

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



**Verbundprojekt WAVES
Abschlussbericht für die
Haupt- und Aufstockungsphase
Hydroisotop GmbH
Darstellung und Bewertung der Ergebnisse**

Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.1997 - 31.07.2001
Berichtszeitraum: 01.08.1997 - 31.07.2001
Bearbeitung: Hydroisotop GmbH

Schweitenkirchen, Mai 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Wasserhaushalt und Globaler Wandel	3
1.2	Die Untersuchungsregionen – naturkundliche und sozioökonomische Aspekte	3
1.3	Werkzeuge zum regionalen Verständnis und Management Globalen Wandels	4
2	Ziele des Teilprojektes und Prioritäten der Aufstockungsphase	7
2.1	Ziele des Teilprojektes und Prioritäten	7
2.1.1	Hauptphase	7
2.1.2	Aufstockungsphase	7
3	Die Untersuchungsgebiete	9
3.1	Die natürlichen Randbedingungen	9
3.1.1	Klima	9
3.1.2	Geologie	12
3.1.3	Böden	12
3.1.4	Vegetation	12
3.2	Der Wassersektor	13
4	Methodische Lösungsansätze	20
4.1	Interdisziplinäre Systemanalyse	20
4.2	Datenerhebung und Monitoring	22
4.3	Skalierung	22
4.4	Modellierung	23
4.5	Integration und Entscheidungshilfe (Decision Support)	24
5	Ergebnisse – Modellierung und Validierung (Picos)	25
5.1	Monitoring & Datenerhebung	27
5.2	Wasserhaushalt in der Modellregion Picos	29
5.3	Wasserqualität – Beschreibung der Prozesse	33
6	Ergebnisse – Modellierung und Validierung (Tauá)	36
6.1	Wasserhaushalt in der Modellregion Tauá	36
6.2	Wasserqualität in Tauá	40
7	Beiträge zu weiteren Arbeitsgruppen	45
7.1	Referenzszenario A: Küstenboom und Cash Crops (Globalisierung)	45
7.2	Referenzszenario B: Integrierte ländliche Entwicklung (Dezentralisierung)	46
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	48
9	Literatur	49

Vorbemerkungen

Das Forschungsvorhaben WAVES, die mehrjährige Zusammenarbeit mit brasilianischen und deutschen Partnern zur integrierten Betrachtung von globalem Klimawandel im Nordosten Brasiliens wurde im Sommer 2001 abgeschlossen. Die Hydroisotop GmbH und ihre Mitarbeiter forschten im Teilprojekt Wasserverfügbarkeit.

Zunächst möchten wir an dieser Stelle an Markus Forster erinnern, der in der Vorphase von WAVES im Nordosten zu Fragen der Altersdatierung und Wasserbeschaffenheit arbeitete und den Abschluss des Projektes nicht miterleben durfte. Aus dem ursprünglichen Bemühen, diese Arbeiten in einen umfassenderen und integrierten Kontext zu stellen, entwickelte sich WAVES in den Folgejahren.

In den folgenden Jahren änderten sich die Projektziele bedingt durch die erreichten Zwischenergebnisse und durch die Begutachtung, durch neue Projektpartner und durch sich ändernde Rahmenbedingungen. Während des Projektes entwickelte sich ein größeres Engagement der Weltbank, auf brasilianischer Seite fanden institutionelle Veränderungen statt, die Einfluss auf die Zusammenarbeit hatten.

Methodisch stand während des Projektes die integrierte Modellierung im Vordergrund. Inhaltlich die systematische Betrachtung des Naturraumes und seiner sozioökonomischen Nutzung. Mit einigem Abstand ist jedoch ein weiterer Grundgedanke der Arbeit im Wassersektor, mehr oder weniger bewusst, eine Art Leitmotiv geblieben: *die dezentrale landwirtschaftliche und wasserwirtschaftliche Nutzung der Flächen.*

Die Entwicklung des Nordostens war historisch konzentriert auf die Küste, je ein Verwaltungszentrum in Ceará und Picos und vor allem die naturräumlich vorgegebenen Lebenslinien, die Flüsse. Durch den Bau von Dämmen erfolgte, verbunden mit Bewässerungsprojekten eine weitere Konzentrierung der ländlichen Entwicklung auf den Nahbereich der Dämme, durch deren Vernetzung eine Anbindung und Ausrichtung auf die städtischen Zentren. Die Dürren der vergangenen Jahre und die Probleme der Landflucht zeigen, dass dieses System bereits aktuell und im globalen Klimawandel potentiell sehr anfällig ist.

Kann es möglich sein, durch eine bessere Nutzung der Fläche landwirtschaftlich und durch eine beginnende und von Beginn an nachhaltige Nutzung des Grundwassers eine sichere, nachhaltige Grundlage für dezentrale Versorgung zu bieten? Ist dies eine kulturell und technisch zu bewältigende Aufgabe oder ist durch den Naturraum eine unverrückbare Grenze für die Belastung des Gesamtsystems gegeben, die bei Bevölkerungswachstum und erhöhten Nutzungsansprüchen keinen weiteren Spielraum durch intelligente Lösungen erlaubt?

In diesem Abschlussbericht sind die Ergebnisse und Erfahrungen der Hauptphase und der Aufstockungsphase zusammengefasst. Wir möchten insbesondere im Hinblick auf zukünftige Projekte auch die gewählten Lösungsansätze bewerten und aus unserer Sicht die Erfahrungen bei der Umsetzung komplexer Projekte in einem außereuropäischen kulturellen Kontext darstellen. An dieser Stelle sei noch einmal dem BMBF, den brasilianischen Partnern, den deutschen Kollegen für die Unterstützung und Kooperation gedankt.

Dr. Lorenz Eichinger, Dr. C. Külls & Dr. Susanne Voerkelius

1 Einleitung

1.1 Wasserhaushalt und Globaler Wandel

Das Projekt WAVES – Water Availability, Vulnerability of Ecosystems and Society in the Northeast of Brazil – zielte auf die integrierte Betrachtung von Wasserverfügbarkeit, Ökosystemen und gesellschaftlichen wie wirtschaftlichen Prozessen über kommende Dekaden für zwei brasilianische Flächenstaaten. Es war damit zeitlich und regional langfristig und großräumig angelegt, um Entscheidungshilfen bei den auf dieser Skala zu erwartenden, schleichenden Prozessen der Klimaveränderung geben zu können. Der globale Klimawandel wird vor allem den Wasserkreislauf und die damit verbundenen natürlichen klimatischen, biotischen und abiotischen Speichersysteme und Stoffkreisläufe verändern, weniger die häufig primär diskutierte fühlbare Energie, die mittlere Temperatur. Damit indirekt verbunden sind komplexe und möglicherweise schwerer wiegende sozioökonomische Veränderungsprozesse.

Neben den befürchteten globalen Veränderungen des Klimas gibt es in einer Reihe von semi-ariden Gebieten zudem bereits heute strukturelle Probleme der Wasserversorgung. Während der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts kam es durch die Zunahme der Bevölkerung und durch eine Erhöhung des Pro-Kopf-Wasserverbrauches bereits zu einer unmittelbaren Verschärfung der Wasserversorgungssituation in vielen, vor allem semi-ariden Gebieten der Erde. Die Ökonomie vieler dieser betroffenen Länder hängt stark von der Landwirtschaft ab; die Wasserversorgung ist aus historischen Gründen oft strukturell einseitig auf die Speicherung von Oberflächenwasser ausgerichtet. Damit ist gegenwärtig wenig Spielraum gegeben, auf eine weitere Verschlechterung der Wasserverfügbarkeit zu reagieren.

Es wird erforderlich sein, bei der Ursachenforschung, bei der Prognose und bei Gegenmaßnahmen sowohl die strukturellen Probleme als auch den globalen Klimawandel gemeinsam zu berücksichtigen. Denn ein bereits labilisiertes und grenzwertiges System der Wasserversorgung und einer damit gekoppelten Nahrungsproduktion ist durch Klimawandel besonders gefährdet. Bereits aus diesen allgemeinen Überlegungen ergab sich die Notwendigkeit, bei den Untersuchungen besonderes Augenmerk auf Nachhaltigkeit und eine Erhöhung der Stabilität von Wasser- und Nahrungsmittelversorgung, ihr Speicher- und Ausgleichsvermögen, zu legen.

1.2 Die Untersuchungsregionen – naturkundliche und sozioökonomische Aspekte

Das Untersuchungsgebiet lag im Nordosten Brasiliens in den Bundesstaaten Ceara und Piaui. In beiden Staaten wurden jeweils zwei Munizipien als Pilotregionen ausgewählt, in denen detailliertere Geländeuntersuchungen und eine meso-skalige Modellentwicklung erfolgte: Das Munizip Picos in Piaui und das Munizip Taua in Ceara.

Beide Munizipien liegen im Dürre-Polygon des Nordostens von Brasilien und sind doch hinsichtlich ihrer Wasserverfügbarkeit höchst unterschiedlich. Picos verfügt über sedimentäre Aquifere und daher über ein – wenn auch noch nicht umfassend untersuchtes und überwachtes – so doch schon in erheblichem Maße erschlossenes Potential von Grundwasser. In Picos wurden gezielt die Grundwasserneubildung der sedimentären Aquifere und die Nutzungsmöglichkeiten für den Bocaina-Damm exemplarisch untersucht. Das Munizip Taua hingegen gehört zu den ärmsten Regionen und von Dürren regelmäßig am stärksten betroffenen Regionen im Nordosten Brasiliens. Der Untergrund wird von geklüftetem Kristallin unter geringmächtigen Böden gebildet, das Grundwasser ist auf Grund hoher Salzgehalte von geringer Qualität. In Taua stand die Erforschung der Versalzungsproblematik im Vordergrund. Taua bietet ein Beispiel für jahrzehntelange auch zielgerichtete Forschung deutscher und anderer vor allem europäischer Gruppen, die jedoch praktisch keine Verbesserung der Situation

bewirken konnte, obwohl aus heutiger Sicht die wesentlichen Mechanismen im Prinzip bereits früh erkannt wurden.

Die Untersuchungsgebiete weisen trotz ihrer kulturellen, naturräumlichen und hydrologischen Eigenart und Verschiedenheit als subtropische semi-aride Gebiete auch generelle Merkmale solcher Regionen auf, die durch globalen Klimawandel in besonderem Maße betroffen sein werden:

- Bereits die natürliche Klimavariabilität kann zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Dürren führen, die in extremen Jahren verheerende Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion und die Wasserversorgung haben und in einigen Teilregionen Hungersnöte, wie z. B. im Jahr 1983, hervorrufen können.
- Die Anfälligkeit der Regionen für solche Klimavariabilität ist auch durch die Struktur der Wasserversorgung (hier Dämme zur Speicherung von Oberflächenwasser) bedingt.
- Die Versorgung mit Wasser ist nicht nur quantitativ kaum verlässlich gewährleistet, auch hygienische Probleme sind häufig und verschärfen die Situation *besonders* in Dürrezeiten.

Die unmittelbaren Folgen der Dürren wurden in der Vergangenheit durch kurzfristige Notprogramme gemildert: Im Binnenland Cearás wurde zeitweise eine Notversorgung durch Tankwagen geschaffen (sogenannte ‚carro pipas‘), ebenso wurden mobile Entsalzungsanlagen eingesetzt. Die damit verbundenen erheblichen finanziellen Belastungen für die Bundesländer beschnitten die Möglichkeit für strategische Investitionen und Entwicklungsprogramme zur strukturellen Verbesserung der Versorgungslage. Aus diesem Grunde wurden seit Ende der 1990er Jahre mit Unterstützung der Weltbank Bemühungen unternommen, die Wasserverwaltung zu integrieren und verstärkt in mittel- und langfristige Programme zur Verminderung der Auswirkung von Dürren zu investieren.

In jüngerer Zeit wurden mittelfristige Entwicklungsprogramme im Dammbau, auch mit dem Ziel der Vernetzung von Dämmen und in der Grundwassererschließung vorangetrieben. Die Nutzung von Grundwasser ist – mit regionalen Unterschieden – in Brasilien noch in der Entwicklung begriffen. Die Erschließung, der Schutz und die nachhaltige Nutzung des Grundwassers für Trinkwasserzwecke wird in den Regionen in denen Vorkommen bekannt sind – der Küste Cearas und in Piauí eine wichtige zukünftige Aufgabe sein. Im Rahmen von WAVES wurde durch die Hydroisotop GmbH ein thematischer Schwerpunkt auf diesen Aspekt gelegt, auch in den abschließenden Empfehlungen (Kapitel 9) wurde das Grundwasser besonders berücksichtigt.

1.3 Werkzeuge zum regionalen Verständnis und Management Globalen Wandels

Zum Verständnis und zum vorausschauenden Management möglicher Veränderungen durch Globalen Klimawandel stehen verschiedene Werkzeuge zur Verfügung.

Die **Modellierung** ist gegenwärtig das am stärksten genutzte, von vielen Wissenschaftlern favorisierte und wohl heute wichtigste Instrument. Die Auswirkungen des globalen Wandels werden mit Hilfe numerischer Modellrechnungen unter Annahme verschiedener Szenarien formal beschrieben und in Form von regionalisierten Mittelwerten der daran beteiligten Komponenten dargestellt. Auf regionaler Ebene weisen Klimaparameter und die Veränderungen eines möglichen Klimawechsels auf Grund von Relief, Vegetation, Geologie menschlichen Einflusses jedoch weitere Variationen auf, die von globalen Klimamodellen nicht aufgelöst werden können. Anhand von Skalierungstechniken wird versucht, mit den steuernden Parametern aus globalen Klimamodellen regionale und lokale Prozessmodelle anzutreiben. Diese Modelle können einseitig Parameter von ‚oben‘ nach ‚unten‘ weitergeben oder rückgekoppelt sein. Sie können weiterhin nach Sektoren gegliedert in Teilmodellen unabhängig voneinander laufen oder auf einer Skalenebene integriert werden.

Die **Beobachtung (engl. ‚monitoring‘) sensitiver Umweltindikatoren** ist dann entscheidend, wenn die Komplexität von Systemen mit Modellen nicht sicher abgebildet werden kann. Schließlich kann als

Werkzeug auch eine **Systemanalyse** dienen, bei der solche Bereiche im natürlichen und sozioökonomischen System identifiziert werden, die besonders sensitiv auf Globalen Wandel reagieren mit dem Ziel, die Resistenz gegenüber Klimaveränderungen zu erhöhen. Diese defensive Strategie verfolgt das Ziel, *prinzipiell das Richtige zu tun, um die Auswirkungen von Globalem Wandel zu verringern*. Konkret kann dies bedeuten, in semi-ariden Gebieten das Speichervermögen und die Verteilungsinfrastruktur über die Zeit und im Raum zu verbessern und somit den Ausgleich temporärer und regionaler Mangelsituationen zu vereinfachen. Dieser Ansatz hat den großen Vorteil, regional und politisch skalierbar zu sein: Der Bau von Zisternen (Speicherung von Regenwasser) und die Nutzung von Aquiferen auch als strategische Reserve für Dürrezeiten kann auf unterschiedlichen Ebenen angegangen werden und reduzieren sowohl strukturelle als auch möglicherweise kommende Probleme. Dieser Ansatz wird im Abschlusskapitel noch näher konkretisiert.

In WAVES wurde insbesondere die Modellierung als Werkzeug verwendet. Ein wesentliches Ziel von WAVES war es, Teilmodelle für unterschiedliche Sektoren (Wasser-Landwirtschaft-Ökonomie-Soziologie) auf einer Skalenebene anzupassen bzw. zu entwickeln und miteinander zu integrieren.

Modelle

Modelle dienen dazu, die Einflussnahme unsererseits oder die Auswirkungen von globalen Veränderungen zu simulieren. Damit können wir unter vereinfachten Randbedingungen, die Wirkungsmechanismen verstehen lernen. Das Verstehen und Visualisieren von Wirkungsmechanismen ist besonders dann von Bedeutung, wenn natürliche oder sozio-ökonomische Prozesse komplex oder implizit/verborgen sind und daher von Entscheidungsträgern nicht unmittelbar nachvollziehbar sind.

Komplexe Wirkungen sind dann gegeben, wenn verschiedene Sektoren (Klima-Landwirtschaft-Wasserversorgung-Ökonomie) in Wechselwirkung treten und wir die Auswirkungen auf das Gesamtsystem nicht intuitiv verstehen. Die integrierte Modellierung erzielt die Koppelung, mit der im günstigen Fall eine sektorübergreifende Gesamtprognose erreicht werden kann.

Modelle sind auch dann wichtige Arbeitsinstrumente, wenn Systeme stark nicht-linear und durch verschachtelte Funktionen geprägt und nicht intuitiv verständlich sind. Für die Bodentransferfunktionen für Wasser und Inhaltsstoffe trifft dies zu. Durch die Rückkopplung zwischen Bodenfeuchte und Wassertransport ist eine nicht unmittelbar nachvollziehbare Beziehung zwischen Klima einerseits und hydrologischen (Neubildung des Grundwassers, Abfluss) sowie ökologischen Funktionen (Transpiration, Pflanzenwachstum) andererseits gegeben. Die Hydrosisotop GmbH arbeitete daher im Sektor ‚Wasserverfügbarkeit‘ schwerpunktmäßig an der Umsetzung von meso-skaligen Modellen in den Pilotregionen Picos und Taua, die diese hydrologischen Funktionen in ihrer räumlichen Verteilung abbilden. Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells WARIG in der Hauptphase und des in ein GIS integrierten Modells ArcBIL in der Aufstockungsphase wurde für die Focusregionen Picos und Taua die flächenhafte Neubildung bestimmt. Mit diesem Modell wurde die räumliche Verteilung der Neubildung von Grundwasser dargestellt und eine Bilanzierung über beliebige Einheiten ermöglicht werden.

Monitoring

Als weiteres Werkzeug wurde in WAVES die Überwachung von Umweltparametern insbesondere zur Gewässergüte verfolgt. Auf der bundesstaatlichen Ebene ist eine Überwachung aus logistischen Gründen im Rahmen eines Forschungsprojektes nicht möglich – dies ist die Aufgabe staatlicher Stellen und konnte umfassend nicht von dritten Forschungsgruppen geleistet werden. Das Integrierte Modell und dessen Teilmodelle auf der bundesstaatlichen Ebene waren somit im wesentlichen auf von öffentlichen Stellen zur Verfügung gestellte Daten angewiesen.

Auf der mesoskaligen Ebene wurden über die gesamte Hauptphase und in der Aufstockungsphase durch die Hydroisotop GmbH mehrere Messkampagnen durchgeführt mit dem Ziel:

- Gewässergütedaten in Abhängigkeit von der Struktur der Wasserversorgung zu gewinnen
- Daten zur Wasserqualität von Oberflächenwasser in Staudämmen zu sammeln (Bocaina-Damm), die bei der Entscheidungshilfe berücksichtigt werden können
- Daten zur Altersstruktur des Grundwassers in ausgewählten Regionen zu sammeln. Hiermit sollten Aussagen zur Grundwasserneubildung und Modellprognosen validiert werden (Picos, Taua); hiermit sollte auch das Verständnis für die Grundwasserfließsysteme in beiden Fokusregionen verbessert werden.

Systemanalyse

Abschließend wurden aus fachlicher hydrologischer Sicht und als Ergebnis der Modellierung wichtige Untersuchungsergebnisse in Empfehlungen zusammengefasst (Kapitel 8). Gerade das Beispiel Taua zeigt, dass es bei der Implementierung von Projektergebnissen häufig allein an der Vereinfachung der Aussagen für eine politische und administrative Umsetzung und an einer Formulierung von technischen Folgekonzepten fehlt. Von daher wurden im abschließenden Kapitel zusammenfassend Empfehlungen für

- die nachhaltige Nutzung von Grundwasser in Picos und Taua, insbesondere zur Abschätzung der Nachhaltigkeit von geplanten Bewässerungsprojekten
- eine langfristige Milderung der Versalzungsproblematik in Taua

abgeleitet. Basierend auf dem Systemverständnis, das durch die Arbeit am Integrierten Modell gewonnen wurde, sollten prinzipielle Empfehlungen gegeben werden, wie eine Stabilisierung der Wasserversorgung und eine geringere Empfindlichkeit gegenüber externen Klimaveränderungen erreicht werden kann. Diese Empfehlungen sind im Schlusskapitel unter 8 zusammengefasst.

2 Ziele des Teilprojektes und Prioritäten der Aufstockungsphase

2.1 Ziele des Teilprojektes und Prioritäten

Für die beiden Staaten Ceará und Piauí im Nordosten Brasiliens sollten nachhaltige Entwicklungsstrategien erarbeitet werden, die auch den Aspekten des Globalen Wandels Rechnung tragen. Dafür war eine umfangreiche Systemanalyse zur Bestimmung wesentlicher Wirkungszusammenhänge des Mensch-Umwelt-Systems zu erstellen mit dem Ziel einer quantitativen Beschreibung möglicher Entwicklungen des natürlichen und sozioökonomischen Systems infolge sich verändernder Wasserverfügbarkeit. Die räumliche Integration erfolgte mittels eines Geographischen Informationssystems, technisch erfolgte einer Modellintegration durch eine Kopplung der Teilmodelle.

Der Teilbereich Wasserverfügbarkeit untersuchte den Wirkungsbereich natürliches Wasserdargebot-Wassernutzung. Für diesen Bereich sollten auf unterschiedlichen Maßstabsebenen die Abhängigkeiten der Wasserverfügbarkeit von vorhandenen oder prognostizierbaren Daten untersucht und in Teilmodellen formalisiert werden. Die Hydroisotop GmbH verfolgte dabei drei generelle Ziele:

- hydrologische Modellierung (in den Pilotregionen)
- Untersuchung der Wasserqualität (in den Pilotregionen)
- Aufnahme von Daten (Isotope, hydrologische Daten) zur Entwicklung von Konzeptmodellen und zur Validierung von Modellen

Im Rahmen diese generellen Ziele wurden in der Hauptphase jeweils definierte Teilziele und Vorgaben verfolgt.

2.1.1 Hauptphase

Während der Hauptphase lag das Gewicht auf der Datenerhebung zum Wasserhaushalt und zur Wasserqualität in den Fokusregionen und auf der Entwicklung des mesoskaligen Wasserhaushaltsmodelles WARIG für die Fokusregion Picos (Piauí). Ziel von WARIG war die flächenbezogene Bilanzierung des Wasserhaushalts der Region Picos. Damit sollte für MOSDEL die Wasserverfügbarkeit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Landnutzung berechnet werden. Zudem sollten die Auswirkungen von Klimaänderungen auf der Mesoskala differenziert dargestellt werden. Gleichzeitig ermöglichte WARIG den Abgleich mikro-, meso- und makroskaliger Modelle. WARIG wurde von den AG's Wassermanagement und -ressourcen, Bodenkunde sowie Landschaftsökologie aus speziell angepassten Modell- bzw. Kalibrierungsblöcken (Modulen) aufgebaut. Die jeweiligen Modellergebnisse sollten als Randbedingungen in den nächsten Modellschritt eingehen.

2.1.2 Aufstockungsphase

Hauptziel der Arbeiten war die Untersuchung der Wasserverfügbarkeit unter besonderer Berücksichtigung der Wasserqualität als einem zusätzlich limitierenden Faktor in den Fokusregionen Piauí (PI) and Taua (Ceará). Zusätzlich wurde die Integration der Arbeiten zur Wasserqualität in die Untersuchungen auf gesamtstaatlicher Ebene verstärkt (CE).

