung für die deutsche Politikwissenschaft
F. Biermann, K. Dingwerth (Dezember 2001)
- No. 75 Angewandte Statistik - PIK-Weiterbildungsseminar 2000/2001
F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.) (März 2002)
- No. 76 Zur Klimatologie der Station Jena
B. Orlowsky (September 2002)
- No. 77 Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil
A. Güntner (September 2002)
- No. 78 Phenology in Germany in the 20th Century: Methods, Analyses and Models
J. Schaber (November 2002)
- No. 79 Modelling of Global Vegetation Diversity Pattern
I. Venevskaja, S. Venevsky (Dezember 2002)
- No. 80 Proceedings of the 2001 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental
Change "Global Environmental Change and the Nation State"
F. Biermann, R. Brohm, K. Dingwerth (eds.) (Dezember 2002)
- No. 81 POTSDAM - A Set of Atmosphere Statistical-Dynamical Models: Theoretical Background
V. Petoukhov, A. Ganopolski, M. Claussen (März 2003)
- No. 82 Simulation der Siedlungsflächenentwicklung als Teil des Globalen Wandels und ihr Einfluß auf
den Wasserhaushalt im Großraum Berlin
B. Ströbl, V. Wenzel, B. Pfützner (April 2003)
- No. 83 Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen
auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven
F.-W. Gerstengarbe, F. Badeck, F. Hattermann, V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock,
F. Suckow, F. Wechsung, P. C. Werner (Juni 2003)
- No. 84 Well Balanced Finite Volume Methods for Nearly Hydrostatic Flows
N. Botta, R. Klein, S. Langenberg, S. Lützenkirchen (August 2003)
- No. 85 Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis
flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen
W. Lahmer, B. Pfützner (September 2003)
- No. 86 A Note on Domains of Discourse - Logical Know-How for Integrated Environmental Modelling,
Version of October 15, 2003
C. C. Jaeger (Oktober 2003)
- No. 87 Hochwasserrisiko im mittleren Neckarraum - Charakterisierung unter Berücksichtigung
regionaler Klimaszenarien sowie dessen Wahrnehmung durch befragte Anwohner
M. Wolff (Dezember 2003)
- No. 88 Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins - Simulationen für den Ist-Zustand und für
Klimaszenarien
D. Schwandt (April 2004)
- No. 89 Regionale Integrierte Modellierung der Auswirkungen von Klimaänderungen am Beispiel des
semi-ariden Nordostens von Brasilien
A. Jaeger (April 2004)