Genereller Schwerpunkt aller Arbeiten war die Wasserverfügbarkeit / Wasserqualität und der Bereich Grundwasser/Grundwasserneubildung. Entsprechend der Prioritätensetzung wurden die Arbeiten entlang der folgenden Leitlinien verfolgt:

- Eine Umsetzung der Arbeiten in Picos erfolgt im Rahmen der Entwicklung eines DSS für das Einzugsgebiet des Bocaina Stausees.
- Die Gewässergüte wird in Längsprofilen u.a. am Canal do Trabalhador untersucht.
- Die im Laufe des Projektes gesammelten Daten zur Grundwasserchemie werden für eine Validierung der Wasserhaushaltskomponente des Integrierten Modells verwendet.
- Die Entwicklung von WARIG wird mit der Validierung und Übertragung auf Taua abgeschlossen. Für die Validierung werden zusammen mit der Universität Hohenheim Untersuchungen zur Skalenabhängigkeit und zum Bodenwasserhaushalt durchgeführt.

Der Arbeitsbereich Aussüßung wurde entsprechend der Prioritätensetzung nicht schwerpunktmäßig verfolgt. Allerdings ergaben sich im Rahmen der Wasserhaushaltsmodellierung und der Untersuchung der Salinität des Grundwassers wichtige Hinweise zur Erfolgsaussicht dieses Ansatzes, auf die abschließend eingegangen wird.

3 Die Untersuchungsgebiete

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Bundesstaaten Piauí und Ceará. Diese liegen im Dürre-Polygon Nord-Ost Brasiliens, welches mit einer Fläche von 950.000 km² außerdem einen Großteil der Bundesstaaten Bahia, Alagoas, Pernambuco, Paraíba und Rio Grande do Norte umfasst. Der trockene Nordosten Brasiliens ist im Bundes-Vergleich arm: Das mittlere monatliche Pro-Kopf-Einkommen betrug 1996 mit ca. 215 US \$ weniger als die Hälfte des brasilianischen Durchschnitts.

3.1 Die natürlichen Randbedingungen

Episodische Dürren sind das Hauptproblem des Nord-Ostens. Das subtropische Klimaregime ist durch ganzjährig hohe Temperaturen (25° bis 27° Celsius) und eine Niederschlagsperiode gekennzeichnet. Die Dauer der Trockenzeit und die Niederschlagssumme der Regenzeit weisen hohe jährliche Schwankungen auf. Wegen der hohen Temperaturen und Feuchtedefizite in der Trockenzeit kommt es während der Trockenzeit zu einer schnellen Austrocknung geringmächtiger Böden und damit zum Auftreten unterschiedlicher Formen von Dürre.

Klimatische Dürren - negative hygrische Abweichungen vom Klimamittel - lösen landwirtschaftliche Dürren - physiologisch wirksamen Mangel in der Wasserversorgung von Nutzpflanzen - und hydrologische Dürren aus, welche durch einen Mangel an verfügbarem Oberflächenwasser bzw. an nutzbarem Grundwasser gekennzeichnet sind. Diese einzelnen Dürretypen sind für die System-Analyse von Bedeutung, werden jedoch auf Grund der Bewirtschaftung von Oberflächen- und Grundwasser für Bewässerungszwecke nicht getrennt wahrgenommen.

Wird für den Nordosten als Definition von Dürre das volkswirtschaftlich spürbare Auftreten einer landwirtschaftlichen oder hydrologischen Dürre mit spürbaren Einkommensverlusten oder Versorgungsengpässen zu Grunde gelegt, so liegt die jährliche Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Dürre für weite Teile der Bundesstaaten Piauí und Ceará zwischen 40 bis 80 %.

3.1.1 Klima

Der Nordosten Brasiliens ist eine semi-aride Region. Semi-aride Regionen sind ‚teiltrocken‘, durch wiederkehrende Trockenzeiten gekennzeichnet. Während der Trockenzeit übersteigt das Verdunstungsvermögen den Niederschlag, die klimatische Wasserbilanz wird negativ. Die jährliche Niederschlagssumme von 600 bis 900 mm und von weit über 1000 mm/Jahr in den Gebirgsregionen wird durch ein hohes Verdunstungspotential während der Sommerregenzeit und gleichbleibend hohe Temperaturen und Feuchtedefizite während der Trockenzeit aufgezehrt: die Bildung von verfügbarem Boden-, Oberflächen- und Grundwasser ist dadurch begrenzt.

Im Untersuchungsgebiet variieren die Jahressummen des Niederschlages von Jahr zu Jahr stark. Das Flächenmittel des Niederschlages in der Untersuchungsregion schwankt zwischen 400 mm (1915) und 1500 mm (1985). Der Niederschlag nimmt von der Küste zum Landesinneren hin deutlich ab. Im Westen der Region werden höhere Niederschläge als im Osten beobachtet. In den Gebirgsregionen und insbesondere auf deren Luvseiten ist der Niederschlag in der Regel höher als in den anderen Gebieten. Ein ausgesprochen niederschlagsarmes Gebiet (500 mm - 600 mm) erstreckt sich südlich der Serra do Machado bis zum Nordwestrand der Chapada do Araripe (Fokusgebiet Tauá).

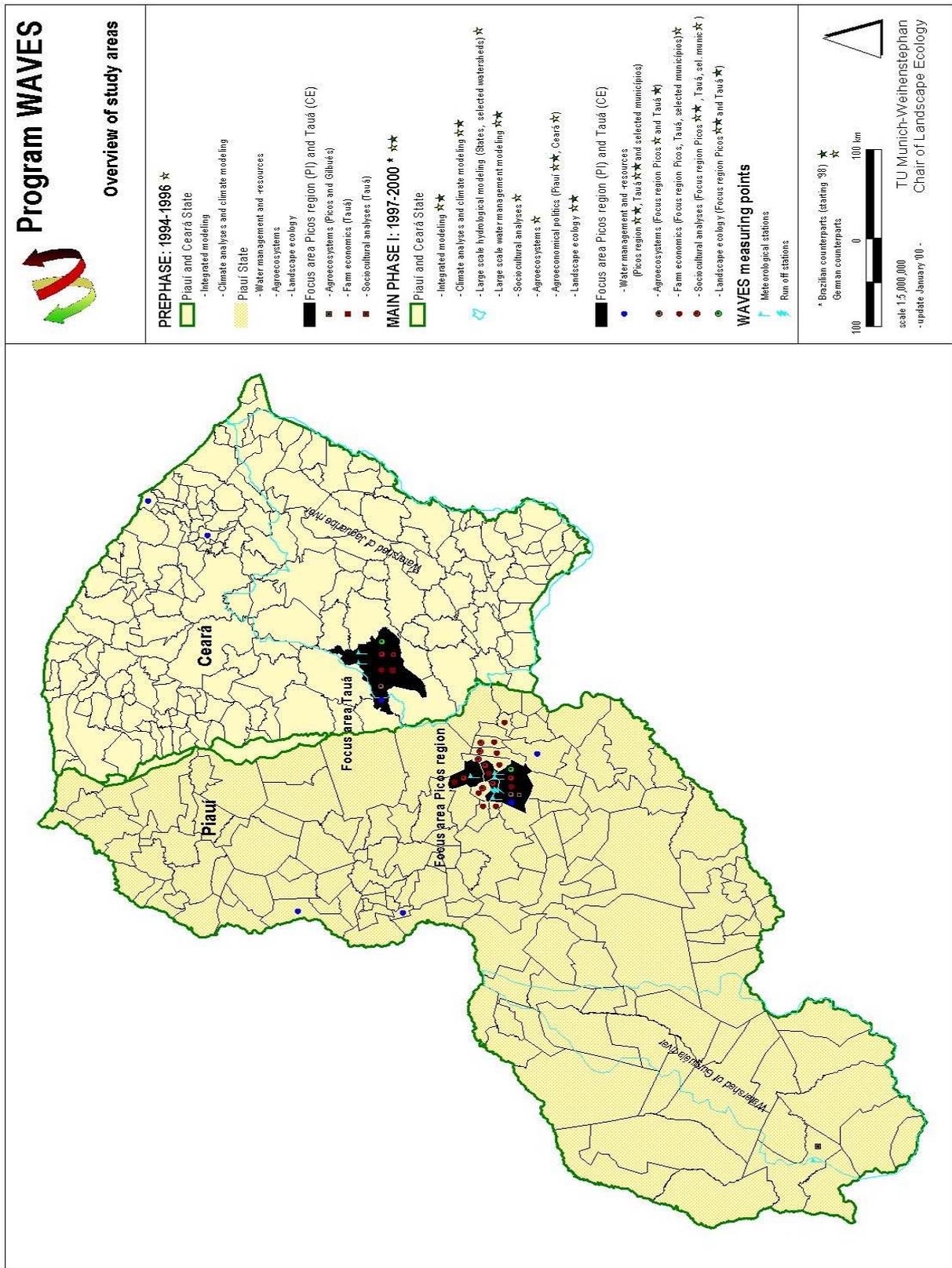


Abb. 3.1.1 Übersicht über das Untersuchungsgebiet von WAVES und geographische Verteilung der Feldaktivitäten in Piauí und Ceará

Die Länge der Regen- und Trockenzeiten ist ebenso unregelmäßig (zwischen ca. 50 und 270 Tagen). Der Jahreszyklus von Regen- und Trockenzeit und dessen Schwankungen resultieren aus der oszillierenden Bewegung der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ). Wandert die ITCZ weniger weit südlich, so kommt es zu einer Abschwächung der Regenzeit (Hastenrath, 1991). Die Bewegung der ITCZ hängt unter anderem auch von der Lage des nord- und südatlantischen Hochdruckgürtels ab und diese wiederum von der herrschenden Meeresoberflächentemperatur (SST). Auch El-Nino-Ereignisse können Einfluss auf die Länge und Stärke der Regenperioden haben (Parry et al., 1988).

Das hygrische Klima der Fokusregionen unterscheidet sich neben der Jahressumme vor allem in der jahreszeitlichen Dynamik. Im mittleren und westlichen Teil von Piauí setzen die Niederschläge nach der Trockenzeit im Vergleich zu den übrigen Gebieten etwas früher ein (siehe Abbildung 3.1.1). In den Monaten Oktober und November werden im Westen Piauis bereits nennenswerte Niederschläge gemessen, während in der Küstenregion noch kaum Niederschlag fällt. Klimaparameter für die Referenzgebiete Picos und Taua sind in Tabelle 3.1.1 dargestellt. Besonders das späte Auftreten von Niederschläge kann Wassermangelsituationen verursachen.

Tab. 3.1.1: Mittlere Monatssummen des Niederschlags in mm für die Referenzgebiete, Bezugszeitraum: 1962 - 1971 (auf 10 mm gerundete Werte)

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

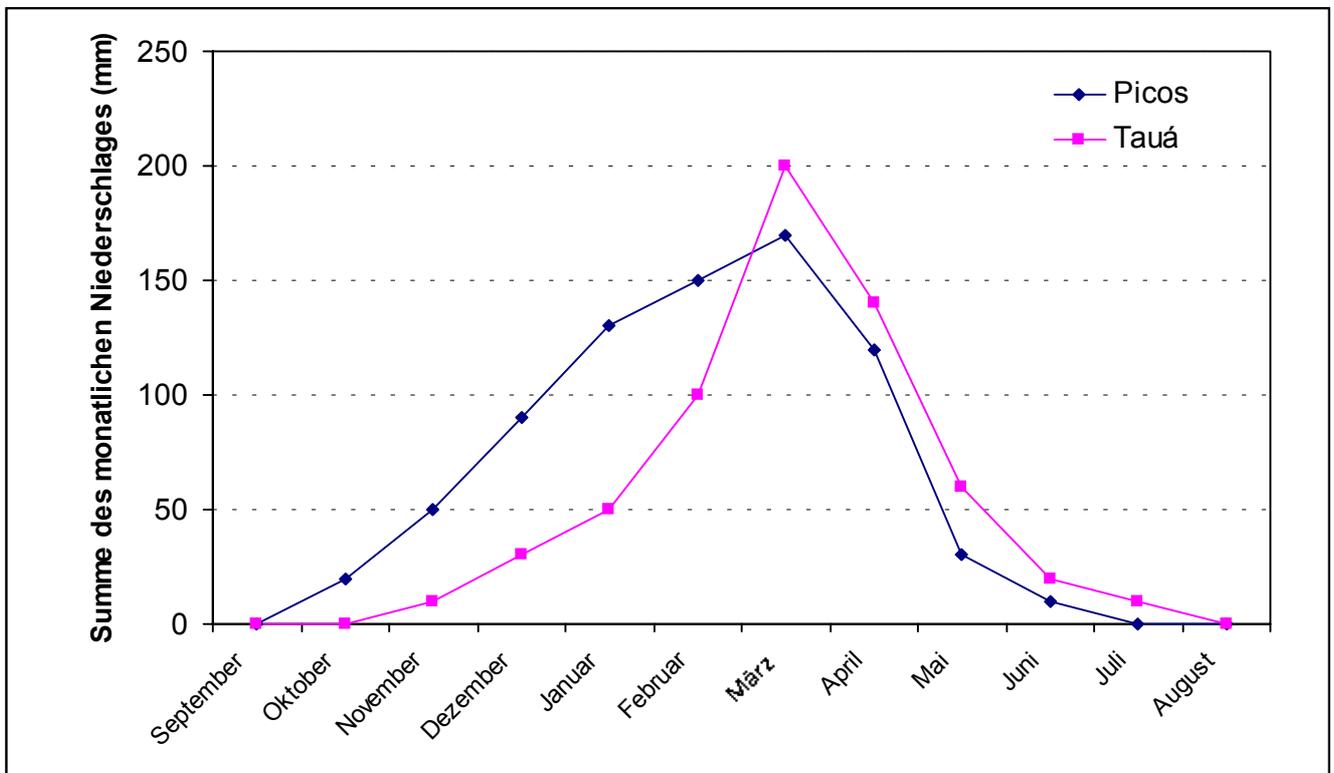


Abb. 3.1.2: Niederschlagsregime in den Fokusgebieten Picos und Taua

3.1.2 Geologie

Geologisch können im Untersuchungsgebiet im wesentlichen drei größere Bereiche unterschieden werden.

- Das sedimentäre **Parnaíba-Becken** bedeckt ca. 80% der Landesfläche Piauí. Es fällt leicht nach Westen zum Grenzfluss Parnaíba ein. Im Parnaíba-Becken entstand eine klassische Schichtstufenlandschaft mit Gebirgsketten (Serras) und Hochflächen (Chapadas) – in den Tälern sind die Flurabstände zum Teil gering. Einige Schichten sind grundwasserführend, die Vorflut wird teilweise vom Parnaíba-Fluss gebildet.
- Der **kristalline Sockel** im Zentrum des Untersuchungsgebietes bedeckt den größten Teil der Landesfläche von Ceará. Auch im Südosten Piauí steht kristallines Grundgebirge an, welches morphologisch leicht gewellte Ebenen ausbildet, die durch einzelne Bergketten oder Inselberge unterbrochen sind.
- Schließlich bilden **alluviale und litorale Sedimente** in größeren Flüssen, entlang von Störungszonen und vor allem in der Küstenregion Grundwasserkörper unterschiedlicher Größe.

3.1.3 Böden

Die Mehrzahl der in der Region vorkommenden Bodentypen weist eine geringe Bodenfruchtbarkeit auf. Auf Grund ihrer Textur ist das Haltevermögen der Böden für Nährstoffe und Wasser begrenzt. Bodenversalzung und Bodenversauerung limitieren die landwirtschaftlichen Nutzung. Dem Klima und den Bodenverhältnisse nicht angepasste Landbewirtschaftung kann diese Prozesse verstärken.

3.1.4 Vegetation

Klima, Relief, Ausgangsgestein und Bodenbildung haben im Nordosten Brasiliens zur Ausbildung der für diese Region typischen Vegetationsformen *Caatinga* und *Cerrado* geführt (Seibert, 1996). Beide Vegetationsformen weisen selbst in den Gebieten mit höheren Niederschlägen xeromorphe Merkmale auf. Diese ist eine Folge der ungünstigen Niederschlagsverteilung, einer geringe Wasserspeicherfähigkeit der Böden und hoher Verdunstungsverluste. Nach Schätzungen sind noch 82,9% der Fläche in Piauí und über 93,3% in Ceará von natürlicher Vegetation bedeckt (die restliche Fläche gilt als agrarisch genutzt, die Anteile von Wasserflächen sind jeweils kleiner als 0,2 %, in Ceara sind ca. 1 % in Piauí weniger als 0,1 % der Fläche versiegelt (Quelle: Agrarzensus 1995/96, IBGE, 1998a).

‚Cerrado‘ findet man überwiegend westlich des Flusses Gurguéia (Piauí). Der Cerrado hat wegen der stark verwitterten Böden (mit hohem Anteil an freiem Aluminium) und der häufig auftretenden Waldbrände eine geringe Baumdichte. Der Trockenwald der ‚Caatinga‘ ist vor allem im kristallinen Bereich (vor allem in Ceará) vorherrschend (Abb. 3.1.2). Zwischen beiden Vegetationszonen befindet sich eine Übergangszone („Zona de transição“), in der auch Formen des „Floresta Estacional“ zu finden sind. In den Flusstälern sowie in niederschlagsreicheren Küstengebieten sind hygrophile Wachspalmenavannen (Carnaúba-Palmen) anzutreffen.

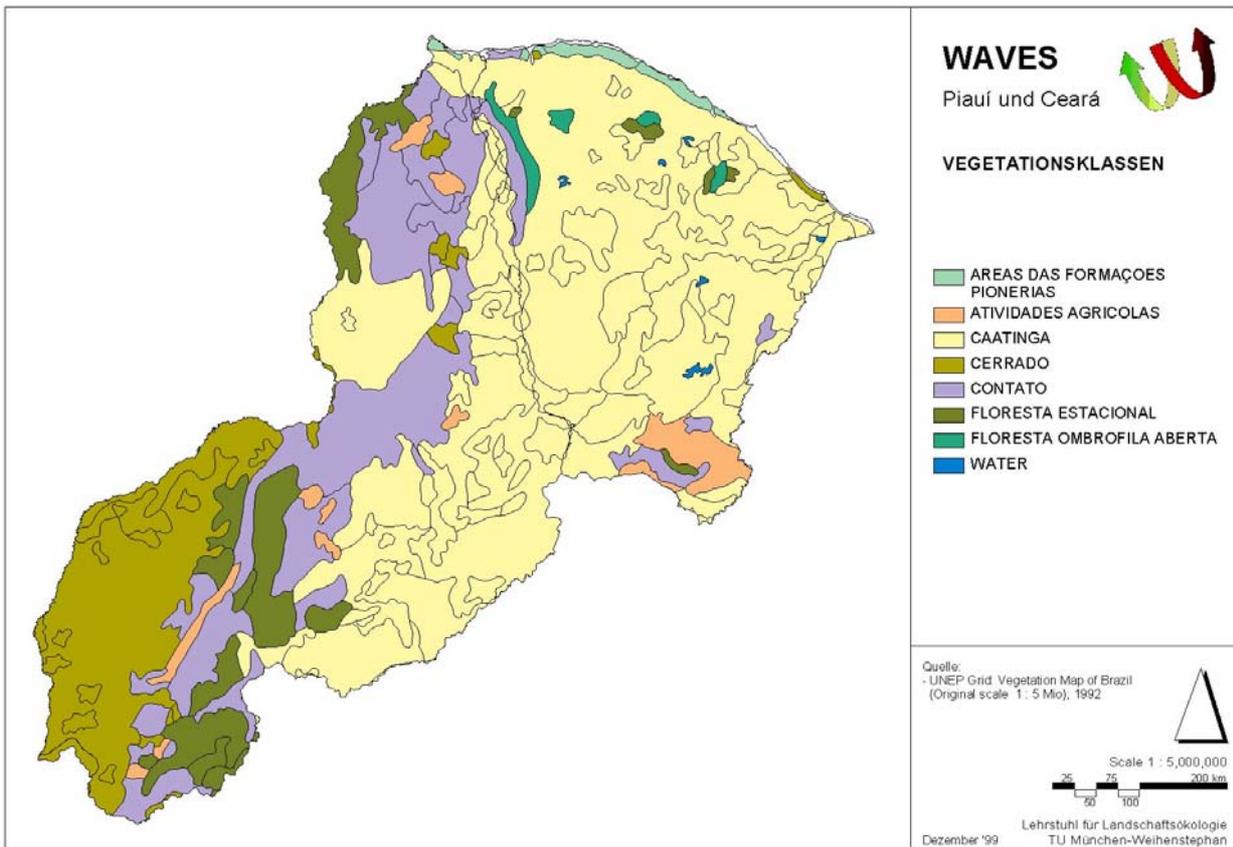


Abb. 3.1.3: Vegetationskarte des Untersuchungsgebietes

3.2 Der Wassersektor

Wasserrechtliche Rahmenbedingungen

Gesetzliche Grundlage des Umganges mit der Ressource Wasser in Brasilien ist das brasilianische Wassergesetz 9.433 vom 8.1.1997. Danach ist Wasser ein öffentliches Gut; als begrenzte Ressource hat es einen ökonomischen Wert. In Situationen der Wasserknappheit hat die Versorgung von Mensch und Tier Priorität. Eine multiple Nutzung des Wassers soll jederzeit durch effektives Wassermanagement gewährleistet werden. Wassermanagement soll dezentralisiert in den jeweiligen Wassereinzugsgebieten unter Partizipation von Regierung, Nutzern und Gemeinden erfolgen. Hauptziele des Gesetzes sind es, allen einen Zugang zu Wasser zu gewähren sowie die Qualität und Quantität der Ressource bei Nutzung durch Kontrollen sicherzustellen.

Der Staat Ceará hat bereits seit 1992 ein eigenes Wassergesetz. In Ceará koordiniert das Wassermministerium SRH (Secretaria dos Recursos Hídricos) ein Netz von Institutionen, die für unterschiedliche Aspekte des Wassermanagements zuständig sind. Die Exekutive in Piauí ist im Aufbau begriffen.

Wasserverfügbarkeit

Beide Bundesstaaten sind durch hohe jährliche potentieller Verdunstung gekennzeichnet. Der zum Abfluss gelangende Anteil des Niederschlages ist gemäss der Ergebnisse des großskaligen Wasserhaushaltsmodell HYMO-WA im Jahresmittel in Ceará mit 16,9% größer als in Piauí (8,4%). Die reale Evapotranspiration und die geschätzte Grundwasserneubildung weisen hingegen in Piauí höhere Werte auf als in Ceará.

Das Fokusgebiet Tauá in Ceará liegt geologisch im Bereich des präkambrischen kristallinen Sockels auf dem sich nur geringmächtige Böden ausbilden. Somit werden nach einer schnellen Wassersättigung der Böden größere Mengen von Oberflächenabfluss gebildet. Die primäre Neubildung von

Grundwasser (direkte Bodenpassage) im Festgesteinsbereich ist hoch, allerdings kommt ein großer Teil dieses Wassers zur Wiederverdunstung. Tabelle 3.2.1 gibt eine auf einer großskaligen Modellierung basierende geschätzte Wasserbilanz für die Untersuchungseinheiten wider.

Tab. 3.2.1: Mittlere jährliche Werte [mm/a] für Komponenten des Wasserkreislaufs und der Wassernutzung für Ceará, Piauí und die Fokusgebiete.

[mm/a]	Ceará	Piauí	Tauá	Picos
Niederschlag ^a	910	925	741	671
Potentielle Verdunstung ^b	2164	2327	2255	2312
reale Evapotranspiration ^b	708	856	595	655
Grundwasserneubildung ^b	48	69	1	12
Abfluss ^b	154	78	145	4
Wasserentnahme / konsumptive Wassernutzung ^c				
Bewässerung	2,67 / 1,60	0,61 / 0,37	0,00 / 0,00	4,06 / 2,44
Tiere	0,56 / 0,56	0,26 / 0,26	0,63 / 0,63	0,60 / 0,60
Haushalte	1,55 / 0,31	0,49 / 0,10	0,35 / 0,07	2,63 / 0,53
Industrie	0,32 / 0,06	0,02 / 0,00	0,00 / 0,00	0,11 / 0,02
Tourismus	0,11 / 0,02	0,01 / 0,00	0,00 / 0,00	0,02 / 0,00

(a) Historische Rekonstruktion AG Klimaanalyse, Periode 1921-1980, (b) Modellierung mit dem großskaligen hydrologischen Modell HYMO-WA, Periode 1921-1980, (c) Berechnungen mit dem großskaligen Wassernutzungsmodell NoWUM für 1996-98, Bewässerung 1951-1980

In Ceará beträgt der Verlust von Flusswasser durch Infiltration ins Flussbett und Verdunstung bis zu 5% des Abflusses auf 10 km Fließlänge (Araújo & Ribeiro, 1996). Für den im Fokusgebiet Picos genauer betrachteten Fluss Guaribas wurde eine Verdunstung von kleiner 1% abgeleitet sowie aufgrund der hydrogeologischen Situation eine Exfiltration von Grundwasser in den Fluss.

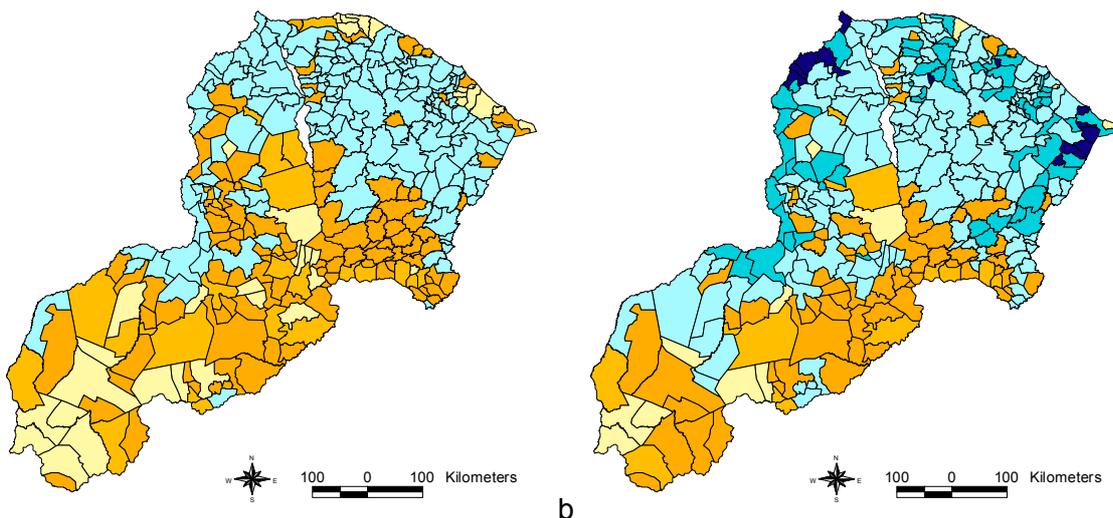


Abb. 3.2.1: Mittlerer jährlicher Abfluss der Municipien [mm/a], (a) ohne Berücksichtigung der Zuleitung aus höher gelegenen Municipien über das Gewässernetz, (b) mit Berücksichtigung der Zuleitung aus höher gelegenen Municipien über das Gewässernetz

Wassernutzung

In Ceará ist 90% des genutzten Wassers Oberflächenwasser, da ergiebigeres sedimentäre Grundwasserleiter nur auf 20% der Fläche Ceará (an der Küste, in der Cariri und im mittleren Jaguaribetal) verbreitet sind. In Piauí besteht fast überall der Zugang zu qualitativ gutem Grundwasser, wenn auch teilweise erst in Tiefen, die Brunnenbohrungen mit entsprechend hohen Kosten erfordern. Die Wasserversorgung der piauiensischen Städte erfolgt fast vollständig mit Grundwasser; wenige Städte, die z.B. am Parnaíba liegen, nutzen zusätzlich Flusswasser. In Ceará werden nur wenige Städte an der Küste und in der Cariri ausschließlich mit Grundwasser versorgt. Die ländliche Bevölkerung nutzt alle ihr zur Verfügung stehenden Quellen (Grund-, Oberflächen- und in Zisternen gesammeltes Regenwasser), teilweise saisonal alternierend. Bewässerungswasser in Ceará ist Oberflächen- und Alluvialwasser; die Nutzung von kristallinem Grundwasser ist hierfür zu teuer. Im Norden Piauí wird überwiegend mit Fluss, Stausee- und Lagunenwässern, im Süden mit Grundwasser bewässert. In beiden Bundesstaaten bezieht die Industrie das Wasser entweder von der öffentlichen Wasserversorgung oder aus eigenen Brunnen.

Detaillierte Zahlen zur Wasserentnahme und konsumtiven Wassernutzung 1997 in den verschiedenen Nutzungssektoren liegen, räumlich differenziert, erstmalig durch die Berechnungen mit dem Modell NoWUM für die beiden Bundesstaaten vor. Insgesamt ist der Wasserbedarf Ceará viermal so hoch wie der Piauí. Auf gesamtstaatlicher Ebene dominieren in beiden Staaten die Bewässerung und nachfolgend die Versorgung der Haushalte die Wasserentnahme (Tab. 3.2.1). Die höchsten Werte treten in den urbanen Ballungszentren wie Fortaleza, Crato, Teresina, Parnaíba sowie in Municipien mit großen Bewässerungsflächen (Litoral, Jaguaribetal, Cariri, Serra de Ibiapaba) auf.

An dritter Stelle steht die Entnahme für die Viehbestände, die prozentual in Piauí bedeutsamer ist als in Ceará. Die konsumtive Wassernutzung der Viehbestände ist dagegen die zweithöchste nach der Bewässerung. Industrie und Tourismus spielen eine untergeordnete Rolle in der gesamtstaatlichen Wassernutzungsbilanz. Allerdings konzentrieren sich diese beiden Sektoren auf bestimmte Municipien und erreichen dort eine deutlich höhere Bedeutung, z.B. in den Küstenmunicipien.

Wasserknappheit

Der Nordosten Brasiliens zeichnet sich durch eine geographisch und zeitlich unregelmäßige Verteilung seiner Wasserressourcen aus. Ceará wird als Wassermangelgebiet ausgewiesen. Mit der hier vorliegenden Abschätzung der Wassernutzung in Bezug zur Oberflächenwasserverfügbarkeit lassen sich von Wasserknappheit besonders betroffene Gebiete in den beiden Bundesstaaten aufzeigen. Der Vergleich der Wassernutzung mit der natürlichen Wasserverfügbarkeit in einem Monat der Trockenzeit zeigt, dass die Wasserentnahme die Verfügbarkeit in den meisten Municipien übersteigt. Die Wasserversorgung ist somit auf Wasser aus größeren Stauseen, das während der Regenzeit gespeichert wurde, und auf Grundwasserverfügbarkeit oft aus größerer Entfernung angewiesen. Beobachtungen vor Ort zeigen entsprechend, dass die ländliche Bevölkerung in der Trockenzeit mit Wasser aus Tankwagen (carro pipa) versorgt wird. In Ceará werden jährlich in bis zu 47% der Municipien Wassertankwagen eingesetzt, u.a. regelmäßig in Tauá.

In einer großen Zahl von Municipien kann im Trockenjahr der jährliche Wasserbedarf nicht durch die Verfügbarkeit an Oberflächenwasser gedeckt werden, wenn keine Einschränkungen in der Wasserentnahme vorgenommen werden. Auffallend im räumlichen Muster ist das Wasserdefizit insbesondere für die in Flussgebieten hochliegenden Municipien ohne oberstromigen Zufluss und für das Landesinnere Ceará (Sertão). In Tauá führte dies 1999 dazu, dass auch die Stadtbevölkerung mit Tankwagen beliefert werden musste. Extreme Dürren forderten in der Vergangenheit außergewöhnliche Maßnahmen: so wurde 1993 innerhalb von drei Monaten der „Canal do Trabalhador“ errichtet, der den Jaguaribe mit dem Stauseesystem Fortalezas verbindet. Mit Wasser, welches aus dem Orós-Stausee abgelassen wurde, konnten somit die 2,6 Mio. Bewohner des Großraumes Fortaleza versorgt werden.

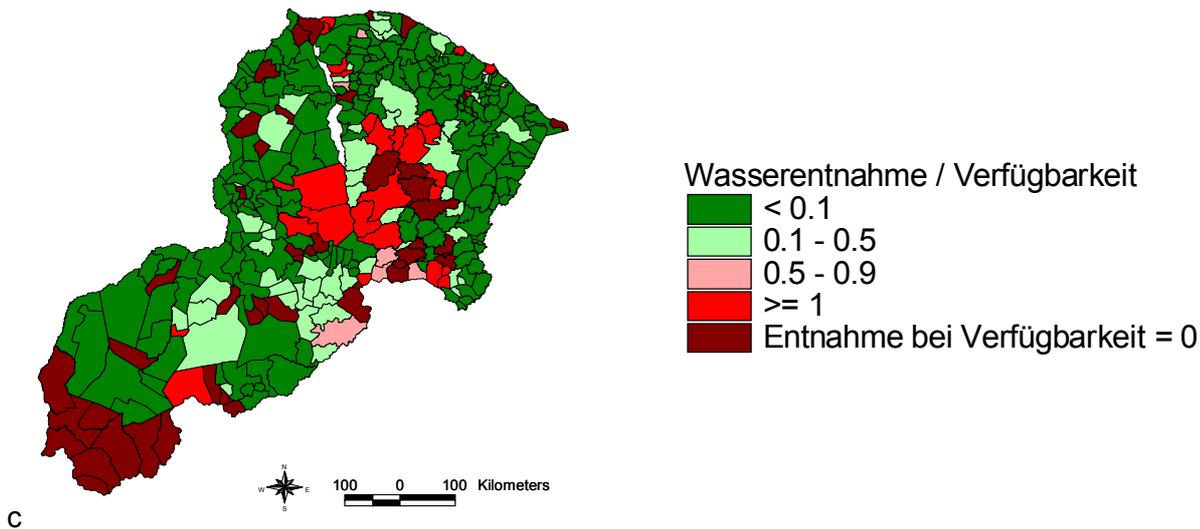


Abb. 3.2.2: Verhältnis zwischen natürlicher Wasserverfügbarkeit (Oberflächenabfluss) (berechnet mit HYMO-WA) und Wasserentnahme (berechnet mit NoWUM), Jahreswerte im Trockenjahr 1970.

Es ist zu berücksichtigen, dass in den sedimentären Gebieten Piauí ein großer Teil des Wasserbedarfs durch Grundwasserentnahmen gedeckt wird. Dies wird deutlich an den Zahlen für das Munizip Picos (Tab. 3.2.1), dessen Wasserentnahme die natürliche Verfügbarkeit von Oberflächenwasser übersteigt. Ob die Nutzung von Grundwasser überall nachhaltig ist, d.h. langfristig die Entnahme nicht die Neubildung überschreitet, wurde im Aufstockungszeitraum untersucht (siehe Abschnitt 5).

Wasserinfrastruktur

In der Vergangenheit wurde dem steigenden Wasserbedarf (Bevölkerungswachstum, Ausdehnung der Bewässerungsflächen, Wachstum der Industrie und des Tourismus) durch Ausbau der Wasserinfrastruktur Rechnung getragen. Die beiden staatlichen Organisationen DNOCS und SUDENE, speziell für die Förderung und Entwicklung des Nordostens gegründet, waren seit den 50er Jahren mit dem verstärkten Bau von Stauseen und der Bohrung von über 50.000 Brunnen im gesamten Nordosten in den 60er Jahren betraut. Anfang der 70er wurde mit der Errichtung großer Bewässerungsprojekte begonnen.

Heute gibt es 37 Stauseen mit mehr als 50 Mio. m³ Speichervolumen in Ceará und 5 in Piauí und zudem mehrere Tausend kleine Açudes. Die Zahl der Açudes ist aufgrund der klimatischen und der geologischen Voraussetzungen in Ceará größer als in Piauí. Bei allen Stauseen bestehen große Verlusten durch die hohe potentielle Evapotranspiration von 2000 bis 2500 mm/a. Bei großen Stauseen liegt der Verlust zwischen 30 und 40% des jährlich zufließenden Wassers, bei kleineren flachen Stauseen noch höher. Der für den in einem relativ tiefen, schmalen Tal angelegten Bocaina-Stausee ermittelte Verdunstungsverlust beträgt 30%. Für den Stausee Trici bei Tauá wurde anhand des Mineralisationsverlaufs eine Verdunstung von 70% abgeleitet.

In Ceará existieren fast doppelt so viele Brunnen wie in Piauí; allerdings sind nur 57% der cearensischen, aber 86% der piauiensischen Brunnen in Betrieb (Tab. 3.2.2). In Piauí überwiegen Tiefbrunnen. Für Ceará sind daneben auch Flachbrunnen (poços amazonas) typisch, die in den bis zu 30 m mächtigen Talsedimenten entlang der Flussläufe angelegt sind. Sie ermöglichen nur eine geringe Entnahme, sind aber aufgrund der einfachen Fördertechnik zu 87% in Betrieb. 45% der cearensischen Tiefbrunnen wurden aufgegeben; auch viele der aktiven Tiefbrunnen haben erhöhte Salzgehalte. Wie viel Grundwasser tatsächlich gefördert wird, ist nicht ermittelbar, da nur wenige Aufzeichnungen über die Entnahmen vorhanden sind. Große Unsicherheit besteht über die jeweilige Größe der Bewässerungsflächen, da in keinem der beiden Bundesstaaten bislang ein flächendeckendes Nutzerkataster erstellt wurde. Die in Tabelle 3.2.2 angegebenen Flächen spiegeln die Einschätzung von

Experten in Ceará und Piauí wider. Sie sind deutlich kleiner als die Angaben im Agrarzensus 1995/96 (IBGE, 1998a): in Ceará um Faktor 2,6 und in Piauí um Faktor 1,4.

Tab. 3.2.2: Quantifizierung der Wasserinfrastruktur auf bundesstaatlicher und Fokusgebietsebene 1997.

	Ceará	Piauí	Tauá	Picos
Gesamtvolumen aller Stauseen (10^9 m^3)	11,6	6,0		
Anzahl großer Stauseen (Stauvolumen > 50 Mio. m^3)	37	5		
mittlere Anzahl von Stauseen je 1000 km^2	47.7	0.7		
Anzahl vorhandener Brunnen	13300	7040 (ohne priv. Brunnen)	385	800
Anzahl aktiver Brunnen	7581	6080		600
potentielle GW-Entnahme [$10^6 \text{ m}^3/\text{a}$]		272	2	21
Anschluss der Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung [%]	46	54	33	63
Anschluss der urbanen Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung [%]	66	93	69	100
Anschluss der Bevölkerung an die Kanalisation [%]	20	2	0	2
Bewässerungsfläche [ha]	43096	13170	0	613

[Daten aus unterschiedlichen Quellen.]

Die öffentliche Wasserversorgung versorgt fast ausschließlich die Bewohner der Muniziphauptstädte. In ländlichen Gebieten fehlt fast immer eine sichere Wasserversorgung. 1997 waren 54% der piauiensischen Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossen und hatten einen Durchschnittsverbrauch von 94 l/p/d, in Ceará betrug der Anschlussgrad zum gleichen Zeitpunkt 46% bei 135 l/p/d (Tab. 3.2.2). Gegenwärtig sind 20% der Bevölkerung in Ceará und 2% in Piauí an eine Kanalisation angeschlossen. Der größte Teil der Abwässer fließt ungeklärt in die Gewässer. Für 15 der größeren Städte in Ceará laufen die Genehmigungsverfahren für Kläranlagen bei der Umweltbehörde. Das Betreiben, die Unterhaltung und Ausdehnung von Wasserinfrastruktur ist allem voran eine Kostenfrage. Die Einrichtung eines Wasser- und Abwasseranschlusses kostet heute etwa 1000 R\$/Familie. Die mittleren Kosten (Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten) im Jahr 1999 in Ceará für Stauseewasser belaufen sich auf 64 R\$/1000 m^3 und 68 R\$/1000 m^3 für wiedergenutztes Wasser, welches in Stabilisationsbecken aufbereitet wurde (1,90 R\$ = 1 U\$). Die Kosten von Brunnen im Sediment betragen 63 R\$/1000 m^3 und 88 R\$/1000 m^3 für Brunnen im Kristallin, Ursache der Differenz hier sind die höheren Investitionskosten für Brunnen im Kristallin (Kosten wurden erhoben vom brasilianischen WAVES-Teilprojekt zu Wasserkosten, Prof. de Araújo).

Wasserqualität

Aufgrund der natürlichen hydrochemischen Beschaffenheit des Wassers ist das Grund- und Oberflächenwasser in Piauí weitgehend ohne Einschränkungen nutzbar, soweit keine anthropogenen Beeinflussungen vorhanden sind. In Ceará hingegen weisen Stauseewässer und Grundwässer mit nur geringen Umsätzen durch hohe Verdunstungsraten und geochemische Wechselwirkungen mit dem umgebenen Substrat häufig hohe Mineralstoffgehalte auf (Abb. 3.2.3).

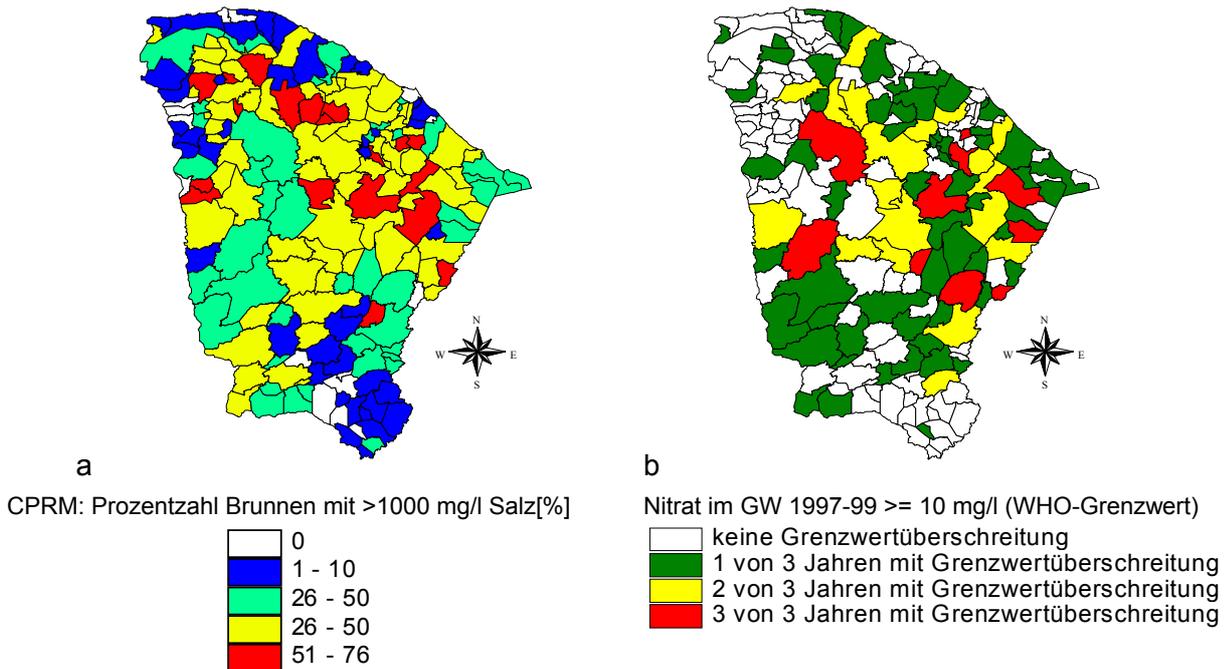


Abb. 3.2.3: Grundwasserqualität in Ceará im Zeitraum 1997-1999: Salzgehalt (a), Nitrat (b).

Eine Verminderung der Wasserqualität geschieht im ländlichen Bereich durch den punktuellen Eintrag von häuslichen Abwässern, Viehausscheidungen und den diffusen Eintrag von Agrochemikalien bei intensiver Bewässerungslandwirtschaft. Im Bereich der größeren Städte beeinflussen vor allem unkontrolliert zufließende Abwässer aus Haushalten, Industrie, Gewerbe und Deponien die Wasserqualität.

Für die starke Eutrophierung z.B. des Stausees Sarasate in Ceará sind Viehausscheidungen ursächlich. Im Rahmen der von WAVES durchgeführten Untersuchungen wurden Agrochemikalien weder in den Fokusgebieten noch im Jaguaribetal nachgewiesen. Am verbreitetsten ist die Verschlechterung der Oberflächenwasserqualität durch die Einleitung häuslicher Abwässer. Mit ihnen werden Krankheitserreger, organische Verbindungen und Nährstoffe eingetragen. Eigene und von der DHME (PI) durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass die Oberflächenwässer in Picos meist mehr als 2400 koliforme Keime pro 100 ml enthalten (WHO empfiehlt 10 Keime/100 ml), die Nitratgehalte liegen bei 10 mg/l. Dabei wurden saisonale Schwankungen aufgrund von Verdünnungseffekten während der Regenzeit oder durch den erhöhten Eintrag von Sickerwässern festgestellt. Die Grundwässer werden je nach Tiefenlage beeinträchtigt. Während die Wässer der Tiefbrunnen in Picos qualitativ einwandfrei sind, treten in Flachbrunnen in Tauá neben einer Verkeimung auch erhöhte Nitratgehalte auf (Abb. 3.2.3). Ob und inwieweit die Wasserqualität die Wassernutzung einschränkt, hängt von der Information des Nutzers, seinen Alternativen und den Qualitätsansprüchen für die jeweilige Nutzung ab. So wird salziges Brunnenwasser in Tauá nicht als Trinkwasser aber als Viehtränke und zum Waschen verwendet. Im Raum Picos wird mit belastetem Flusswasser bewässert. Höchste Qualitätsansprüche werden ans Trinkwasser gestellt. Dabei entscheidet nicht nur die Rohwasserqualität, sondern auch die Art der Wasserversorgung (Verteilung, Desinfektion, Umgang und Unterhalt des Systems) über die hygienische Bedenklichkeit des Trinkwassers. In Picos besteht eine gute Rohwasserqualität, jedoch führt mangelhafter Umgang bei der Wasserverteilung zu massiven hygienischen Problemen. Im Gegensatz dazu wird in Tauá die schlechte Rohwasserqualität durch sorgfältige Aufbereitung und Kontrolle wettgemacht. Die hygienisch notwendige Desinfektion der Oberflächenwässer, wie sie in Tauá, aber auch in Teresina oder Fortaleza durchgeführt wird, führt aufgrund der organischen Inhaltsstoffe jedoch zur Bildung von Chlorkohlenwasserstoffen mit Konzentrationen bis zu 300 $\mu\text{g/l}$ (WHO-Grenzwert: 25 $\mu\text{g/l}$).

Wassermanagement

Der Schwerpunkt des Wassermanagements in beiden Bundesstaaten lag auf der Erweiterung der Infrastruktur (Stauseebau, Ausbau der Wasserversorgung). Ein beginnendes Bedarfsmanagement zeigt sich in Ceará: Partizipation der Nutzer in Wassereinzugsgebietskomitees, Einrichtung von Nutzerkatastern sowie Vergabe von Wasserrechten. In beiden Bundesstaaten fehlt bislang eine systematische, flächendeckende Kontrolle der Wasserqualität sowie der Grundwasserentnahme. Neben der klimatischen Ursache der Wasserknappheit spielt die Bewirtschaftung der Wasserressource eine erhebliche Bedeutung für die soziale und wirtschaftliche Entwicklung beider Bundesstaaten. Eine gezielte Bewirtschaftung mit entsprechenden Kontrollen findet bisher nur vereinzelt statt, was im Fall der Flusswasserentnahme zu sozialen Spannungen führen kann. Im Fall der Grundwasserentnahme sind Probleme durch Grundwasserabsenkung absehbar. In der Fokusregion Picos bedrohen Grundwasserabsenkungen von über 10 m die Entnahme aus flacheren Brunnen.

Das in Stauseen gespeicherte Wasser wird je nach Besitz, Zugänglichkeit und Management der Reservoirs genutzt. In Ceará wird der Betrieb der großen Stauseen zentral von der COGERH geleitet. Rohwasser aus den Açudes wird direkt an Wasserwerke und großindustrielle Abnehmer verkauft. Priorität hat die Versorgung der Bevölkerung insbesondere im Großraum Fortaleza. Ein bestimmter Anteil des gespeicherten Wassers wird zur ganzjährigen Bereitstellung von Bewässerungswasser in einzelnen Flussabschnitten abgegeben. In Piauí besteht keine zentrale Verwaltung der großen Stauseen, die fast alle ursprünglich von der DNOCS geplant und gebaut wurden. Eine Studie ausgewählter Wasserprojekte in beiden Bundesstaaten kam zu dem Ergebnis, dass in der Vergangenheit eine mangelnde Absprache der Zuständigkeiten zwischen den bundesstaatlichen Behörden und den Landesbehörden und die nicht geklärte Finanzierung der Folge- und Betriebskosten sowie nicht geklärte Eigentumsfragen die häufigsten Probleme beim Betrieb großer Stauseen und der damit verknüpften Bewässerungsprojekte waren. Dagegen waren die Planung der Anlagengröße und -lage sowie eine potentielle Nutzungsplanung meistens gut nachvollziehbar.

4 Methodische Lösungsansätze

Die modellhafte integrierte Abbildung des Gesamtsystems mit seinen Wechselwirkungen und Wirkungsketten stand im Mittelpunkt der Arbeiten des Verbundprojektes. Das methodische Vorgehen im Arbeitsbereich der Hydroisotop GmbH konzentrierte sich auf die Skala der Fokusgebiete. In diesem Bereich wurde thematisch der Komplex Wasserverfügbarkeit untersucht. Das methodische Vorgehen umfasste fünf Schritte:

- Interdisziplinäre Systemanalyse
- Datenerhebung und Monitoring
- Skalierung
- Modellierung
- Integration und Anwendung

4.1 Interdisziplinäre Systemanalyse

Das WAVES-Projekt war ein gemeinsamer Beitrag Brasiliens und Deutschlands zum Global Change Forschungsprogramm. Mit einer Reihe von Gruppen in Brasilien und in Deutschland wurde eng zusammen gearbeitet.

Brasilien:

- Departamento de Hidrometeorologia (Secretaria da Agricultura, Abastecimento e Irrigação, Piauí SEEAB, DHME) – Wasserhaushalt und Monitorino Cocaina/Piauí
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)
- Universidade Federal do Ceará (Dept. de Fitotecnia, Dept. de Economia Agrícola, Dept. de Ciências Computacionais, Dept. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Dept. de Geografia, Dept. de Biologia) - Wasserqualität

Deutschland:

- Fachhochschule Köln (Institut für Tropentechnologie) -
- Universität Gesamthochschule Kassel (Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung und Fachbereich 3, Psychologie) - Wassernutzung
- Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (Abteilungen Klima, Globaler Wandel und Natürliche Systeme) – Grundwasserneubildung, hydrologische Modellierung
- Technische Universität München-Weihenstephan (Lehrstuhl für Landschaftsökologie) - Landnutzung
- Universität Hohenheim (Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Institut für landwirtschaftliche Betriebslehre, Institut für Pflanzenbau und Agrarökologie in den Tropen und Subtropen, Institut für Pflanzenernährung) – Bodenphysik und Bodenkunde, Bodenwasserhaushalt

In Brasilien erfolgte im Bereich Wasser eine durchgehende Zusammenarbeit mit der DHME, für die ein regionales Wasserhaushaltsmodell entwickelt und ein gemeinsames Monitoring Programm aufgebaut wurde. Eine enge Zusammenarbeit bestand auch mit der Univ. Céara, (Dept. de Engenharia Hidráulica e Ambiental) im Bereich der Isotopenanalytik, Wasserqualität und Hydrologie.

Mit den Arbeitsgruppen *Klimaanalyse und -modellierung, Wasser, Agrarökosysteme, Sozioökonomische und -kulturelle Analysen, Landschaftsökologie* sowie *Integrierte Modellierung* wurden Ergebnisse ausgetauscht, analysiert und zu einem Gesamtbild des jeweiligen Schwerpunktes zusammengefügt.

Für die Modellierung der für die Zielstellung wichtigsten Prozesse bedurfte es zunächst einer umfassenden Analyse des Gesamtsystems. Diese Analyse umfasste eine Definition des Subsystems Wasser und eine Formulierung seiner Wechselwirkungen mit anderen Bereichen.

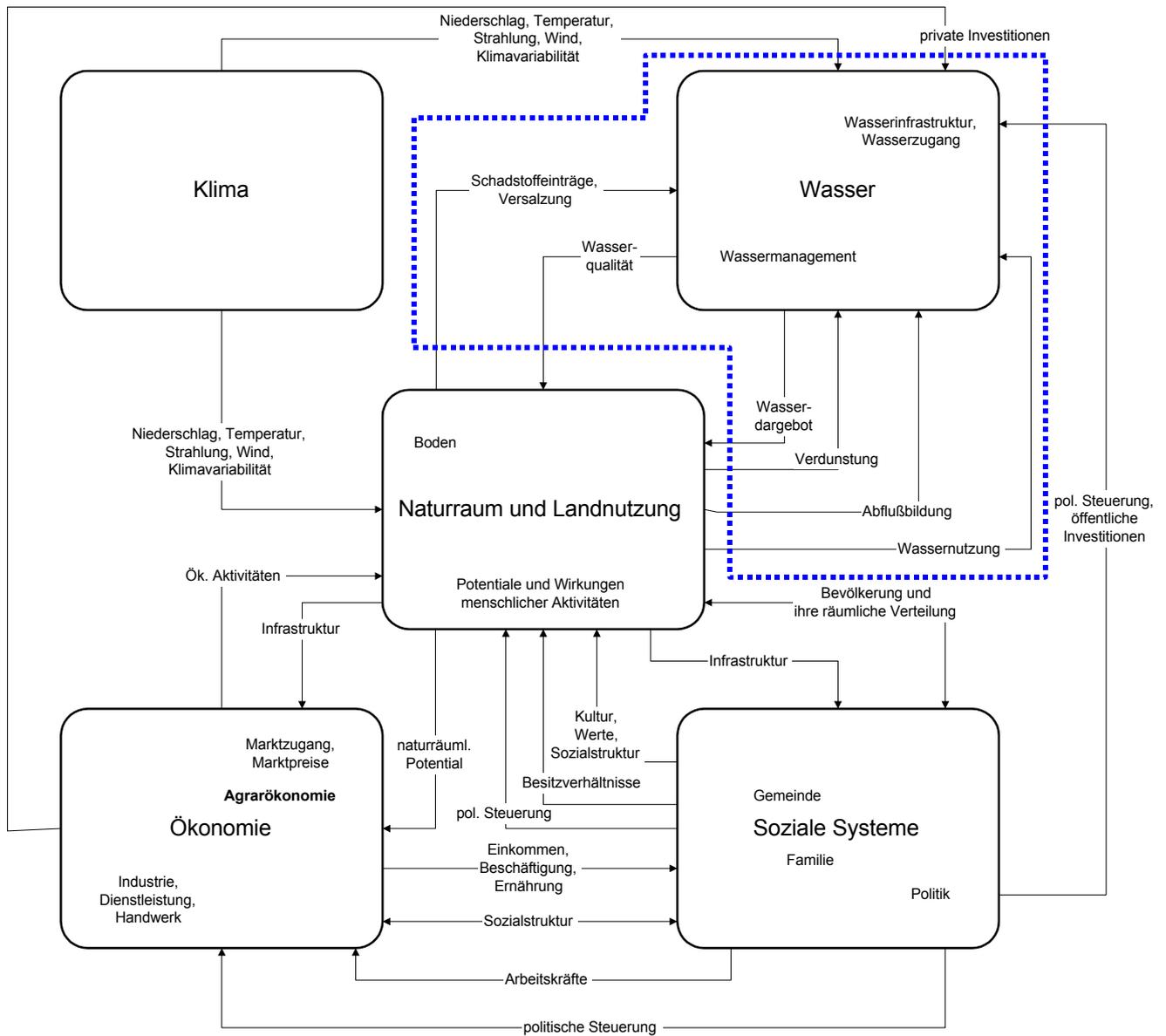


Abb. 4.1.1: Das Subsystem Wasser mit seinen Abhängigkeiten

Diese Systemanalyse war Ausgangspunkt für die Definition der Arbeitsbereiche. Hier wurde im Rahmen einer mesoskaligen Modellierung insbesondere die natürliche Verfügbarkeit von Oberflächen- und Grundwasser untersucht. Die Qualität des Wassers wurde als weiterer einschränkender und kritischer Aspekt der Wasserverfügbarkeit in ihrer Abhängigkeit von anderen infrastrukturellen und naturräumlichen Faktoren bearbeitet.

4.2 Datenerhebung und Monitoring

Die Feldaktivitäten auf deutscher Seite wurden zusammen mit den brasilianischen Institutionen durchgeführt und/oder durch originäre Arbeiten der brasilianischen Partner im Projekt komplettiert. Dabei werden die Fragestellungen komplementär bearbeitet, wodurch das Wissen und das Verständnis über die Systemzusammenhänge optimiert wird. Im Bereich Wasserverfügbarkeit wurde eine Reihe von Monitoring-Maßnahmen durch die Hydroisotop und Partnergruppen in Brasilien durchgeführt.

- Monitoring Bocaina-Stausee Wasserstände und Wasserhaushalt (Abfluss, Niederschlag)
- Monitoring Bocaina-Stausee Wasserqualität (pH, Leitfähigkeit, Trübe)
- Felduntersuchung Wasserqualität und Wasserstruktur (Mikrobiologie)
- Isotopenuntersuchungen an Oberflächen- und Grundwasser (Altersdatierung und stabile Isotope)

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den folgenden Kapiteln 5 und 6 dargestellt. Monitoring wird für die nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen im Nordosten eine zentrale Rolle spielen, da es die tatsächliche Umsetzung des Wassergesetzes erst bewirkt und insbesondere da es die Basis für das Erkennen von anthropogenen und klimatischen Änderungen im Wasserkreislauf ist.

4.3 Skalierung

Unter Skalen werden hier die Ausdehnung (Raumbezug) und/oder Dauer (Zeitbezug) verstanden, für welche die jeweilige Untersuchung (Messung, Modellierung) repräsentativ ist. Mit Skalierung sollen hier die Übergänge zwischen verschiedenen Skalen bezeichnet werden. Die Nutzung, Identifikation oder Entwicklung spezifischer, an die Problemstellung angepasster, Skalierungsverfahren war eine der wichtigen fachübergreifenden Methoden dieses Projektes.

Es wurde folgende Skalendefinition innerhalb des Projektes vereinbart. Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese Bezeichnungen spezifisch für dieses Projekt gewählt wurden und nicht mit Skalendefinitionen anderen Disziplinen (z.B. Meteorologie oder Hydrologie) übereinstimmen:

- **Mikroskala:** Messpunkte (etwa Klimastation, Bodenfeuchtemessung), Felder, einzelne Pflanzen, landwirtschaftliche Betriebe, Familien, Individuen
- **Mesoskala:** kleine bis mittlere Einzugsgebiete (von Flüssen und Stauseen), Raster des Klimamodells, Landschaftseinheiten, Vegetationstypen, Bodentypen, Verwaltungsbezirke (Munizipien), Dörfer und Städte, landwirtschaftliche Betriebstypen
- **Makroskala:** Große Einzugsgebiete, Regionen der Bundesstaaten, Bundesstaaten, Klimamodell

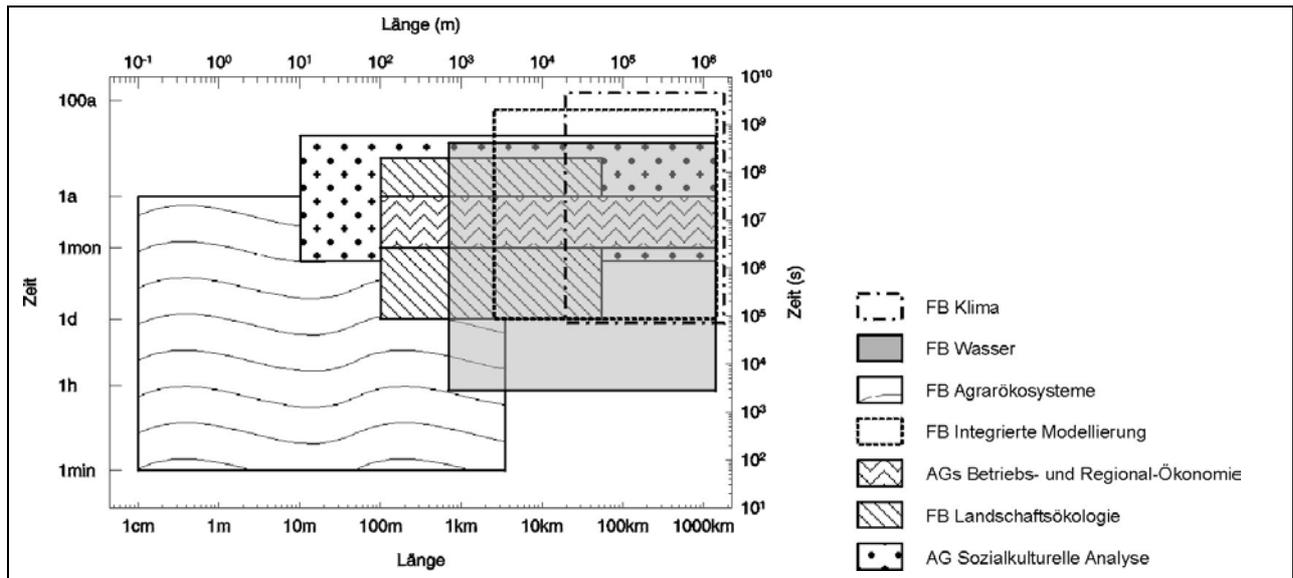


Abb. 4.1.2: „Typische“ Raum- und Zeitskalen in WAVES

Die Hydroisotop arbeitet in der Mikro- und Mesoskala. In der Mesoskala können durch Wasserkomitees und durch Gemeinden wichtige wasserwirtschaftliche Entscheidungen getroffen werden, es ist daher in gewisser Weise eine operationelle Skala. Daher wurden für diesen Bereich auch Werkzeuge und Entscheidungshilfemittel für den Wasserhaushalt entwickelt.

4.4 Modellierung

Eine der wesentlichen Ansprüche des WAVES-Projektes ist die Abstrahierung der Ergebnisse und die anschließende Verbindung und Umsetzung dieser Modelle. Die Erfüllung dieses Anspruchs soll einerseits die Umsetzung der Projektergebnisse in wissenschaftlich fundierte Planungsinstrumente ermöglichen und andererseits eine künftige Übertragung in ähnlich gelagerte Regionen der Erde vorbereiten. Beide hier wesentlichen Punkte - Abstrahierung und Verbindung - lassen sich konsequent nur durch die Entwicklung und /oder Anwendung von Modellen erreichen.

Dabei betrifft die Abstrahierung in erster Linie die Modelle innerhalb der Fachbereiche, die Verbindung die Entwicklung und Anwendung eines integrierten Modells. Eine wesentliche Bedingung für beide Modelltypen bildet die Aufbereitung von experimentell erhobenen oder aus anderen Quellen gewonnenen Daten, deren Transferierung in modelladäquate Parameter (Parametrisierung), sowie gegebenenfalls die Vorhaltung und Visualisierung in einem GIS.

Generell kann eine Modellierung ohne die Verbindung zu Messwerten und davon abgeleiteten Datenebenen nur beschränkt verwertbare Ergebnisse liefern. Um dies zu vermeiden, wurde in WAVES besonderer Wert darauf gelegt, die Ergebnisse der Experimente soweit wie möglich direkt in die Modellierungsarbeiten einfließen zu lassen und/oder anhand von ausgewählten Messwerten die Modelle zu eichen oder zu überprüfen („ground check“).

Die Hydroisotop arbeitet hier im Bereich Wasser an der Wasserhaushaltsmodellierung mit dem Schwerpunkt Grundwasserneubildung und Bodenwasserhaushalt.

Diese Ergebnisse flossen in das mesoskalige integrierte Modell MOSDEL ein, das Daten zur naturräumlichen Verfügbarkeit von Wasser in den landwirtschaftlichen und sozioökonomischen Sektor überträgt.

4.5 Integration und Entscheidungshilfe (Decision Support)

Die Umsetzung der Ergebnisse erfolgte in der Anpassung der Modelle an Fragestellungen innerhalb von interessierten Behörden in Brasilien.

Zusammen mit der DHME wurde das Wasserhaushaltsmodell mit GIS Oberfläche für die Bedürfnisse dieser Behörde angepasst und schließlich im Juni 2001 dort installiert. Dieses Modell liefert für ausgewählte Bereiche Daten zum lokalen oder einzugsgebietsbezogenen Wasserhaushalt für wählbare Zeitperioden. Die Nachhaltigkeitsgrenze für die Bewirtschaftung kann direkt ermittelt werden, sowohl für Oberflächenwasser als auch für Grundwasser.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasserstruktur und Wassergüte wurden visualisiert in einer Datenbank verfügbar gemacht. Grundlage der Datenbank war eine umfangreiche Befragung der Bevölkerung in Tauá. Diese Befragung wurde in einer relationalen Datenbankstruktur abgebildet mit der verschiedene Aspekte abgefragt und regionalisiert werden können, wie:

- Art der Wasserversorgung von Familien (Befragte) zu unterschiedlichen Zeiten
- Entfernung von Wasserstellen
- Hygienische Situation und Krankheiten
- Gewünschte Veränderungen

Dieser Zensus, in der Untersuchung auf der Basis von 217 Befragungen, kann wiederholt werden und in der Datenbankstruktur abgebildet werden. Die Ergebnisse lassen sich durch Abfragen leicht abstrahieren und räumlich visualisieren.

5 Ergebnisse – Modellierung und Validierung (Picos)

Die WAVES-Untersuchungsregion Picos liegt im Bundesstaat Piauí ca. 200 km südwestlich der zweiten WAVES-Untersuchungsregion Tauá (Ceará) und ca. 300 km südöstlich der Landeshauptstadt Teresina (Piauí). Zu ihr zählen vier Municipien (Gemeinden – entsprechend den Verwaltungsgrenzen von 1996) entlang des Guaribas-Flusstales (São João da Canabrava, Bocaina, Santana do Piauí sowie das namensgebende Munizip Picos. Die Ortschaft Picos liegt zudem an einem Kreuzungspunkt überregional bedeutsamer Straßen.

Geologisch befindet sich das Untersuchungsgebiet im südöstlichen Randbereich des sedimentären Parnaíba-Beckens. Die liegende unterdevonische Serra Grande Formation [Ssg] bildet mit 100-200 m Mächtigkeit den Hauptaquifer, der von der tonig-schluffigen Pimenteiras Formation [Dp] überlagert wird. Darüber folgt die Cabeças-Formation [Dc], die ebenfalls einen guten Grundwasserleiter darstellt (Abb. 5.1.1)

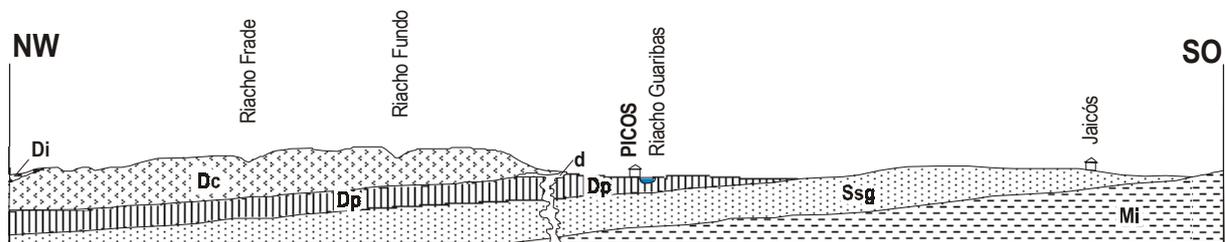


Abb. 5.1.1: Schnitt durch die geologischen Formationen bei Picos (SUDENE, 1968)

Von stark verwitterten Decksandschichten über Sand-, Schluff- und Tonsteinen bis hin zu phanolithischem Ergussgestein sind annähernd alle Formationen und Ausgangssubstrate vorhanden, welche in Piauí für die Bodenbildung von Bedeutung sind. Entsprechend sind in dieser Region auch alle in Piauí bedeutenden Bodenklassen (Latossolo Amarelo, Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico und Eutrófico, Podzólico Vermelho-Amarelo Concrecionário, Solo Aluvial) vertreten.

Aufgrund der langen Trockenzeiten gibt es keine natürlicherweise perennierenden Oberflächengewässer. 1997 wurde der Stausee Bocaina fertiggestellt, welcher vom Fluss Guaribas, der zentralen Entwässerung der Region, gespeist wird.

Die Untersuchungsregion lässt sich in drei Landschaftsräume gliedern: die Hochebenen der ‚Chapadas‘, Zwischenverebnungen („Baixios“) sowie die weiträumigen Talebenen. Sie stellt aufgrund ihrer Randlage im Westen des Verbreitungsgebietes der Caatinga im Vergleich zu anderen Regionen innerhalb des Bundesstaates Piauí eine, vegetationskundlich gesehen, sehr heterogene Region dar. Wechselnde Substrate, Höhenlagen und Niederschlagsverteilungen ergeben ein Mosaik unterschiedlicher natürlicher Vegetationstypen, welche von den Caatingaformen („trocken“) bis hin zu Übergangsformen zum Cerrado im Westen („feucht“) reichen.

Aufgrund der relativ guten Nutzbarkeit fossiler Grundwässer sowie von Flusswasser vor allem im Guaribastal, sind selbst in der Trockenzeit günstige Anbaubedingungen für Intensivkulturen, zumindest entlang der Flüsse vorhanden.

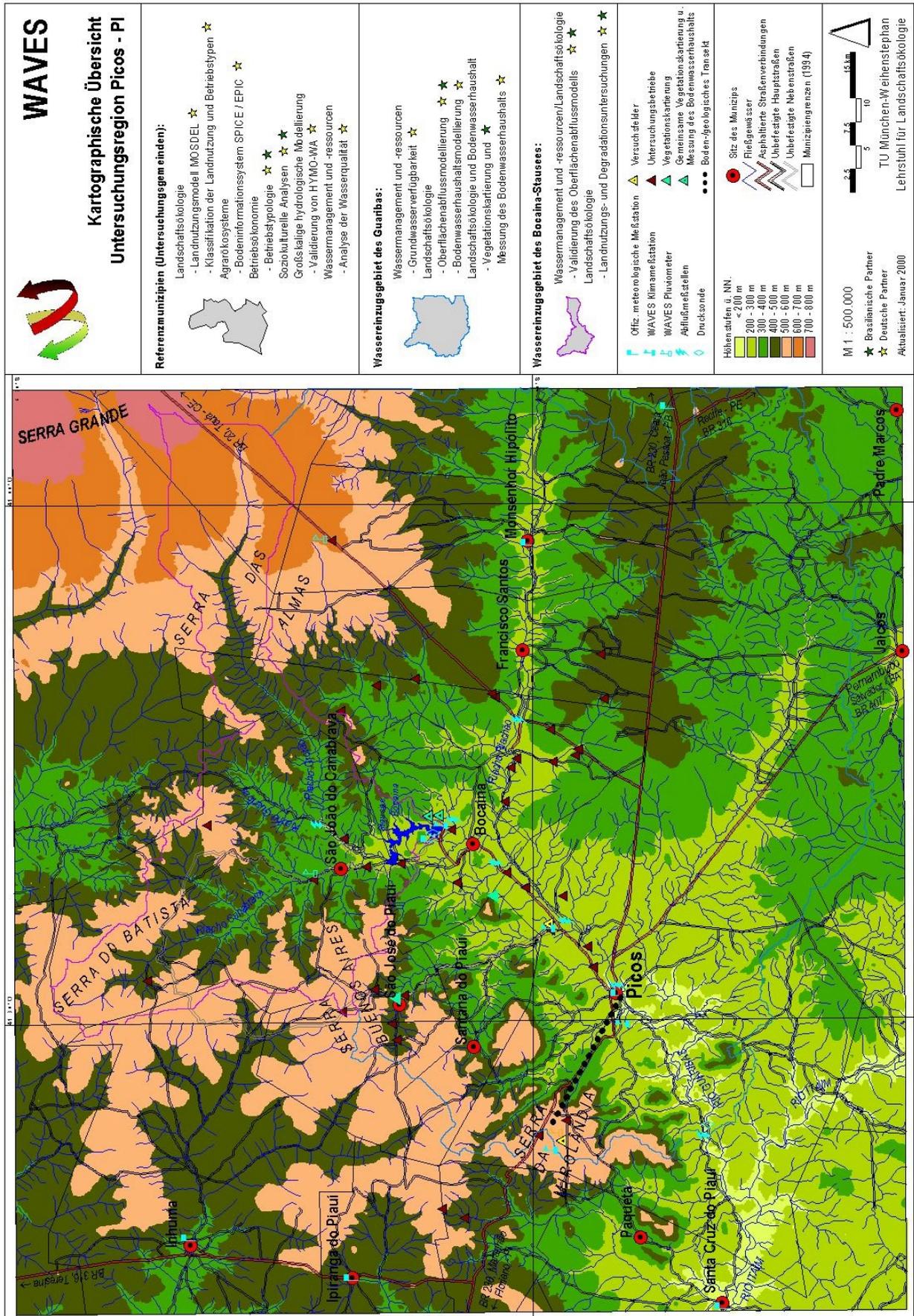


Abb. 5.1.2: Projektübersichtskarte von Picos mit räumlicher Verteilung der Untersuchungen der Arbeitsgruppen

5.1 Monitoring & Datenerhebung

Ziel der Arbeiten war es, die Wasserhaushaltsgrößen quantitativ zu dokumentieren. Der Bau von Staudämmen wurde zunächst allein auf die Berechnung und Dimensionierung beschränkt, ein Nutzungsplan für das aufgestaute Wasser und eine Dokumentation der Auswirkungen auf den Gesamtwasserhaushalt (z.B. Verringerung der Neubildung in unterhalb des Dammes gelegenen alluvialen Aquiferen) fehlt für die meisten Staudämme. Die Nutzung des Wasser am Bocaina Damm wird vor Ort durch mündliche Absprachen geregelt.

Unterhalb des Dammes liegen zahlreiche kleinere Betriebe, die das Flussbett des Guariabas Flusses nutzen um dort Bewässerungslandwirtschaft für Spezialkulturen zu betreiben. Ziel des Monitorings war es eine mögliche Basis für eine transparente und dokumentierte Nutzungsstrategie zu schaffen, indem die Wasserhaushaltsglieder quantifiziert werden.

Das Untersuchungsgebiet umfasst das gesamte Einzugsgebiet des Bocaina Dammes, 40 km nördlich von Picos. Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von ca. 1.000 km². Der jährliche Niederschlag beträgt ca. 700 mm/Jahr, Niederschläge fallen insbesondere im Februar, März und April. Das Untersuchungsgebiet ist Teil des Guaribas-Einzugsgebietes. Die mittlere Gerinneneigung beträgt 0,0178, die Flussschwindigkeit ist mit 0.06 km/lm² gering.

Abfluss ist in den meisten Flüssen intermittierend, nur im Canabrava-Fluss gibt es Quellaustritte aus der Cabeças Formation. Dieser Basisabfluss versiegt ca. 1 bis 2 Monate nach der Regenzeit.

Drei fluviometrische Stationen wurden errichtet: ‚Canabrava‘, ‚Guaribas Montante‘ kurz oberhalb des Bocaina Dammes und die Station unterhalb des Dammes ‚Barragem‘. An diesen Stationen wurde das Querprofil vermessen und abgesteckt sowie mit Wasserstandspegeln versehen. Mit der Bevölkerung vor Ort wurde partizipativ ein Messprogramm vereinbart: Die Bauern nahmen bei Abfluss täglich Messungen und dokumentierten diese. Durch die DHME wurden von Zeit zu Zeit Abflussmessungen mit einem Messflügel vorgenommen, um daraus eine Kalibrierung zu erarbeiten.

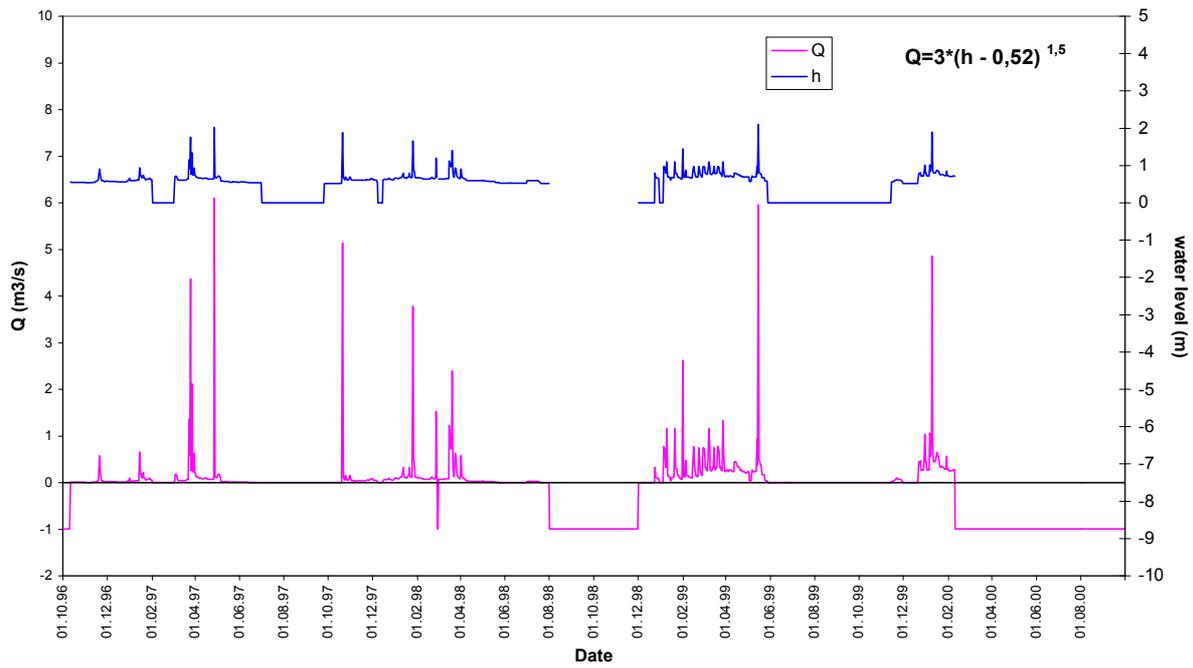
Für die Erstellung von Eichkurven wurde mit der DHME eine Empfehlung erarbeitet. Anhand der Eichkurven wurden die Abflussganglinien errechnet. Anhand dieser Abflussganglinien bestand nun die Möglichkeit

- die Zu- und Abflüsse des Bocaina-Dammes zu kontrollieren und
- diese als Eichgröße für die Modellierung des Einzugsgebietes zu verwenden.

Der Wasserspiegel und das Volumen des Bocaina Dammes wurde per DataLogger ermittelt. Die Änderungen des Wasserspiegels und Volumens dienten damit als zusätzliche Kalibriergrößen für das Modell.

Für den Ausfluss aus dem Damm wurde eine Art Regelwerk aus den mündlichen Mitteilungen der Nutzer und Betreiber abgeleitet. Anhand dieser Abflüsse wurden die Modelle WARIG und später REGIS/BOWAMOD geeicht.

Guar-008 "Cana Brava Hydrograph"



Guar-005 "Guaribas Montante Hydrograph"

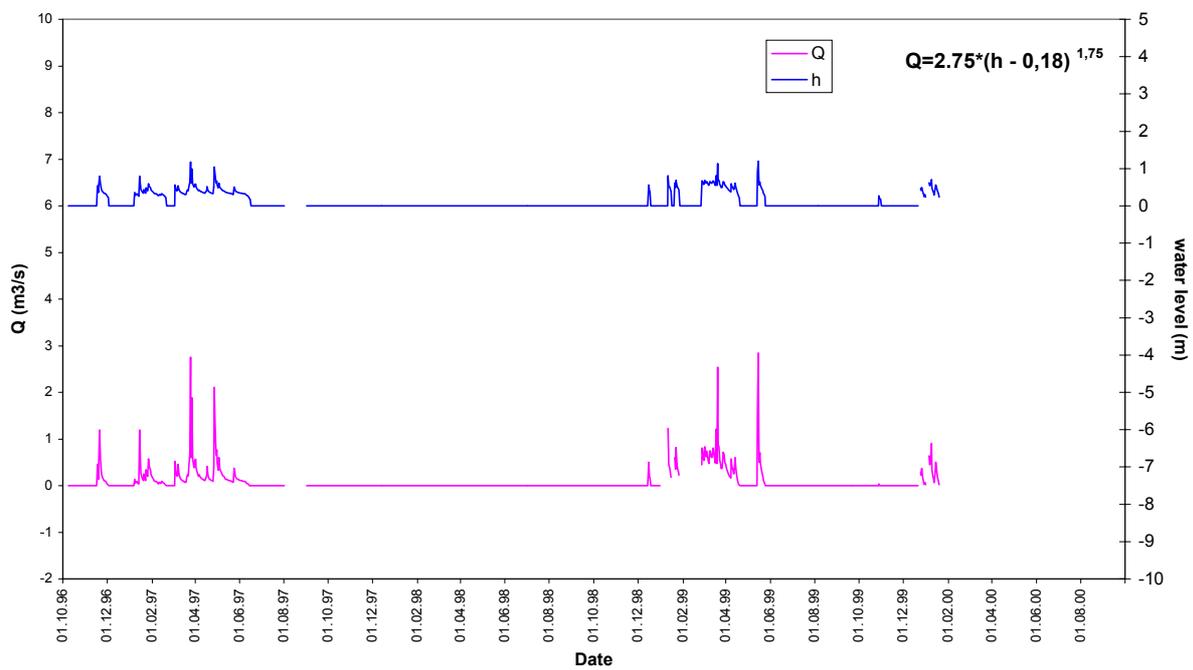


Abb. 5.1.3 Abflussganglinien und Wasserstände (gemessen) im Bocaina Einzugsgebiet

5.2 Wasserhaushalt in der Modellregion Picos

Die Arbeiten zum Wasserhaushalt wurden auf Focusgebietsebene durchgeführt. Zunächst stand hierbei die Modellierung für das Einzugsgebiet des Bocaina Stausees mit WARIG im Vordergrund.

Ziel von WARIG ist die flächenbezogene Bilanzierung des Wasserhaushalts der Region Picos. Damit wird für MOSDEL Wasserverfügbarkeit in Abhängigkeit von Landnutzung modellierbar. Auswirkungen von Klimaänderungen können auf der Mesoskala differenziert dargestellt werden. Gleichzeitig ermöglicht WARIG den Abgleich mikro-, meso- und makroskaliger Modelle. WARIG wurde von den AG's Wassermanagement und –ressourcen, Bodenkunde sowie Landschaftsökologie aus speziell angepassten Modell- bzw. Kalibrierungsblöcken (Modulen) aufgebaut. Die jeweiligen Modellergebnisse gehen als Randbedingungen in den nächsten Modellschritt ein.

Die Modellierung des Oberflächenabflusses erfolgt GIS-basiert in Abhängigkeit von Bodendaten, Landbedeckung und Topographie mit einem Verfahren des Soil Conservation Service (Soil Conservation Service 1972) [SCS-Modul 1a]. Die SCS-Ergebnisse zur Bodenwasserbildung gehen als flächenbezogene Daten in das Bodenwasserhaushaltsmodell SIMPEL (Hörmann, G. 1999a,b) [Modul 2a] ein. Die Modellierung des Wasserhaushaltes mit SIMPEL wurde mit Bodenparametern der Universität Hohenheim und mit Landnutzungsdaten der LÖK für Bodenklasseneinheiten (1 ha) auf Tagesbasis realisiert. Hierbei wurde insbesondere die Abflussbildung, der Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung abgebildet. Die Modellierung erfolgte mit den Szenarien für trockene, feuchte und mittlere Jahre.

Zur Kalibrierung wurde an acht charakteristischen Bodenstandorten eine Modellierung des Oberflächenabflusses und Bodenwasserhaushaltes mit dem Modell HILLFLOW (Bronstert 1994) [Modul 1b und 2b] durchgeführt. Der Oberflächenabfluss geht in die Berechnung der Speicherung des Stausees ein. Die Abflussergebnisse aus SIMPEL gehen als flächenbezogene Daten als Grundwasserneubildung in das zweischichtige regionalskalige Grundwassermodell MODFLOW (Chiang und Kinzelbach, 1993; McDonald und Harbaugh, 1988) [Modul 4] ein, das die beiden bedeutenden Grundwasserleiter Serra Grande und Cabeças betrachtet. Referenzwerte zur Überprüfung wurden mit Hilfe von Isotopenuntersuchungen abgeleitet, da nur bedingt hydraulische Daten vorliegen. Die Modelle werden mit Geländedaten aus den Modulen 3 und 5 überprüft und für definierte Zeiträume geeicht. Eine eingehendere Darstellung der Module erfolgt in den Statusberichten der einzelnen Arbeitsgruppen.

Die Entwicklung eines Geländeklimamodells zur räumlichen Differenzierung des Niederschlags war in dieser Projektphase nicht möglich. Nach Durchsicht der verfügbaren Niederschlagsdaten der Region wurde eine geeignete Klimastation als Datenreferenz ausgewählt.

Die vorläufigen Ergebnisse der in Tabelle 5.2.1 dargestellten Modellläufe sind zunächst überraschend, da trotz deutlich vermindertem Niederschlag (Simulation einer Klimaänderung) bezüglich Oberflächenabfluss und Seepage (Sickerung aus dem durchwurzelteten Bodenraum) keine wesentlichen Unterschiede auftreten. Dies liegt an der zeitlichen Verteilung des Niederschlages, der im betreffenden Trockenjahr in wenigen Tagen fällt und damit zu stärkeren Abflüssen führt. Regelnde Größe ist die (Evapo-) Transpiration über den Pflanzenbestand, die im Trockenjahr nur halb so hoch ist. Wesentlicher Oberflächenabfluss entsteht in Abhängigkeit der Boden- vorfeuchte erst bei Niederschlagsintensitäten von größer als 20 mm/d.

Tab. 5.2.1: Ergebnisse zweier Modellläufe für das Einzugsgebiet des Stausees Bocaina

Simulationsjahr	1941/42 Trockenjahr	1995/96 durchschnittliches Jahr
Niederschlag	428 mm	685 mm
Pot. Evapotranspiration	2.121 mm	1.818 mm
Akt. Evapotranspiration	339 mm	596 mm
Oberflächenabfluss	31 mm	35 mm
Seepage (Grundwasser- neubildung + Interflow)	53 mm	55 mm

Mit kontinuierlicher Wasserstands- und Volumenberechnung am Bocaina-Stausee (Modul 3: Fläche 11 km², maximales Füllvolumen 106 Mio. m³, Wassereinzugsgebiet ca. 1.000 km²) wurden die Oberflächenabflüsse der oberstromigen Niederschläge festgestellt und damit die Module Oberflächenabfluss und Bodenwasserhaushalt (einschliesslich Interflow) geprüft. Die seit dem Frühjahr 1998 kontinuierliche Wasserspiegelaufzeichnung mit einer Drucksonde zeigt, dass der von SCS modellierte Oberflächenabfluss in diesem Zeitraum relativ gut zum beobachteten Speicherverhalten passt: 10 mm Jahresabfluss (Regenzeit) entsprechen bei einem Einzugsgebiet von 1.000 km² einer Speicherfüllung von 10 Mio. m³. Eine Speicherfüllung in dieser Größenordnung wurde im Frühjahr 1998 gemessen.

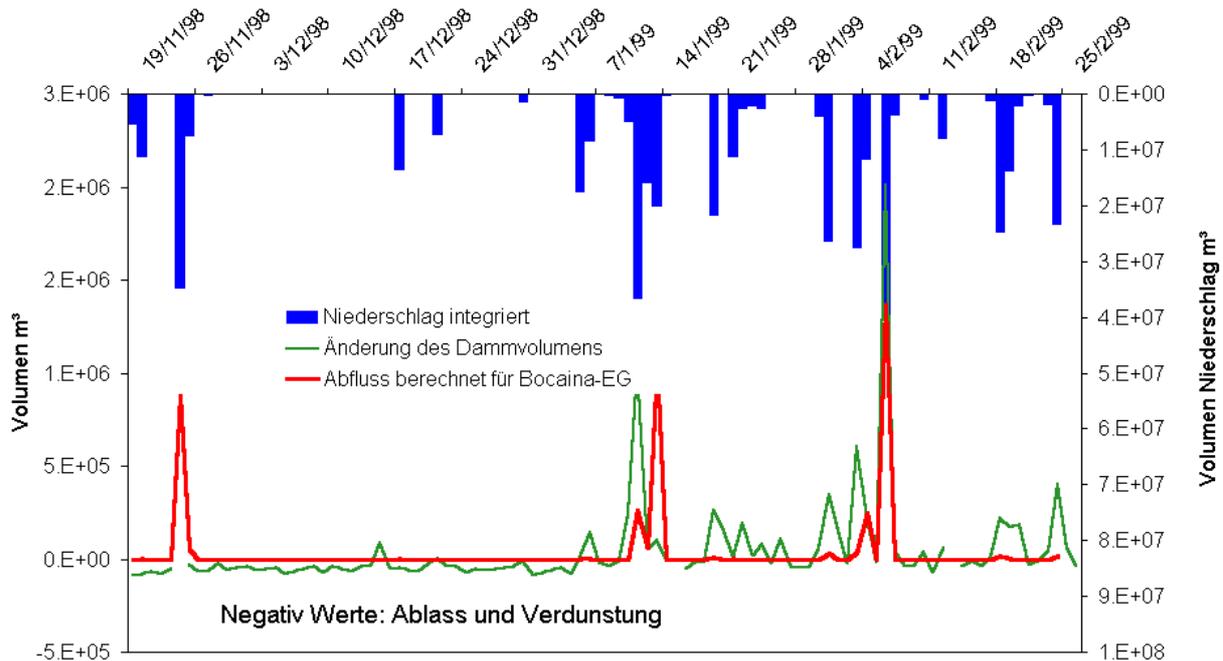


Abb. 5.2.1: Ergebnisse zweier Modellläufe für das Einzugsgebiet des Stausees Bocaina

Es ist erkennbar, dass pro Jahr etwa 20 % des vorhandenen Volumens verdunsten. Der Ausfluss aus dem Bocaina-Stausee beträgt je nach Öffnung des Auslasses, der vom Betreiber DNOCS in Abhängigkeit vom Füllstand des Sees geregelt wird, zwischen 0,4 m³/s und 1 m³/s. Dieser Auslauf versorgt den Rio Guaribas mit fließendem Wasser auf eine Länge von ca. 20 km bzw. 40 km.

Aus der starken Zunahme der Grundwassernutzung (Modul 4: Grundwassermodell) leitet sich die Frage ab, wie viel Grundwasser kann wo nachhaltig gefördert werden und wie ändert sich dieses Potential in Abhängigkeit veränderter Randbedingungen in der Zukunft. Nachhaltig förderbar sind aktuell etwa 1 l/s je km² bei einer flächenhaften Verteilung der Brunnen.

Die aktuell im Gesamtgebiet etwa 400 installierten Brunnen könnten demnach mit etwa 5 l/s nachhaltig betrieben werden. Die Brunnen sind jedoch nicht gleichmäßig über das Gebiet verteilt, sondern im wesentlichen auf das Talgebiet des Rio Guaribas konzentriert. Das kontinuierliche Monitoring [Modul 5] des Grundwasserspiegels in einem Flachbrunnen bestätigte die mit generellen hydraulischen und Isotopendaten entwickelte Annahme, dass eine Exfiltration von tiefem Grundwasser in den Fluss stattfindet. Damit konnte die für die Modellierung und für die Bilanz wichtige Frage nach der Fließrichtung des Grundwassers beantwortet werden.

Lokal führen die heutigen Entnahmen zu einer Übernutzung, die in Zukunft noch zunehmen wird. Die Entwicklung des Wasserhaushaltes in der Zukunft und ihre Auswirkungen wird gekoppelt an lokal ausgearbeitete Rahmenszenarien in der noch laufenden Projektzeit ausgearbeitet und im Szenarienband aufgeführt.

Während der Aufstockungsphase wurde das Modell direkt in ein GIS integriert. Hiermit wurden benutzerfreundlich Berechnungen für beliebige Standorte und beliebige Zeiträume möglich. Für das Einzugsgebiet des Bocaina Staudammes wurden mit BOWAMOD Abflussbildungs- und Grundwasserneubildungskarten erstellt, die einen ersten räumlichen Überblick über die Verteilung der Verfügbarkeit von Oberflächenwasser und von Grundwasser (aus der direkten Neubildung) geben. Für einzelne Standorte wurden Zeitreihen der direkten Neubildung gerechnet. Diese Arbeiten wurden am 4. August 2000 auf dem internationalen Grundwasserkongress in Fortaleza in einem Vortrag und Artikel dem überwiegend brasilianischen Fachpublikum vorgestellt (Heinrichs et al. 2000).

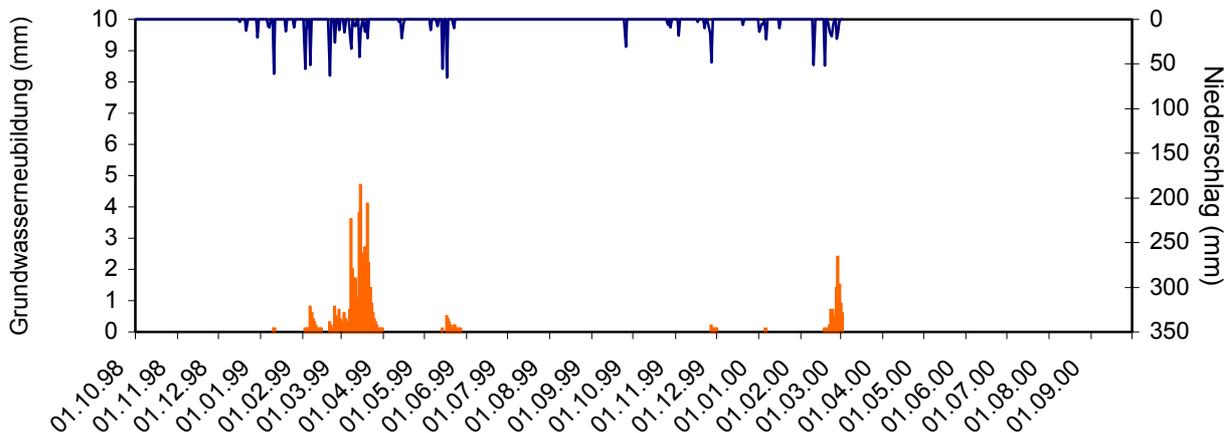


Abb. 5.2.2 Mittlere Neubildungsrate über das Bocaina Einzugsgebiet errechnet aus der flächenverteilten Wasserhaushaltsmodellierung auf Tagesbasis.

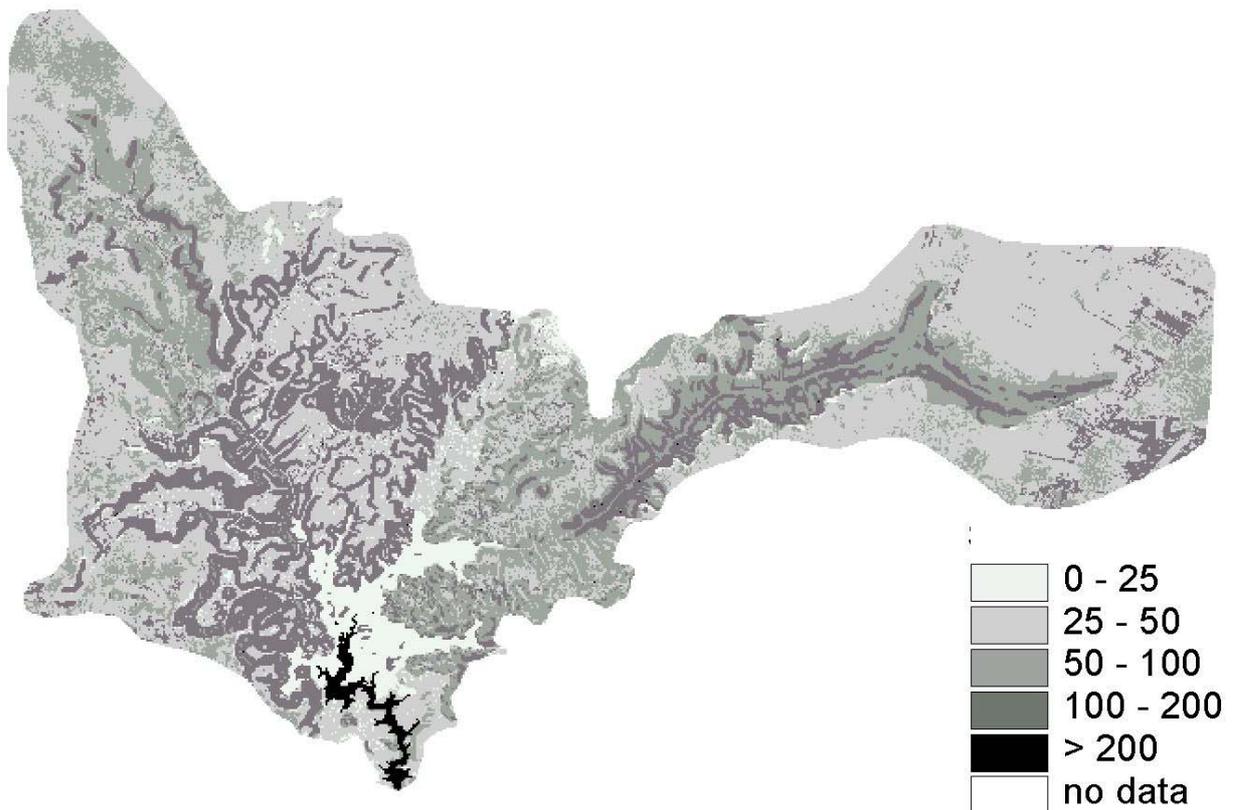


Abb.5.2.3 Regionalisierte Mittlere Direkte Neubildungsrate über das Bocaina Einzugsgebiet errechnet aus der flächenverteilten Wasserhaushaltsmodellierung auf Tagesbasis für 1998 bis 1998 (hydrologisches Jahr).

Es wurden mittlere jährliche Neubildungsraten von ca. 150 mm/Jahr berechnet. Die berechnete direkte Neubildung entspricht noch nicht der tatsächlich und nachhaltig verfügbaren Menge von Grundwasser. Grund hierfür ist, dass nachgeschaltete Prozesse wie die Entnahme aus dem Grundwasserspeicher durch Auenvegetation und das Wiederaustrreten von lokal gebildetem Grundwasser in größeren Bilanzierungseinheiten zu einer Abnahme des flächenbezogenen Neubildungsmittels führen.

In Bocaina ist dies insbesondere die über die geologische Schichtenfolge Kaskade von Tiefensickerung (abhängig vom KF-Wert der liegenden Schicht und lateralem Abfluss bzw. Quellaustritt (Differenz zwischen Zusickerung aus dem Hangenden und der Tiefensickerung)). Somit lässt sich auch erklären, dass eine direkte Neubildung von ca. 150 mm/Jahr bei einer Betrachtung des Bodenwasserhaushaltes berechnet wurde; die Untersuchung von Tiefenwässern ergab auf Grund der Altersstruktur Neubildungsraten von ca. 15 bis 25 mm/Jahr. Die Differenz tritt durch die – im Bocaina Einzugsgebiet auch sichtbaren – Quellaustritte entweder punktförmig oder aber diffus aus oder fließt unterirdisch lateral bis zur regionalen Vorflut ab. Unter Berücksichtigung dieser Effekte ergibt sich eine annähernde Übereinstimmung mit der in einer früheren Phase aus den ^{14}C Altern abgeschätzten Neubildung von 10-15 mm/Jahr. Aus diesen Werten ergibt sich ein nachhaltig nutzbares Grundwasser-Potential von 0,3 bis max. 0,7 l/s*km². Diese Skalenabhängigkeit der Grundwasserneubildung ist daher immer zu beachten und besonders relevant für die Übertragung der Ergebnisse.

5.3 Wasserqualität – Beschreibung der Prozesse

Die Arbeiten zur Validierung des Modelles wurden neben der Datenerfassung auf den Bereich des Stoffhaushaltes erweitert. Der Chloridhaushalt bietet in semi-ariden Gebieten eine zusätzliche Möglichkeit zur Validierung der Wasserhaushaltsmodellierung. Hierfür wurden Chloriddaten (Grundwasser, Stauseen) von Behörden in Piauí und in Ceará gesammelt und zusammengestellt.

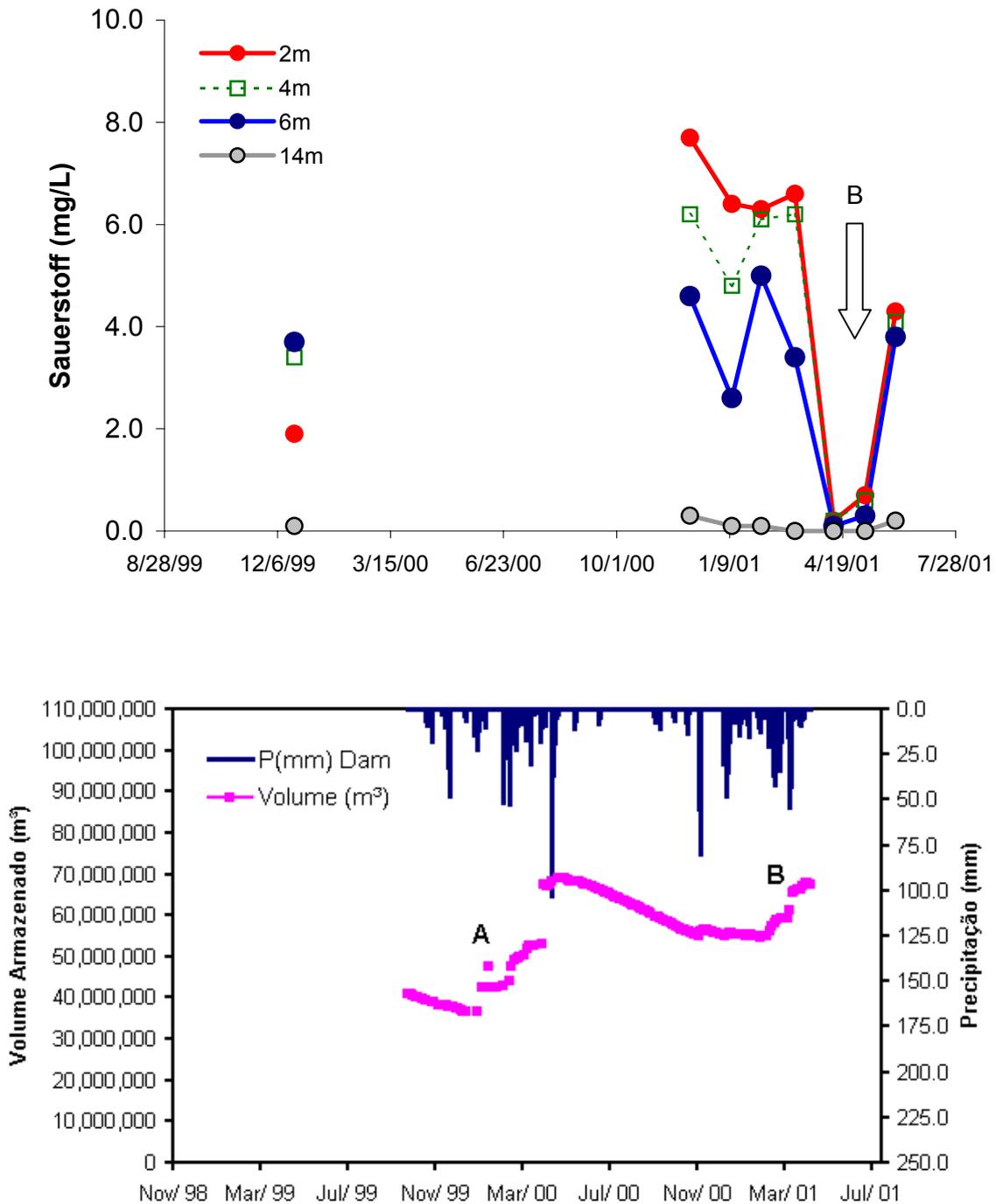


Abb. 5.3.1 Monitoring-Programm zur Gewässergüte im Bocaina-Stausee

Von der DHME wurden an einer Reihe Gewässergütemessstellen Proben von Flusswasser, (Paraíba), Grundwasser (Region Bocaina) und Stauseewasser (Bocaina) genommen, die bei der Hydroisotop auf hydrochemische Parameter untersucht wurden.

Dieses Untersuchungsprogramm wurde ab Oktober 2000 um ein tiefenorientiertes Messprogramm zur Gewässergüte im Bocaina Stausee ergänzt. Hierbei werden monatlich die Parameter Sauerstoffsättigung, Temperatur, Trübe, pH und Salinität in Meterabstand gemessen. Die Messung erfolgt monatlich durch die DHME, die Auswertung durch die Hydroisotop in Zusammenarbeit mit der DHME. Diese Messungen lieferten Informationen zur Wasserqualität im Stausee und gehen in die Entwicklung von Entscheidungshilfen und Empfehlungen ein, insbesondere für die Erklärung auftretenden Fischsterbens von Auswirkungen auf den Bewässerungslandbau unterhalb des Stausees.

Die Messungen der Tiefenprofile von Gewässergüteparametern im Bocaina-Stausee ließ die für das weitere Management dieses Stausees wichtigen Prozesse bereits erkennen: (1) Eine Durchmischung erfolgt nicht regelmäßig aufgrund einer stabilen Temperaturschichtung, (3) aufgrund der Belastung mit häuslichen und kommunalen Abwässern erfolgt ein starker Eintrag von Nährstoffen und von organischem Material, (3) dies führt zu starker Sauerstoffzehrung in den tieferen Stauseebereichen bis zur Entwicklung von H_2S (Geruch am Auslass), (4) Hochflutereignisse und damit verbunden starke Windscherung führen zu einer episodischen Durchmischung. Hierbei kann es aufgrund von kurzzeitiger Sauerstoffarmut und dem begleitenden Auftreten von H_2S und eventuell NH_4^+ (Fischgift) zum beobachteten Fischsterben kommen. Dies zeigt, dass eine rein quantitative Betrachtung der Wasserverfügbarkeit nicht ausreicht.

Von vorrangiger Wichtigkeit ist eine Verringerung der Einleitung häuslicher und kommunaler Abwässer oberhalb des Bocaina Stausees.

Neben den Stauseen wurde auch das Trinkwasser im Bocaina Einzugsgebiet insgesamt hinsichtlich seiner mikrobiologischen Reinheit in Abhängigkeit von der Wasserstruktur untersucht. Wasserstruktur bezeichnet hier die Art des Anschlusses an eine Wasserversorgung bzw. die Art der Wasserbeschaffung über Zisternen oder aus dem Fluss/Stausee. Die Untersuchungen wurden über einen Schnelltest auf koliforme Keime und E. coli durchgeführt und je nach Anzahl der Keime unterteilt in gut (unbelastet), mittel und schlecht (hohe Belastung mit Keimen).

Die Untersuchung im Bereich Bocaina zeigte, dass neben Problemen mit mikrobieller Belastung bei Wasserentnahmen aus Flüssen und Stauseen auch bei entfernteren öffentlichen Wasserversorgungspunkten Verkeimungen vorhanden sind. Diese Verkeimungen treten vor allem an kleinen Wasserversorgungspunkten und an den Entnahmestellen (Wasserhähne) auf. Die öffentliche Wasserversorgung in den größeren Städten ist größtenteils sicher. Allerdings können Zwischenspeicher von Wohnhäusern und Hotels zum Teil starke Verkeimungen aufweisen.

Hier kann durch eine bessere Desinfektion und vorsichtigeren Umgang eine wesentliche Verbesserung mit einfachen Mitteln erreicht werden.

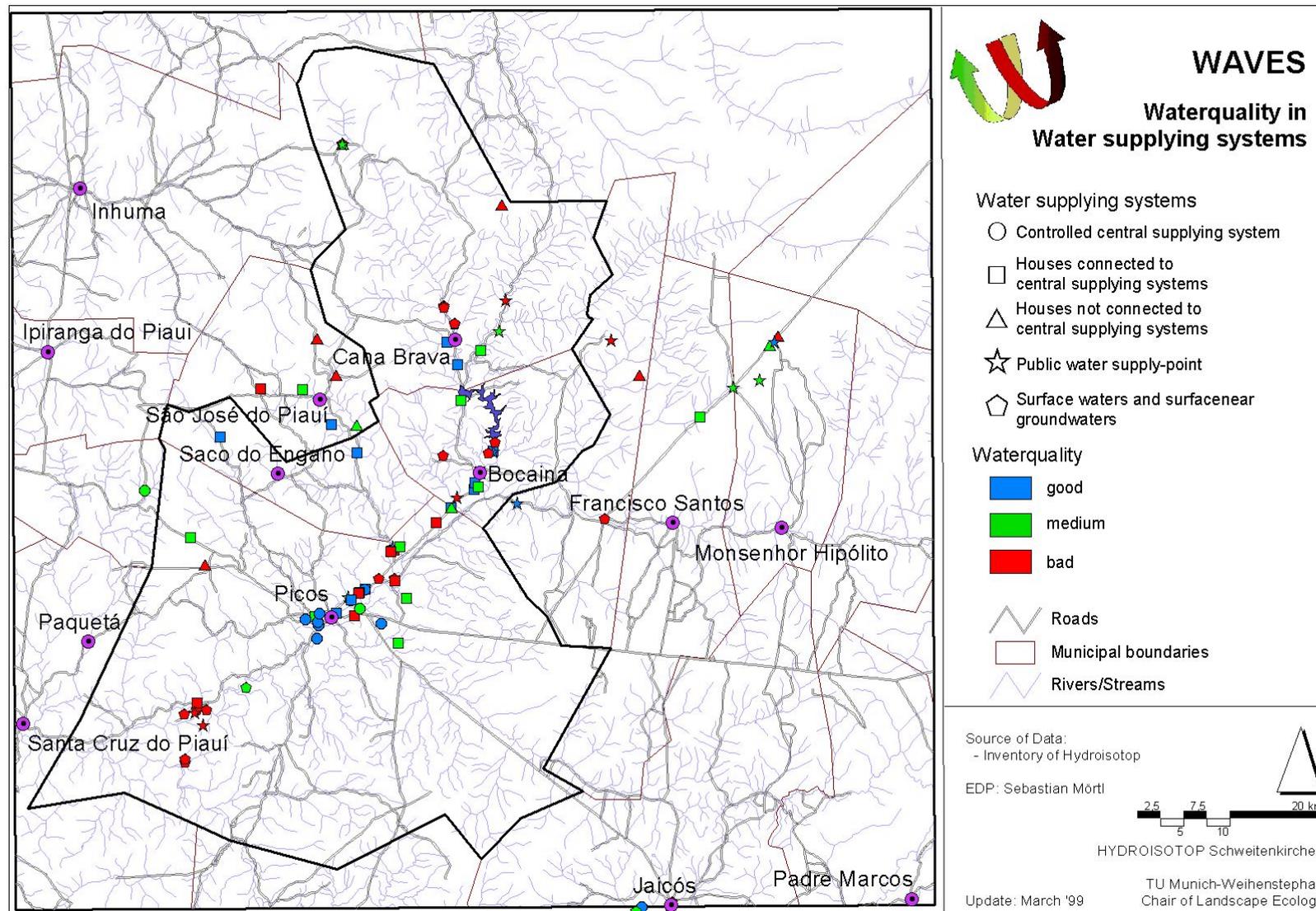


Abb.5.3.2 Mikrobiologische Untersuchungen in der Fokusregion Piauí – Verbindung von Wasserstruktur und Wasserhygiene

6 Ergebnisse – Modellierung und Validierung (Tauá)

Tauá ist eines der wasserärmsten Gebiete im Nordosten Brasiliens. Die schlechte Qualität des Grundwassers mit hohen Leitfähigkeiten und hohen Chloridgehalten, die geringmächtigen Böden und Qualitätsprobleme mit den vorhandenen Stauseen haben die wirtschaftliche Entwicklung und die sozialen Verhältnisse in dieser Region stark geprägt.

Die Arbeiten in der Modellregion Tauá konzentrierten sich während der Hauptphase daher zunächst auf die Gewässergüte. Hier wurden insbesondere Arbeiten zur Ursache der Versalzung durchgeführt. Anhand von Isotopenuntersuchungen wurden die möglichen Versalzungsmechanismen a) natürlich klimatisch, b) natürlich geogen oder c) anthropogen geprüft. Parallel dazu stellten die Untersuchungen zur Wasserhygiene/Mikrobiologie und Wasserstruktur einen wesentlichen Anteil der Arbeiten dar.

Diese wurden durch eine in Tauá durchgeführte systematische Befragung untermauert. Diese Befragung von über 200 Haushalten hinsichtlich der Versorgungsgewohnheiten und der Qualitätsprobleme und durch Wasser verursachte Krankheiten wurde während der Aufstockungsphase in eine Datenbank überführt und systematisch analysiert und regionalisiert. Diese Datenbank in Verbindung mit einem GIS erlaubte es, Ursachen zwischen Versorgungssituation und Wasserqualität zu prüfen.

Diese Arbeiten stellten bereits eine Verbindung zwischen Qualität und Quantität dar. In der Aufstockungsphase wurde das mesoskalige Wasserhaushaltsmodell auf GIS-Basis auch auf die Modellregion Tauá angewendet. Dieses Modell half zunächst die Ist-Situation hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes, der Abflussbildung und der Grundwasserneubildung zu analysieren und zu regionalisieren. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Dieses Modell bildet auch die Grundlage dafür die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Hierzu wurde ein Analogie-Ansatz gewählt. Aus historischen Zeitreihen wurden typische Trocken-, Normal- und Feuchtjahre ausgewählt. Für diese Typjahre wurde anhand von Zeitreihen mit Tagesdaten die Dynamik von Bodenwasserhaushalt, Oberflächenhydrologie und insbesondere der Grundwasserneubildung veranschaulicht. Diese Wasserhaushaltskomponenten sind bestimmend für das Auftreten von agrarischen (Bodenwassermangel) und hydrologischen Dürren (Abflussdefizit und Grundwasserstandsveränderungen).

6.1 Wasserhaushalt in der Modellregion Tauá

Für die Modellierung des Wasserhaushaltes wurde ebenfalls das GIS basierte Wasserhaushaltsmodell BOWAMOD verwendet. Es wurde mit täglichen Klimadaten (Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte) sowie mit regionalisierten Bodenkennwerten (Porosität, Welkepunkt, Feldkapazität und Van-Genuchten Parameter) gearbeitet, die von der Universität Hohenheim zur Verfügung gestellt wurden. Die Landnutzung wurde durch die LÖK Weihenstephan aus der Luftbildinterpretation erarbeitet.

Das Modell liefert Tagesdaten der Bodenfeuchte, des Abflusses und der Sickerate für einzelne Standorte. Diese Daten können direkt für die landwirtschaftliche Anwendung interpretiert werden, da hiermit landwirtschaftliche Dürren (Bodenwasserdefizit) während der Wachstumsperiode erkannt werden können.

Das Wasserhaushaltsmodell ist ein Zweischicht-Modell, das Zufluss zum Bodenkompartment aus dem Niederschlag (P) abzüglich der Abflussbildung (Qs), Verdunstung und Transpiration (Eva) und Sickerraten zum tieferen Bodenkompartment (C-Horizont) mittels der Van-Genuchten Charakteristik bilanziert. Damit können Verdunstung, Abflussbildung, Interflow (Sickerrate aus B-Horizont > Infiltrationskapazität C-Horizont) und die Grundwasserneubildung (Qiq, direkt) in Abhängigkeit der ungesättigten Leitfähigkeit des Bodens bei der jeweiligen Bodenfeuchte abgeschätzt werden.

Ebenso können die Parameter Bodenwassergehalt und Sickerrate regional differenziert dargestellt werden, z. B. als Neubildungskarte. Damit kann die Eignung unterschiedlicher Standorte und die regionale direkte Grundwasserneubildung räumlich dargestellt werden.

Die Modellierung der Neubildung muss für eine Gesamtbilanz um die indirekte Neubildung in Flüssen aus der Versickerung von Oberflächenabfluss ergänzt werden. Die Betrachtung von alluvialen Aquiferen kann allerdings nicht mesoskalig sondern nur standortbezogen durchgeführt werden. Daher konzentrierten sich die Arbeiten auf die flächenhafte Abschätzung der Grundwasserneubildung.

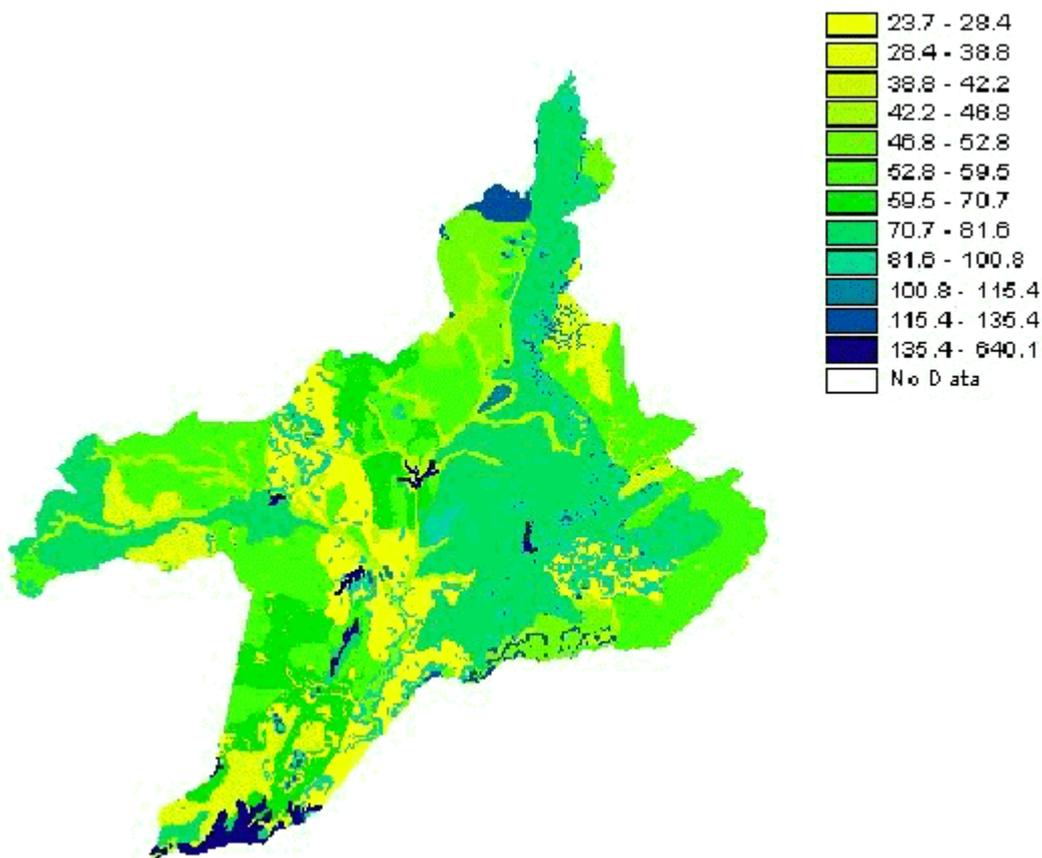


Abb.6.1.1 Räumlich verteilte Darstellung der direkten Neubildung für die Zeitreihe 1927/1928

Die Unterschiede zwischen einem feuchten Jahr und einem Trockenjahr sind an zwei Beispielen für einen Standort mit guter Feldkapazität von ca. 100 mm für die Referenzjahre (1941/1942

und 1973/1974 – hydrologische Jahre dargestellt. Derartige Vergleiche können mittels BOWAMOD für beliebig mit dem GIS gewählte Bodenstandorte und beliebig gewählte Zeitabschnitte durchgeführt und visualisiert werden. Somit ist damit ein Werkzeug zur Ermittlung der Vulnerabilität von Standorten unter verschiedenen Klimaszenarien gegeben.

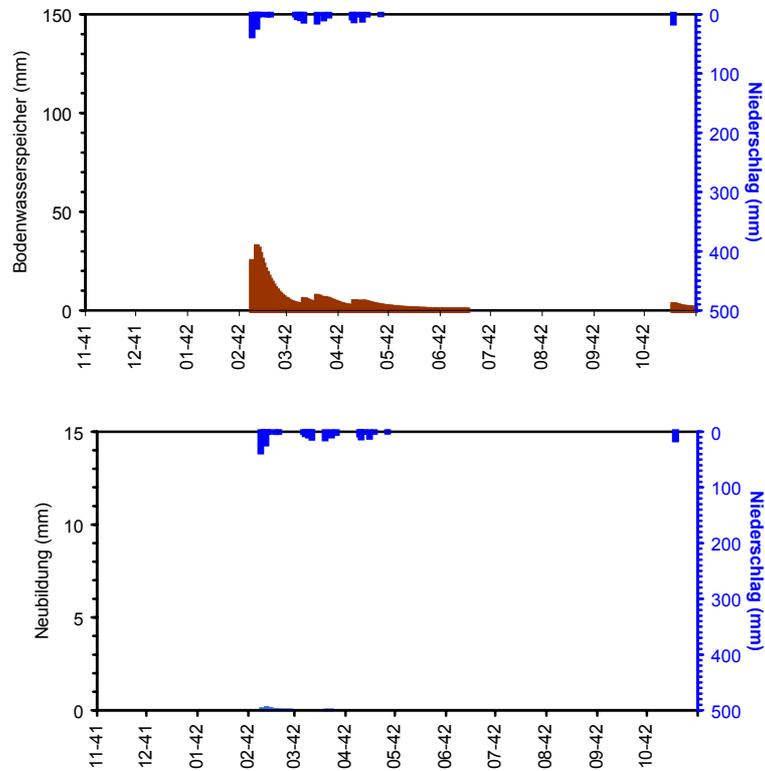


Abb.6.1.2 Standortbezogene Darstellung des Wasserhaushaltes und der Neubildung, Trockenjahr 1941/1942 Bodenwasser-Dürre (agrarisches) und Neubildung < 1mm/Jahr

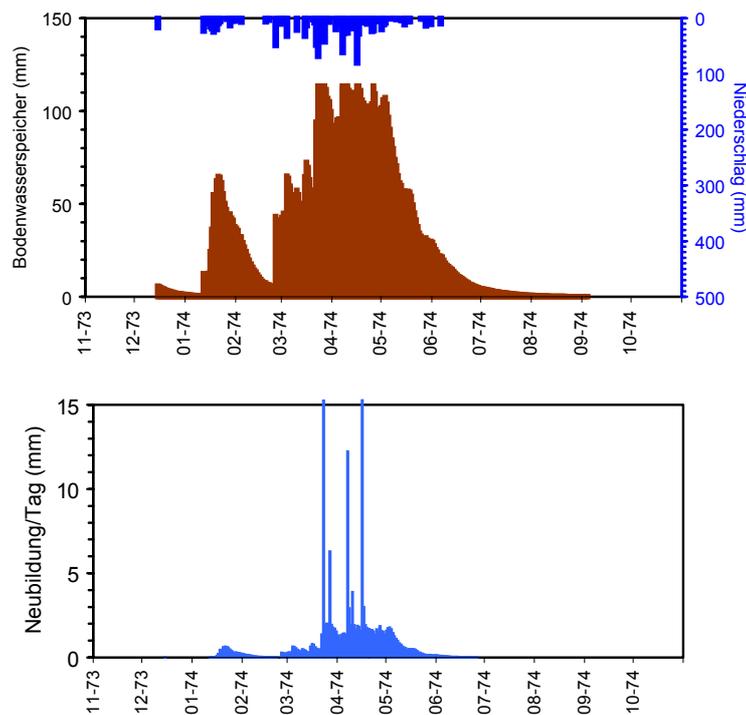
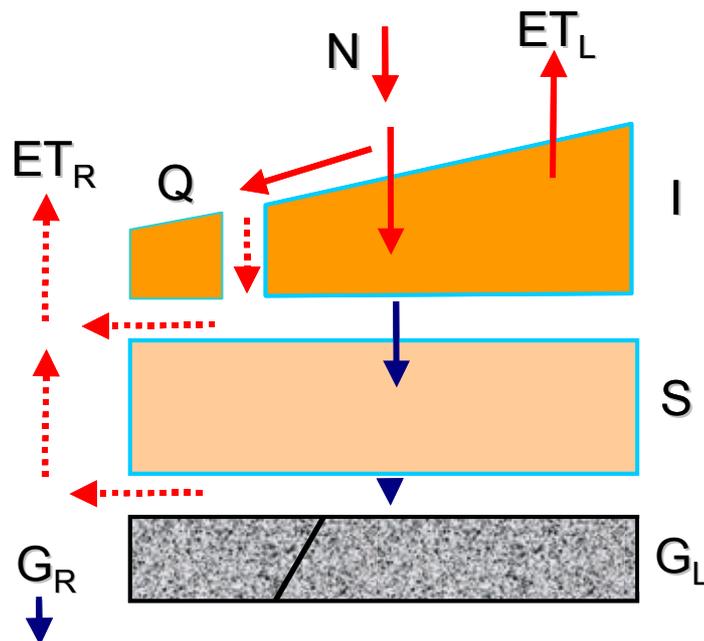


Abb.6.1.3 Normales Jahr 1973/74, Bodenwasserspeicher vollständig, es kommt im April zur Sättigung und Neubildung von > 25 mm/Jahr

Die auf diese Weise ermittelten direkten Neubildungsraten liegen im Mittel bei 25 bis 35 mm pro Jahr, können aber lokal auch deutlich höhere Werte erreichen. Diese Berechnung, die auf der Bodenphysik beruht muss nun um eine Betrachtung des Stoffhaushaltes ergänzt werden, um diese Ergebnisse richtig einordnen zu können.

Gering durchlässige Böden leiten einen Teil des Niederschlages (N) als direkten Abfluss (Q) ab und nehmen einen Teil durch Infiltration (I) auf. Von der Bodenoberfläche und aus dem Bodenspeicher erfolgt Verdunstung und Transpiration (ET_L). Sind wie in Tauá die Böden geringmächtig, haben sie hohe Anteile von Boden-Skelett (Gesteinsbrocken), so können sie wenig Wasser halten und die Sickerung aus der Bodenzone (S) ist hoch. Die direkte lokale Neubildung ist per Definition jenes Wasser dar, das unterhalb der Wurzelzone versickert und den Grundwasserspiegel (G_L) erreicht. Im regionalen Maßstab tritt jedoch ein Teil des lokal gebildeten Grundwassers wieder aus, wenn eine unterirdische Drainage nicht vollständig möglich ist. Genau dieses ist ein möglicher Versalzungsmechanismus in Tauá und kann erklären warum gleichzeitig hohe direkte lokale Neubildung (G_L) mit verschiedenen Modellen berechnet werden und wenig Grundwasser guter Qualität verfügbar ist. Der gering durchlässige kristalline Untergrund kann nur einen geringen Teil der lokalen direkten Neubildung unterirdisch ableiten, so kommt es zu einem Anstieg der Grundwasserstände und einem erneuten Kontakt des Grundwasser mit der der Verdunstung ausgesetzten ungesättigten Zone: in Talauen kann es zur einer erneuten Evaporation und Transpiration (ET_R) kommen, diesmal auf einer regionalen Skale. Betrachtet man nun den Wasserhaushalt über diese Skale, so reduziert sich die effektive Neubildung durch den zusätzlichen Term ET_R . Gleichzeitig kommt es hierbei zu einer Anreicherung von Salzen.

**Regionale
Betrachtung:**
 G_L 0,1-1 mm/a
hohe Salzgehalte
im Grundwasser



**Lokale
Betrachtung:**
 G_L 25-35 mm/a
geringe Salzgehalte
im Bodenwasser und in
begrenzten Gebieten mit
hoher lokaler Neubildung
und geringerer Wiederverdunstung
 ET_R

Abb.6.1.4 Räumlich verteilte Darstellung der direkten Neubildung für die Zeitreihe 1927/1928

Die berechneten hohen direkten Neubildungsraten stehen nur scheinbar im Widerspruch zur Wasserknappheit und geringen Wasserqualität Tauá, sie bieten im Gegenteil sogar eine mögliche Erklärung für den Versalzungsmechanismus. Diese Veränderung der Neubildung mit dem Betrachtungsmaßstab ist ein wichtiger Skaleneffekt und bietet wenn auch langfristige Lösungsansätze. Dieses Modell wurde mit Isotopenuntersuchungen daher überprüft.

6.2 Wasserqualität in Tauá

Die hohe Salinität des Grundwassers in Tauá ist im Vergleich zur Fokusregion Picos ein wesentlicher Faktor für die geringere Wasserverfügbarkeit. Daher wurden im Rahmen von Felduntersuchungen Analysen der Hauptan- und -kationen, der physikalischen Parameter (Leitfähigkeit) und Isotopenuntersuchungen durchgeführt.

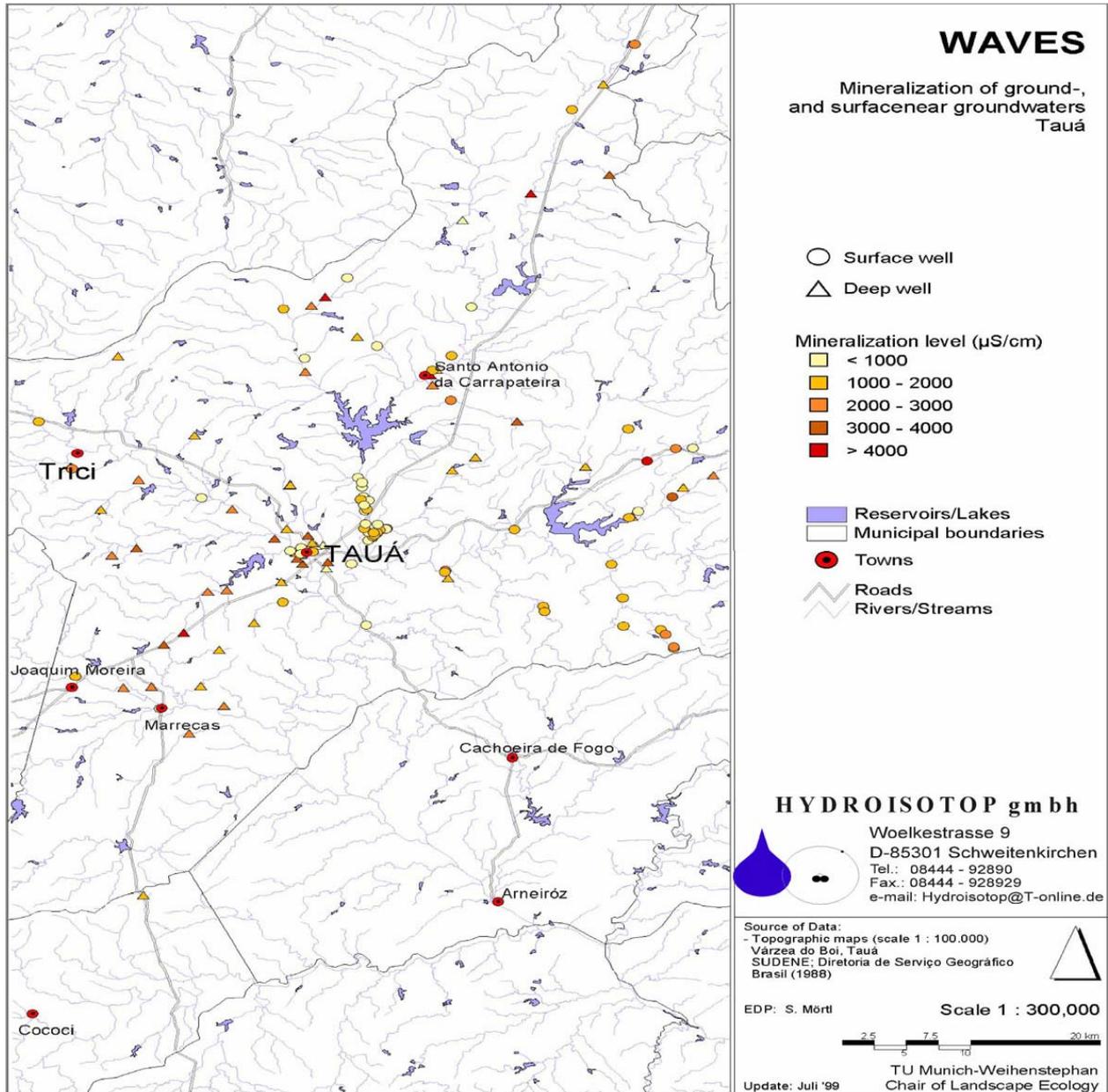


Abb. 6.2.1 Mineralisierung des Grundwassers in Tauá

Hierbei zeigte sich ein variables Bild mit teilweise hohen Leitfähigkeiten $> 4.000 \mu\text{S/cm}$ im Grundwasser. Bei der Betrachtung der chemischen Daten im Piper-Diagramm zeigte sich, dass es eine typische Ionenzusammensetzung für Oberflächenwässer gibt, die sich auch bei einigen Grundwassertypen wiederfinden ließ – ein indirekter Hinweis auf Neubildung durch Oberflächenwässer. Die Grundwässer nehmen vor allem Natrium und Chlorid auf.

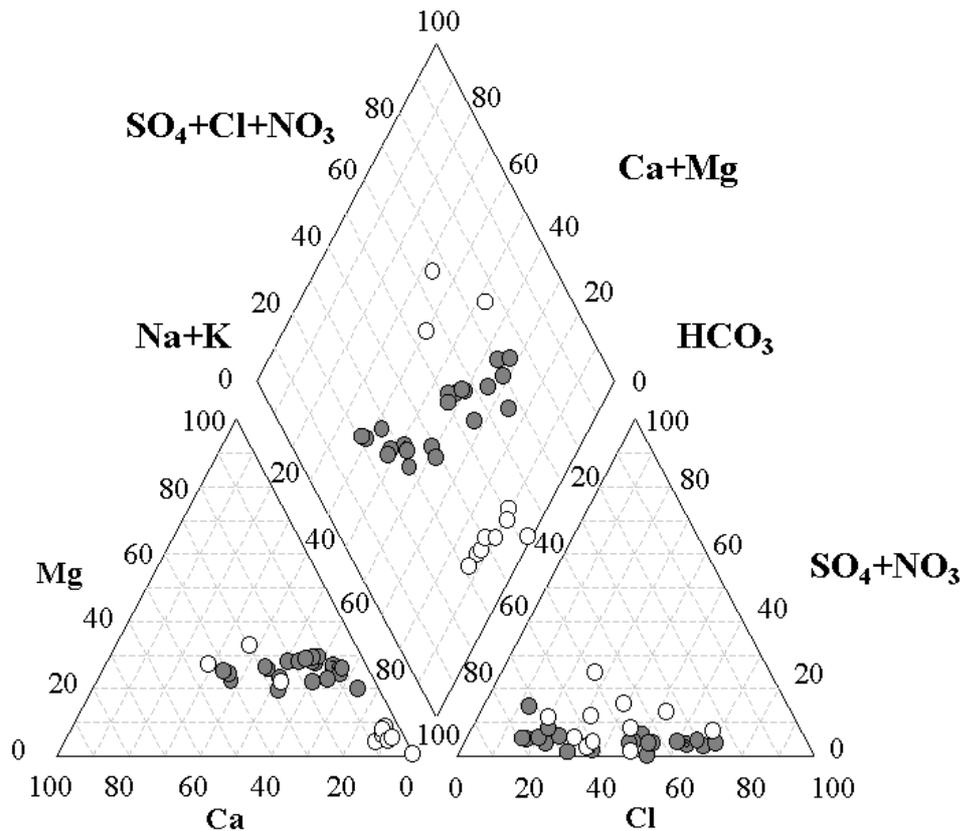


Abb. 6.2.2 Chemische Daten im Untersuchungsgebiet Tau: gefüllte Kreissignatur = Oberflächenwasser, leere Signatur = Grundwasser

Wegen der erhöhten Salinität kann nur ein geringer Teil der Grundwässer für die Trinkwasserversorgung verwendet werden. Auch für die Bewässerung sind die Grundwässer wegen eines hohen Natrium-Absorptions-Verhältnisses wenig geeignet: die Böden würden bei Bewässerung mit diesen Wässern an Aggregatstruktur verlieren und verschlämmen.

Die Ursachen der Salinität in Tauá sind viel diskutiert worden (Reboucas, 1973, Kreysing, 1976, Frischkorn et al., 1992, Salati et al., 1980, Santiago et al., 2001). Eine Zusammenfassung der ersten Arbeiten lieferte Salati et al. (1974). Die beiden Grundtheorien waren, dass die Versalzung entweder geogen durch die Auslaugung des Gesteins verursacht wird oder aber durch eine Anreicherung von atmosphärisch deponierten Salzen.

Wenn auch die geogene Versalzung nicht vollkommen ausgeschlossen werden kann, so gilt doch auf Grund der Gesamtsicht der Daten inzwischen die atmosphärische Deposition und die nachfolgende Konzentration der Salze im Wasserkreislauf durch hohe Verdunstung als die eigentliche Ursache der Versalzung in Tauá. Ca. 1 bis wenige mg/L Chlorid pro Liter Niederschlag werden in das System eingetragen. Die Verdunstung entfernt nur das Wasser, Chlorid und andere Salze bleiben im System. Ein Abtransport kann nur über den Grundwasserabstrom oder über den Abtransport gelöster Salze im Oberflächenwasser erfolgen. Die Kenntnis der Ursachen der Versalzung ist entscheidend für den möglichen Erfolg von langfristig angelegten Maßnahmen zur Verbesserung der Situation. Dies wurde durch eigene Untersuchungen der Anreicherung von Sauerstoff-18 und Chlorid bestätigt. Demnach erweist sich die Wiederverdunstung von Wasser, das die geringmächtigen Böden bereits passierte als der eigentliche Prozess für die Salzanreicherung. Die mangelnde Drainage von Grundwasser – und damit auch

von gelösten Salzen (!) und die mangelnde Abfuhr gelöster Salze über Oberflächenwässer, die das Einzugsgebiet verlassen und damit Salzfracht zum Meer abführen sind damit die Hauptprobleme.

Es ist auf Grund der Wasserhaushaltsuntersuchungen und der begleitenden chemischen Untersuchungen anzunehmen, dass zumindest in Teilbereichen somit eine Verringerung der Salzgehalte durch ausreichende direkte Neubildung eintreten könnte, sobald eine Entwässerung salzhaltigen des Grundwassers ermöglicht wird.

Dies wäre dann nicht möglich, wenn bereits in der Bodenzone eine Versalzung aufträte, die sich dann in das Grundwasser fortsetzte. Die Bodenwasserhaushaltsmodelle und die geringen Salzkonzentrationen in lokal begrenzten Bereichen, in denen noch kein erneuter Kontakt des Grundwasser mit der Atmosphäre bestand, zeigen jedoch, dass dies nicht der dominierende Mechanismus ist. Die mikrobiologische Qualität wurde an Oberflächenwässern und an Grundwasser untersucht. In Oberflächenwasser, im Wasser von Stauseen wurden durchgehend hohe Anzahlen von E. Coli und koliformen Keimen gefunden (< 2.000). Ursache sind die Einleitungen von Abwässern in die Oberflächengewässer, die den Staudamm speisen, sowie Verunreinigung des Staudammwassers selber in der Uferregion. Wegen der hohen Gehalte an gelöstem organischem Material ist auch die Chlorierung nicht unproblematisch. An den Wasserproben wurden im Rahmen einer Pilotuntersuchung auch halogenierte Kohlenwasserstoffe untersucht. Die Konzentration dieser Stoffe war insbesondere in Taua sehr hoch und überstieg den internationalen Grenzwert von 30 µg/L mehrfach.

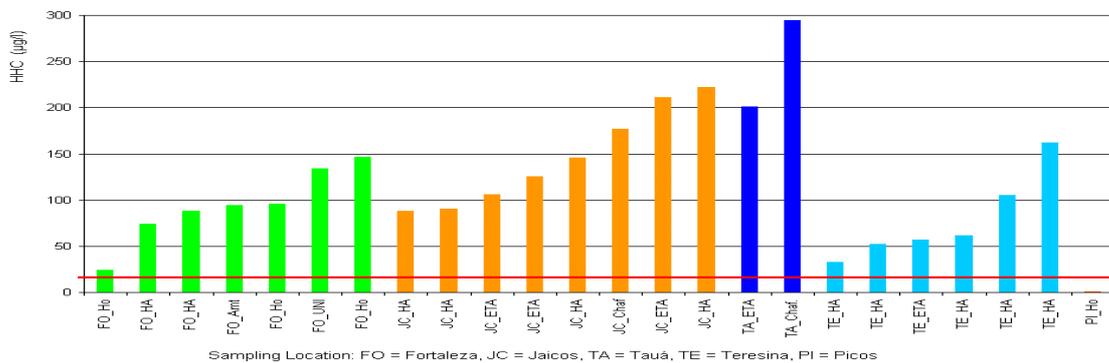


Abb. 6.2.3 Halogenated Hydrocarbons in drinking water

Daher sollte neben der vorbeugenden Behandlung von Trinkwasser vor allem der Schutz der Trinkwasserressourcen vor mikrobiologischen Verunreinigungen einen höheren Stellenwert erhalten. Insbesondere das Sammeln und Behandeln kommunaler Abwässer in dezentralen Anlagen sollte mittelfristig weiterentwickelt werden.

Zur Regionalisierung der Daten wurde eine Befragung von Wassernutzern in Taua durchgeführt. Diese Befragung wurde in einer Datenbank mit einer interaktiven Oberfläche abgebildet welche für Abfragen, statistische Analysen verwendet werden kann. Hierfür wurde ein relationales Datenbankmodell entwickelt. Die Datenbank umfasst 217 Datensätze mit Angaben zur Lokalität, Nutzungsgewohnheiten, Herkunft des Trinkwassers zur verschiedenen Jahreszeiten, Bewertung der Wasserqualität, Wünschen zur Verbesserung der Situation und zur Krankheitsangaben (Magenprobleme, Fieber) insbesondere von Kindern.

B10-Fonte de agua

Questionário N°:

		Nome	Quantidade
<input checked="" type="checkbox"/> a-açude	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="velho"/>	<input type="text" value="3"/>
<input checked="" type="checkbox"/> b-poço	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="text" value="1"/>
<input type="checkbox"/> c-CAGECE	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> d-dessalinizador	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> e-cisterna de água de chuva	<input type="checkbox"/>		<input type="text" value="0"/>
<input type="checkbox"/> f-caçimbãc	<input type="checkbox"/>		<input type="text" value="0"/>
<input type="checkbox"/> g-cacimba no rio	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="0"/>
<input type="checkbox"/> h-rio perene	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="0"/>
<input type="checkbox"/> i-barreiro	<input type="checkbox"/>		<input type="text" value="0"/>
<input type="checkbox"/> j-n.s.	<input type="checkbox"/>		

Abb. 6.2.4 Benutzeroberfläche der Datenbank zur Wasserqualität in Taua Regionale Auswertung der Daten aus der Datenbank Wasserqualität

Diese Datenbank wurde dann mit einem GIS gekoppelt, die Angaben zur Lokalität wurden georeferenziert und somit wurde es möglich, die Angaben der Befragten auch regional darzustellen. So können Regionen identifiziert werden, in denen sich Bewohner überwiegend von Oberflächenressourcen versorgen, andere in denen eine Grundversorgung durch Grundwasser möglich ist. Damit können Entwicklungsmaßnahmen gezielter geplant und den regionalen Bedürfnissen angepasst werden.

Mit der COGERH wurde eine Wasserqualitäts-Probenahmeprogramm vereinbart. Hierfür wurden der COGERH Schnelltests für die Stickstoff- und Chlorid-Analytik, sowie für die Untersuchung koliformer Keime (Sealer) zur Verfügung gestellt. Diese Untersuchungen der COGERH gingen über WAVES hinaus und waren beim Abschluss des Projektes noch nicht beendet.

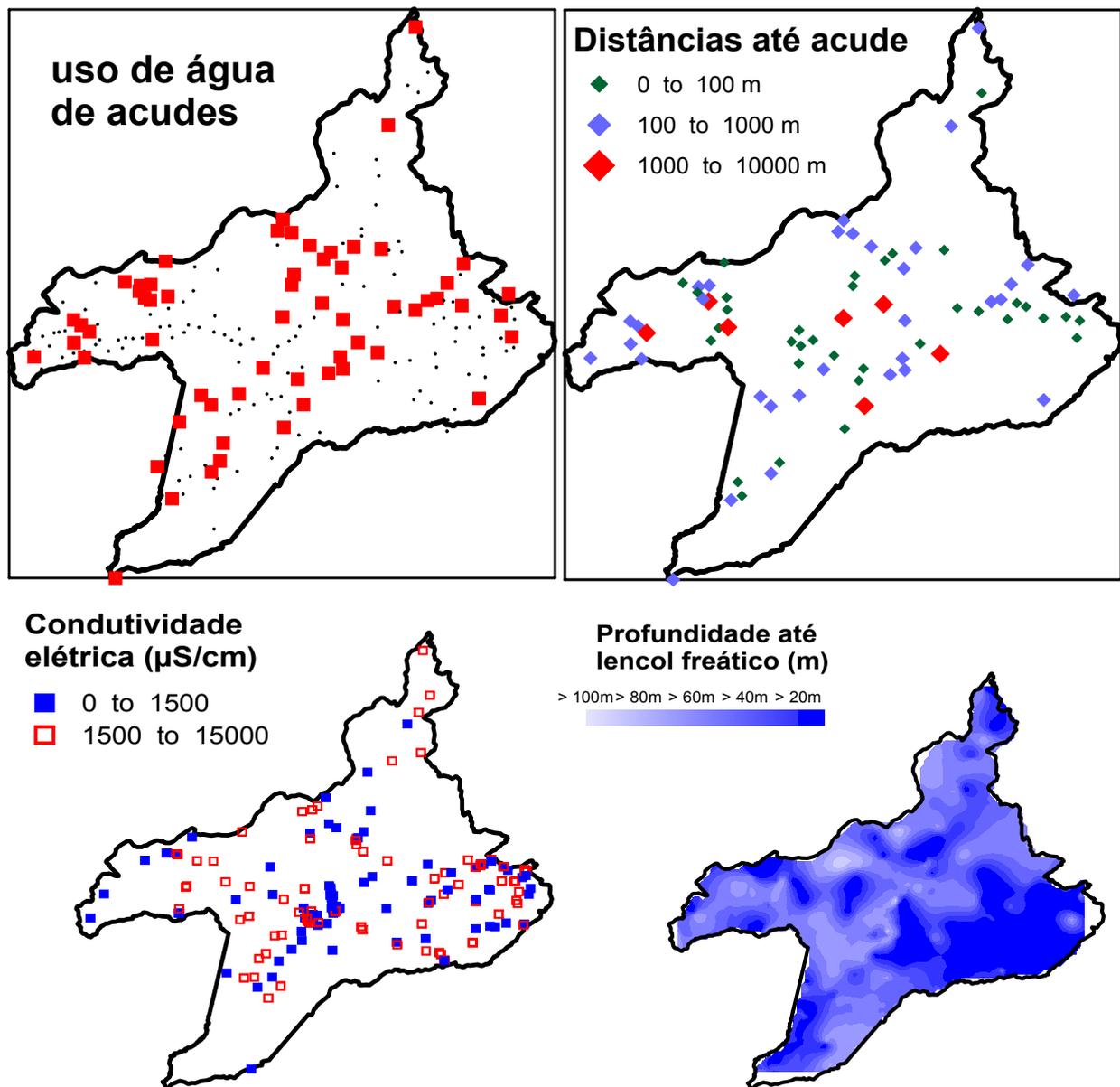


Abb. 6.2.5 GISoberfläche der Datenbank zur Wasserqualität in Tavares zur regionale Auswertung der Daten aus der Datenbank Wasserqualität. Dargestellt sind die Wassernutzung (hier nur eine mögliche Abfrage aus einem Fragenkatalog von ca. 40 Merkmalen) und naturräumliche Kenndaten

7 Beiträge zu weiteren Arbeitsgruppen

Die Einschätzung von Auswirkungen möglicher politischer Eingriffe sowie die Analyse der Sensitivität für globale Änderungsprozesse in Form von Szenarienstudien stellte eine wesentliche Anwendung der integrierten Studien dar.

Nach einem WAVES-Workshop in Kassel im November 1998, bei dem erste qualitative Referenzszenarien erarbeitet wurden, bildete sich die fächerübergreifende Arbeitsgruppe Szenarien, an der auch die Hydroisotop mitarbeitet.

Die AG entwickelte die qualitativen Referenzszenarien weiter, über die dann mit den brasilianischen Partnern diskutiert wurde. Danach quantifizierte die AG Szenarien die treibenden Kräfte der Szenarien (abgesehen vom Klima). Die treibenden Kräfte dienten als Eingabe der verschiedenen Modelle, die im WAVES-Programm verwendet wurden.

Als **Referenzszenarien** werden hier die Szenarien bezeichnet, in denen keine Maßnahmen angenommen werden, die explizit eine nachhaltige Entwicklung des Untersuchungsgebiets zum Ziel haben. Insbesondere sind damit solche Maßnahmen gemeint, die speziell in den vom WAVES-Projekt bearbeiteten Bereichen Wassermanagement, landwirtschaftliche Produktion und Migration durchgeführt werden könnten.

Solche Referenzszenarien werden benötigt, um die Auswirkungen von konkreten Maßnahmen, welche in den sogenannten **Interventionsszenarien** simuliert werden, abschätzen zu können. Bei einem Interventionsszenario wird eine Maßnahme oder ein Maßnahmenpaket innerhalb des entsprechenden Referenzszenarios durchgeführt. Die Modellierung derselben Intervention bei verschiedenen Referenzszenarien zeigt auf, wie abhängig die Wirkung dieser Intervention von den Rahmenbedingungen ist. An dieser Stelle werden die für die Wasserverfügbarkeit relevanten Szenarien betrachtet und diskutiert, an denen die Hydroisotop mitarbeitete.

7.1 Referenzszenario A: Küstenboom und Cash Crops (Globalisierung)

Bei Szenario A vollzieht sich die gesellschaftliche Entwicklung, ökonomisch-technologisch ausgerichtet, in einer Welt der Globalisierung der Wirtschaft mit freien Märkten und des wachsenden Wohlstands. Diese Welt ist gekennzeichnet durch zunehmenden Individualismus und Materialismus. Innovationen nicht nur auf technologischen Gebieten verbreiten sich schnell global. Die Unterschiede zwischen reichen und armen Regionen nehmen ab, soweit die natürlichen Ressourcen die Entwicklung nicht behindern. Das Bewusstsein gegenüber der Umwelt ist a priori nicht vorhanden, verbessert sich aber, wenn Umweltauswirkungen für die wirtschaftlichen Aktivitäten bedeutend werden. Unter solchen Bedingungen ist es interessant, sich ressourcensparenden Produktionsmethoden zuzuwenden.

Die Umsetzung dieser Entwicklungsrichtung führt in den Bundesländern Ceará und Piauí zu einer starken wirtschaftlichen Entwicklung und zu stark ansteigendem Tourismus in der Küstenregion. Das Hauptzentrum der Entwicklung liegt eindeutig in den Küstenstädten. Am wesentlichsten profitiert der Großraum Fortaleza von dieser Entwicklung. Deshalb machen sich auch hier am stärksten die Nachteile schnell wachsender Städte bemerkbar. Diese zeigen sich in verhältnismäßig zu langsamem Ausbau der Infrastruktur (z.B. Wasserversorgung) und dem Wachsen von Favelas in den Randgebieten der Stadt. Teresina zeigt aufgrund der ungünstigen Lage nur eine gemäßigte Entwicklung.

Im Hinterland wird, wo es die naturräumlichen Gegebenheiten zulassen (wasserreiche Gebiete), die marktorientierte Landwirtschaft mit Anbau von Cash Crops bestimmend. Die Subsistenzlandwirtschaft ist hier auf schnellem Rückzug.

7.2 Referenzszenario B: Integrierte ländliche Entwicklung (Dezentralisierung)

Im Szenario B findet eine dezentrale ländliche Entwicklung in Piauí und Ceará statt, die mit einer verstärkten Ausbildung von Mittelzentren und einer regionalen Marktorientierung verbunden ist. Der Ausdruck „Integrierte ländliche Entwicklung“ bezieht sich darauf, dass im Unterschied zum Referenzszenario A die Entwicklung nicht vorwiegend ökonomischen Zielen folgt, sondern auch soziale und ökologische Aspekte Berücksichtigung finden.

Die Bildung gut funktionierender Organisationsstrukturen und staatliche Steuererleichterungen für die weiterverarbeitende Industrie außerhalb der Metropolen gibt einen positiven Impuls für die Entwicklung von sekundärer Industrie in den Mittelzentren. Als wesentlicher Gegensatz zu RS A bilden sich im wasserreichen Hinterland außerlandwirtschaftliche Erwerbsquellen. Lösungen für ein optimiertes Landnutzungsmanagement werden primär auf regionaler Basis erarbeitet. Die Weltbank und andere internationale Einrichtungen fördern gezielt die Landwirtschaft in krisenanfälligen semi-ariden Gebieten. Die Entwicklung der folgenden treibender Kräfte wurde teilprojektübergreifend quantifiziert u.a. im Hinblick auf die **Bewässerungsfläche**.

Die Bevölkerung und ihre Entwicklung ist wohl die zentrale Kenngröße der WAVES-Szenarien. So wird Trockenheit immer nur dann zum Problem, wenn der Wasserbedarf der Bevölkerung nicht gedeckt werden kann. Auch die Einkommensmöglichkeiten in der Landwirtschaft sind stark abhängig von der Anzahl der Personen, die von landwirtschaftlicher Tätigkeit lebt. Es ist auch in Zukunft zu erwarten, dass sich der Modernisierungstrend und der gesellschaftliche Wandel fortsetzt, so dass, verbunden mit sinkenden Fertilitäten, die Wachstumsrate weiterhin abnehmen wird.

Der Anteil an der Gesamtbevölkerung erhöht sich für diejenigen Szenarioregionen, für die eine starke Zuwanderung zu erwarten ist. Im RS A (Globalisierung) sind das der Großraum Fortaleza und die Küste, die durch Industrie- und Tourismus an wirtschaftlicher Attraktivität gewinnen. Auch im RS B (Dezentralisierung) erhöhen sich die Bevölkerungsanteile im Großraum Fortaleza, in Teresina und in der Küstenregion, jedoch gegenüber dem heutigen Trend und dem im RS A stark abgeschwächt. Gleichfalls abgeschwächt ist der heutige Trend in den Gebieten mit relativ großen und mit relativ geringen potentiellen Wasserressourcen, was auf die Dezentralisierung, die stärkeren regionalen Bindungen und die Art der wirtschaftlichen Umstrukturierung in diesen (ländlichen) Gebieten zurückzuführen ist.

Tab. 7.2.1: Entwicklung des Anteils der Bevölkerung in den Szenarioregionen an der Gesamtbevölkerung von Piauí und Ceará, differenziert nach Referenzszenarien (in Prozent).

			Referenz- szenario A	Referenz- szenario B
Szenarioregion	1991	1996	2025	2025
Teresina	6,7	6,9	8,1	7,3
Großraum Fortaleza	26,1	27,6	35,4	30,6
Küstenregion	12,7	12,8	17,4	13,3
Süden von Piauí	3,1	2,9	2,4	2,9
Gebiete mit großen potentiellen Wasserressourcen	33,8	32,9	26,9	31,9
Gebiete mit geringen potentiellen Wasserressourcen	17,6	16,9	9,8	14,0
	100,00	100,00	100,00	100,00

Um die Lebensqualität in Piauí und Ceará zu erhöhen, werden, vor allem mit Hilfe von Sonderprogrammen der brasilianischen Bundesregierung, heute Anstrengungen unternommen, den Anschlussgrad der Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung zu erhöhen und so für einen immer größeren Anteil der Bevölkerung eine sichere Wasserversorgung zu gewährleisten. So wird in beiden Referenzszenarien davon ausgegangen, dass sich der Anschlussgrad an die öffentliche Wasserversorgung erhöhen wird (Tab. 7.2.1). In der Tabelle ist auch angegeben, welchem Anteil an der städtischen Bevölkerung der jeweilige Anschlussgrad entspricht. Heute ist nämlich fast ausschließlich die städtische Bevölkerung (Siedlungen über 2000 Einwohner), vorwiegend die der Muniziphauptstädte, angeschlossen. Bei den Referenzszenarien gehen wir davon aus, dass auch ein kleiner Anteil der ländlichen Bevölkerung über kleine Wassergewinnungsanlagen und Leitungsnetze, die ordnungsgemäß betrieben werden, mit sicherem Wasser versorgt wird.

Die betrachtete Intervention besteht in einer verstärkten Ausdehnung der öffentlichen Wasserversorgung auf die gesamte städtische Bevölkerung und auf 15% der ländlichen Bevölkerung. Tabelle 7.2.1 zeigt die sich aus dieser Maßnahme ergebenden Anschlussgrade in den Szenarioregionen. Die verstärkte Ausdehnung der öffentlichen Wasserversorgung verursacht gegenüber den Referenzszenarien erhöhte Kosten und bewirkt eine erhöhte Wassernutzung, die angesichts der mangelnden Wasserverfügbarkeit problematisch sein könnte. Andererseits erhöht sich dadurch die Lebensqualität. Abschließend können auf Grund der Szenarien folgende Entwicklungen abgeleitet werden: Es wird zu einer Verschärfung der Versorgungssituation in Fortaleza kommen. Hier werden Investitionen in die Wasserversorgung erforderlich sein. Im Hinterland wird die dezentrale Wasserver- und Entsorgung von großer Bedeutung sein, in beiden Szenarien wirkt die autogene Versorgung stabilisierend.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die **AG Wassermanagement und Wasserressourcen** entwickelte das gruppenübergreifende Wasserhaushaltsmodell WARIG für die Fokusregion Picos. Zum anderen stellte WARIG für das Landnutzungsmodell MOSDEL die notwendige Datengrundlage für die Abschätzung von Wasserdargebot und -qualität dar. WARIG dient darüber hinaus als Planungsinstrument bei der wasserwirtschaftlichen Regionalplanung in Picos. Während der Aufstockungsphase wurde WARIG in eine GIS-Umgebung eingebunden, die GIS Applikation wurde nun als BOWADMOD bezeichnet. Diese Anwendung enthält alle Modellparameter als Kartensystem und Klimadaten; für ausgewählte Standorte können Neubildungsraten und Bodenwasserhaushalt berechnet und als Karten dargestellt werden. Für die DHME wurde dieses System zur Entscheidungshilfe der wasserwirtschaftlichen Planung, insbesondere zur Berechnung der nachhaltigen Neubildungsraten installiert. Mit BOWAMOD und WARIG sind Berechnungen für beliebige Naturräume und Zeitreihen für den Boden- und Grundwasserhaushalt möglich.

Dieses System wurde während der Aufstockungsphase ebenfalls für Tauá angepasst und dort angewendet.

Die durchgeführten hygienischen Trinkwasseruntersuchungen zeigten gekoppelt mit der Analyse der Wasserversorgungsstruktur strukturelle Defizite in den Fokusgebieten. So wurden erstmals systematische Tiefenprofile chemischer Parameter über ein Jahr gemessen, die deutlich die zu hohe Belastung mit organischer Substanz zeigten. Die Wasserverfügbarkeit wird in Zukunft auch entscheidend von der Verringerung solcher Belastungen beeinflusst werden. In Tauá wurde eine detaillierte Befragung zur Wasserstruktur und Wasserqualität durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Befragung wurden in einer relationalen Datenbank gespeichert und mit einem Geographischen Informationssystem gekoppelt. Dieses System dient zur Visualisierung der räumlichen Verteilung der Art der Wasserversorgung und des Auftretens von mit Wasser in Zusammenhang stehenden gesundheitlichen Problemen.

Feldkampagnen wurden gemeinsam mit brasilianischen Kollegen durchgeführt. Im Bereich der Wasserqualität entwickelte sich eine Zusammenarbeit mit der DHME und COGERH. Vor allem die Trinkwasserhygiene in abgelegenen Gebieten ist durch zum Teil hohe mikrobiologische Belastungen gekennzeichnet, dies gilt durchweg auch für die Oberflächengewässer. Auch die Desinfektion dieser Wässer ist wegen der Bildung von chlorierten Kohlenstoffverbindungen nicht unproblematisch. Somit ist die Wasserqualität ein zusätzlich die Wasserverfügbarkeit limitierender Faktor. Dies gilt in Tauá wegen der beobachteten Versalzung des Grundwassers. In diesem Bereich wurde durch die Untersuchungen zur Versalzungsproblematik ein Konzeptmodell entwickelt, das als Basis für zukünftig langfristig angelegte Maßnahmen zur Verringerung der Versalzung dienen könnte. Durch eine Erhöhung der Salzfracht aus dem Gebiet könnten lokal Grundwasserreserven gebildet werden.

Die Hydroisotop war wesentlich an der Initiierung und Koordination der Erstellung des WAVES Films beteiligt. Dieser Film in englischer und portugiesischer Sprache vermittelt die Forschungsansätze und die Ergebnisse von WAVES.

Generell lässt sich sagen, dass in der ersten Projektphase von WAVES wichtige Daten zum regionalen Wasserhaushalt erhoben und wesentliche Werkzeuge erstellt wurden um Wasserhaushalt zu quantifizieren. Im Bereich der Wasserqualität wurden erste Programme (Mikrobiologie, Stauseen/Stratifizierung, Versalzungsproblematik, Isotopen) initiiert. Die Datenbank für die Wasserqualität Taua und die Wasserkrankheiten konnte fertiggestellt jedoch nicht mehr vor Ort implementiert werden. Es ergaben sich in der Endphase Ansätze zur Verbesserung der Versalzungsproblematik in Taua, die in WAVES nicht realisiert werden konnten.

9 Literatur

- Araújo, J. C. de; Ribeiro, A. L. (1996). Assessment of water losses in rivers in semi-arid. Proceedings of the III Simp. Recursos Hídricos Nordeste. Salvador, Brazil. p. 215-221.
- Bronstert, A. (1994). Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. IHW 46: 193 S. Universität Karlsruhe.
- Chiang, W.H. and Kinzelbach, W. (1993). Processing Modflow (PM), Pre- and postprocessors for the simulation of flow and contaminants transport in groundwater system with MODFLOW, MODPATH and MT3D. Users manual.
- Frischkorn, H., Santiago M.F. (1993). The paleoclimate of the northeast of Brazil according to isotope hydrology. Impacts of climatic variations and sustainable development in semi-arid regions. ICED, Fortaleza, Brasilia, Brazil: Foundation Esquel of Brazil.
- Hastenrath, S., (1991). Climate Dynamics of the Tropics. Dordrecht, Boston, London (Kluwer Academic Publishers).
- Hörmann, G. (1999a). The SIMPEL soil water spreadsheets: defining the low end of hydrologic computing. Ecosystem Research Center Kiel. URL: <http://www.pz-oekosys.uni-kiel.de>
- Hörmann, G. (1999b). Simpel - Speichermodelle zum Bodenwasserhaushalt; Ecosystem Research Center Kiel. URL: <http://www.pz-oekosys.uni-kiel.de>
- Heinrichs, G., Voerkelius, S., López Gil, M.M., de Caldas Brito Vieira, V. (2000) The German-Brazil "Waves" Project: Investigations Of Drinking Water Quality In Northeast Brazil. Proceedings, IAH 2000.
- IBGE (1998a). Censo Agropecuário 1995/96. Rio de Janeiro.
- Kreysing, K. (1976). Hydrogeologische Forschungsarbeiten in Kristallin NW-Brasilien. Münster. Forsch. Geol. Paläont., H. 38/39, p. 89-98.
- McDonald, M.C. and Harbaugh, A.W. (1988). MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey. Open-file report 83-875, Chapter A1.
- Parry, M.L., Carter, T.R. and Konjin, N.T. (Ed.) (1988). The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Vol. 2. Dordrecht, Boston, London (Kluwer Academic Publishers).
- Reboucas, A.C. (1973). Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil. DSc. Thèse présentée à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, pp. 291.
- Salati, E., Matsui, E., Leal, J.M., Fritz, P. (1980). Utilisation of natural isotopes in the study of salinisation of the waters in the Pajeú river valley, NE-Brazil. Proceeding IAEA, 1979, p. 133-151.
- Santiago, F.M., Friskorn, H., Neto, P.S., Filho, M.F. (2001). The Recharge Mechanisms in an Alluvial Aquifer Zone in Northeast Brazil. Ground Water, Vol. 39 (1): 18-23
- Seibert, P. (1996). Farbatlas Südamerika - Landschaften und Vegetation. Stuttgart. (Ulmer).
- Soil Conservation Service (1972). National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4-10. United States Department of Agriculture. Washington D.C., USA.
- SUDENE (1968). Mapa hidrogeológico do Nordeste, Folha N° 9 (Jaguaribe-NE), Recife.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

SUS Sistema Único de Saúde

WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltänderungen