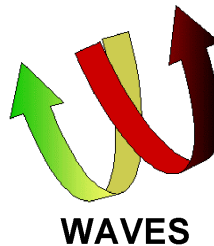


**WASSERVERFÜGBARKEIT SOWIE ÖKOLOGISCHE, KLIMATISCHE UND  
SOZIOÖKONOMISCHE WECHSELWIRKUNGEN IM SEMIARIDEN  
NORDOSTEN BRASILIENS**



**Verbundprojekt WAVES  
Statusbericht der ersten Hauptphase**

**Fachbereich Wasser  
Arbeitsgruppe Wassermanagement und Wasserressourcen**

Zuwendungsempfänger: Hydroisotop GmbH

Förderkennzeichen: 01 LK 9707

Vorhabenbezeichnung: Wassermanagement und Wasserressourcen im Verbund-  
projekt WAVES

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.1997 - 31.07.2000

Berichtszeitraum: 01.08.1997 - 31.12.1999

Bearbeitung: Dr. Markus Forster, Dr. Gerold Heinrichs,  
Dr. Susanne Voerkelius, Dipl.Hydrologe Yves Muck

Schweitenkirchen, den 15.2.2000  
Hydroisotop GmbH  
Woelkestr. 9  
85301 Schweitenkirchen

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Zusammenfassung.....</b>                                                                          | <b>2</b>  |
| <b>2 Stand des Vorhabens .....</b>                                                                     | <b>3</b>  |
| 2.1 Einleitung und Fragestellung.....                                                                  | 3         |
| 2.2 Methodisches Vorgehen .....                                                                        | 3         |
| 2.3 Ergebnisse (gegliedert nach räumlichen Ebenen).....                                                | 4         |
| 2.3.1 Untersuchungsgebiete Picos und Tauá in Nordost-Brasilien.....                                    | 4         |
| 2.3.2 Wasserverfügbarkeit im Fokusgebiet Picos .....                                                   | 6         |
| 2.3.3 Wassermanagement, Wasserversorgungsstruktur .....                                                | 14        |
| 2.3.4 Wasserqualität.....                                                                              | 15        |
| 2.3.5 Untersuchung versalzter Grundwässer im Fokusgebiet Tauá.....                                     | 18        |
| 2.3.6 Vergleichende Bewertung von Wasser- und Umweltprojekten in Ceará und Piauí.....                  | 22        |
| 2.4 Diskussion (Antworten auf die Fragestellung und offene Fragen).....                                | 24        |
| 2.5 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern.....                 | 25        |
| 2.6 Bibliographie .....                                                                                | 26        |
| 2.6.1 Eigene Publikationen .....                                                                       | 26        |
| 2.6.2 Zitierte Literatur.....                                                                          | 27        |
| <b>3 Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung und<br/>    Ausblick .....</b> | <b>29</b> |
| <b>4 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind.....</b>                              | <b>29</b> |
| <b>5 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten .....</b>                                                | <b>29</b> |
| <b>Anhang.....</b>                                                                                     | <b>30</b> |

Verwendete Kurzformen:

|            |                                                                                                    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COGERH     | Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, Ceará                                                   |
| COMDEPI    | Companhia do Desenvolvimento do Piauí, Piauí                                                       |
| CPRM-CE    | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Ceará                                                  |
| CPRM-PI    | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Piauí                                                  |
| DHME-SEAAB | Departamento de Hidrometeorologia- Secretaria de Agricultura e<br>Abastecimento do Estado do Piauí |
| DNOCS      | Departamento Nacional de Obras Contra as Secas                                                     |
| UECE       | Universidade Estadual do Ceará                                                                     |
| UFC        | Universidade Federal do Ceará                                                                      |

## 1 Zusammenfassung

Die Arbeitsgruppe Wassermanagement und Wasserressourcen hat innerhalb des Gesamtprojektes die Aufgabe, auf mikro- und mesoskaliger Ebene in den Fokusgebieten Picos und Tauá hydrologische, hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Systeme sowie die Wasserqualität zu analysieren und zu beschreiben. Die Fokusgebiete wurden mehrfach gemeinsam mit den brasilianischen Partnern besucht, Untersuchungen zur Wasserqualität und Wasserbilanz durchgeführt und Interviews geführt. Mit den Geländedaten, dem Expertenwissen der Brasilianer und Literatur wurden die naturräumlichen Bedingungen der Fokusgebiete beschrieben.

Im Fokusgebiet Picos wurde der gruppenübergreifende Wasserhaushalts-Modellansatz WARIG entwickelt. Dieser verbindet die Bilanzglieder Oberflächenabfluß, Bodenwasserhaushalt, Grundwasser mit dem Monitoring von Stausee, Grundwasser und Flüssen. Die Modellergebnisse dienen der Abgleichung der einzelnen Teilmodelle und dem Abgleich mit den großskaligen Modellen anderer Gruppen. Es wurden kostengünstige und international genutzte Modelle verwendet, um eine Anwendung in Brasilien zu vereinfachen. Die Ergebnisse fließen über unseren brasilianischen Partner in die Regionalplanung von Piauí ein, da das Gebiet von Picos eine Musterregion für wasserwirtschaftliche Planungen ist. Erste Simulationen geänderter Klimabedingungen zeigen nur geringe Auswirkungen auf Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluß. Als noch zu wenig bearbeitet stellte sich die Frage des Zwischenabflusses heraus.

Die Untersuchung zur Trinkwasserqualität im Fokusgebiet Picos, in dem hauptsächlich Grundwasser genutzt wird, zeigt, dass eine gute Rohwasserqualität, aber in Abhängigkeit vom Versorgungssystem meist eine schlechte hygienische Qualität vorliegt. In der Fokusregion Tauá sind wesentliche Einschränkungen durch versalztes Wasser gegeben. Aufgrund einer besseren Wasserdesinfektion (Chlorung) wurde in Tauá seltener mikrobiell belastetes Trinkwasser nachgewiesen. Die Chlorung führt allerdings zum Teil zu krebserregenden Chlorkohlenwasserstoffen (CKW). Gemeinsam mit einer Wasserstrukturanalyse kann die Trinkwasserqualität an Ortsstrukturen gekoppelt und hochskaliert werden, wobei folgenden Kriterien zu berücksichtigen sind: Eigentümer der Wasserversorgung, Wasserquelle, Art des Versorgungssystems, Wasseraufbereitung, Qualitätskontrolle, Wasserpreis. Für den Bewässerungslandbau ist die Grund- und Oberflächenwasserqualität in Picos, wie allgemein in Piauí, meist gut geeignet, in Tauá sind hohe Salzgehalte störend, wie dies auch weit verbreitet in ganz Ceará auftritt. In Ceará führt die Versalzung von Grundwässern dazu, dass etwa 60 % der bestehenden Brunnen nicht genutzt werden. Mit Isotopenuntersuchungen wird gezeigt, dass in den Stauseen die Verdunstung zur Versalzung führt, im Grundwasser jedoch auch andere Mechanismen wirken. Es wurde eine Vorstudie zur künstlichen Grundwasseranreicherung ausgeführt, die zur Speicherung von Süßwasser führen kann und somit die zeitliche Wasserverfügbarkeit erhöht.

Für die Entwicklung von Szenarien, die an brasilianische Verhältnisse besser angepasst sind, wurde vergleichende Bewertung von bestehenden Wasser- und Umweltprojekten in NE-Brasilien durchgeführt. Diese zeigt, dass folgende Kriterien für den Erfolg von Projekten verantwortlich sind: Eigentumsverhältnisse, Partizipation von Nutzern, Fortbildung und „capacity building“, Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien sowie die Einbindung in die Regionalplanung. Bei neueren Projekten finden diese Kriterien weitgehend Berücksichtigung. Vor allem die Einbindung in die Regionalplanung ist im Rahmen von WAVES ein wesentlicher Umsetzungspunkt. Unser Teilprojekt vereinbarte diesbezüglich Kooperationen mit brasilianischen Fachbehörden. Die erkannten Systemzusammenhänge wurden von uns in die Szenariengruppe eingebracht. Durch die Anregung und Planung des WAVES-Films und der Informationsveranstaltungen für Politiker und Bauern im Herbst 1999 in Teresina und Picos konnte essentiell zur Aufbereitung von WAVES beigetragen werden.

## 2 Stand des Vorhabens

### 2.1 Einleitung und Fragestellung

Das übergeordnete Ziel des FB Wassers ist die Erhebung, Bewertung, Beschreibung und Modellierung sowie die Zukunftssimulation der Grund- und Oberflächenwasserverfügbarkeit und Nutzung im Untersuchungsgebiet auf verschiedenen Skalen. Aufgabe des Teilprojektes Wassermanagement und Wasserressourcen (AG Wassermanagement und Wasserressourcen) ist dabei, auf der Mikro- und Mesoskala Detailprozesse der Wasserverfügbarkeit und –Nutzung sowie des Managements zu erkennen und zu beschreiben sowie auf Fokusgebietsebene Prozesse zu modellieren und zukünftige Entwicklungen zu simulieren. Die Prozessbeschreibung ist eine Voraussetzung für die Szenarienentwicklung und die Modellerstellung auf der Makroskala. Mit der Erstellung auf unterschiedlichen Skalen werden die Modelle gegenseitig geprüft und optimiert. In Tabelle 1 sind die Tätigkeitsfelder unseres Teilprojektes innerhalb des gesamten WAVES-Programmes dargestellt. Die Untersuchungen und Ergebnisse werden durch den Kontakt mit den brasilianischen Kooperationspartnern auf allen Nutzungsebenen, Einzelnutzer, Versorgungssystem, Regional- und Landesplanung aktiv vermittelt (siehe Kooperationsvereinbarung im Anhang).

Tab.1: Themen des Teilprojektes Wassermanagement und Wasserressourcen

| Themen                                  | Vorphase<br>1993-1995                                                                                                                                                                   | Phase I<br>7/1997-6/2000                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Management:<br>Versorgungs-<br>struktur | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Übersicht Versorgungsstrukturen Piauí</li> <li>• Qualitative Kosten-Nutzenauswertung</li> </ul>                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserversorgungsstruktur Fokusgebiet Picos</li> <li>• Rechtliche Grundlagen für Wassernutzung</li> <li>• Wasserrahmenplanung Piauí</li> <li>• Bewertung von Wasserprojekten, Managementmaßnahmen</li> </ul>                                                                              |
| Management:<br>Ressourcen               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschreibung verfügbarer Ressourcen unter Einbezug von Grundwasser-Altersbestimmungen in Piauí</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserbilanzen im Fokusgebiet Picos</li> <li>• Entwicklung des Bilanzmodells WARIG</li> <li>• Wasserverfügbarkeitsmodul für Landnutzungsmodell MOSDEL</li> <li>• Qualitative Bilanzsimulation nach Klimaänderungen</li> </ul>                                                             |
| Management:<br>Qualität                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualitative Übersicht über verfügbare Oberflächen- und Grundwasser-Ressourcen Piauí</li> </ul>                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserqualität und Gesundheit: Analyse und Bewertung der Roh- und Trinkwasserqualität im Fokusgebiet Picos</li> <li>• Abhängigkeit der Qualität vom Versorgungssystem</li> <li>• Trinkwasserqualität im Fokusgebiet Tauá</li> <li>• Versalzungsproblematik im Fokusgebiet Tauá</li> </ul> |
| Skalen                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessbeschreibung und Systemanalyse</li> <li>• Grundwasserdargebot Piauí</li> </ul>                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessbeschreibung und Systemana. der lokalen Gegebenh.</li> <li>• Datenabgleich mit großskaliger hydrologischer Modellierung HYMO und NoWUM auf Fokusgebietsebene</li> </ul>                                                                                                            |
| Szenarien                               | (keine Szenarienarbeit in der WAVES-Vorphase)                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung von Referenzszenarien (gruppenübergreifend)</li> <li>• (Umsetzung der Simulationen in die Szenarien auf Fokusgebietsebene)</li> <li>• Beschreibung von Wasserprojekten und Ableitung von Bewertungskriterien</li> </ul>                                                       |
| Bilaterale<br>Kooperation               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suche nach Partnern</li> <li>• Ausarbeitung gemeinsamer Programme</li> <li>• Gemeinsame Probenahme und Auswertung von Isotopendaten</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemeinsame Probenahme, Experteninterviews, Auswertung, wechselseitige wissenschaftliche Besuche</li> <li>• Gemeinsame Publikationen</li> <li>• Organisation von internat. Workshops in Picos und Teresina</li> <li>• Planung des Filmprojektes</li> </ul>                                 |

### 2.2 Methodisches Vorgehen

Die Arbeiten der AG Wassermanagement und Wasserressourcen gliedern sich in verschiedene Teilbereiche mit entsprechend unterschiedlichen methodischen Ansätzen.

**Datenakquisition und Interviews:** Die Grundlage der vorliegenden Ausarbeitung ist eine Literaturrecherche, die durch Vorort recherchierte Daten zur Wasserqualität, Wassermenge, Wasserversorgungs- und Nutzungsstruktur ergänzt wurde. Einen Schwerpunkt unserer Arbeiten stellten Experteninterviews z.B. mit Bürgermeistern und Wasserversorgungsunternehmen dar,

die mit einem in der Vorphase entworfenen und noch weiterentwickelten Fragenkatalog durchgeführt wurden (Hydroisotop 1996). Die Interviews geben einen qualitativen Einblick in die Entscheidungs-, und Steuerungsprozesse der Wasserverwaltung. Quantitativ wurde aus den Interviews Daten zur Wasserversorgung abgeleitet, die in Statistiken bisher nicht auftauchen. Die Beschreibung und Bewertung bestehender Wasserprojekte wurde ebenfalls durch Hintergrundrecherchen und Experteninterviews durchgeführt.

Wasseranalytik: Je nach Wasserart, Nutzung und Fragestellung wurden unterschiedliche analytische Methoden verwendet, die im Folgenden tabellarisch aufgelistet sind. Probenahme, Probentransport und Analytik erfolgten, teilweise eingeschränkt durch die Feldbedingungen, nach den derzeit geltenden DIN-, DVWK- und DVGW-Regeln und -Merkblättern.

Tab. 2: Untersuchungsmethoden für Regenwasser (RW), Oberflächenwasser (OW), Grundwasser (GW) und Leitungswasser (LW)

| Art      | Nutzung     | Fragestellung                                                                  | Parameter                                                                               | Analytische Methode                                                                |
|----------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| RW       |             | Herkunft                                                                       | Stabile Isotope, $^2\text{H}/^{18}\text{O}$                                             | IR-MS                                                                              |
| OFW + GW | Trinkwasser | Hygiene<br>Toxizität<br>Hydrochem. Charakteris.<br>Schadstoffeintrag           | Coliforme Keime, E-Coli<br>Leuchtbakterien<br>Anionen, Kationen<br>Pflanzenschutzmittel | IDEXX-Colilert®<br>Fertigmedium, MPN-Ausw.<br>IC /Merck Schnelltest<br>HPLC /GC-MS |
| OFW+ GW  | Bewässerung | Salzgehalt, SAR-Index                                                          | Anionen, Kationen<br>Leitfähigkeit, pH-Wert                                             | IC<br>Elektroden                                                                   |
| OFW + GW | allgemein   | Versalzungsursache                                                             | Stabile Isotope $^{18}\text{O}$                                                         | IR-MS                                                                              |
| GW       | allgemein   | Grundwasseralter                                                               | Radioakt. Isotope $^{14}\text{C}$                                                       | Flüssigszintillationszähler                                                        |
| LW       | Trinkwasser | Begleitstoffe bei der<br>Trinkwasserdesinfektion<br>Effizienz der Desinfektion | LHKW<br>Freies Chlor, ges. Chlor                                                        | GC<br>Merck Schnelltests                                                           |

Hydrologische und hydrogeologische Messungen: Die hydrologischen Untersuchungen zur Abflussmenge und zu Wasserspiegeln folgen generell den DVWK-Empfehlungen (DVWK 1991). Niederschlag wurde mit Niederschlagsmessern nach HELLMANN an zwei Lokalitäten gemessen. Abflussmengen wurden mit dem Tauchstab nach Jens bzw. dem Messflügel gemessen und mit den Wasserständen korreliert. Diese wurden an Skalen von Helfern im Gelände täglich abgelesen. Das Messnetz wurde von unserem Kooperationspartner DHME in den Jahren 1995-1997 aufgebaut, und von uns gemeinsam mit der DHME im Rahmen von WAVES weiterbetrieben. Wasserspiegelhöhen in Brunnen und Stauseen wurden mit Lichtlot (Einzelmessung) und Drucksonde mit Datenlogger (kontinuierliche Messungen) erfasst.

## 2.3 Ergebnisse (gegliedert nach räumlichen Ebenen)

### 2.3.1 Untersuchungsgebiete Picos und Tauá in Nordost-Brasilien

Das Fokusgebiet Picos liegt in Ost-Piauí in einer semi-ariden Klimazone. Es umfasst die Municipien (Landkreise) Picos, São João da Canabrava, Bocaina, Santana do Piauí sowie je nach Betrachtungsgegenstand die angrenzenden Gebieten. Die Stadt Picos liegt am Rio Guaribas, einem Zufluss des Rio Itaím und an einem überregional bedeutsamen Straßenkreuzungspunkt (CEPRO 1990, CEPRO 1992). Das Untersuchungsgebiet ist durch eine jährliche Regenperiode von Dezember bis April mit Niederschlägen im langjährigen Mittel von ca. 700 mm geprägt, denen eine mittlere jährliche Verdunstungsrate von 1900-2500 mm gegenübersteht (DHME-SEAAB 1997, CPRM 1993).

Geologisch befindet sich das Untersuchungsgebiet im südöstlichen Randbereich des sedimentären Parnaíba-Beckens. Die liegenden unterdevonischen Sandsteine der Serra Grande Formation [Ssg] bilden mit 100-200 m wasserdurchlässiger Mächtigkeit den Hauptaquifer, der

von der tonig-siltigen Pimenteiras Formation [Dp] überlagert wird. Darüber folgt die Cabeças-Formation [Dc], die ebenfalls einen guten Grundwasserleiter darstellt (CPRM 1993).

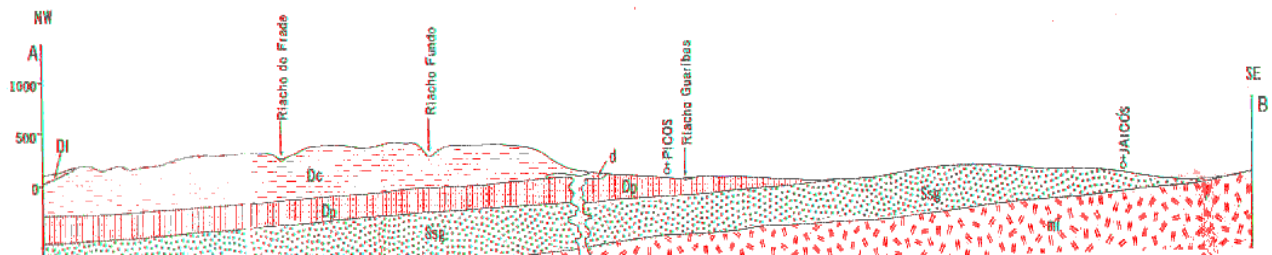


Abb. 1: NW-SE-Schnitt durch die geologischen Formationen bei Picos (BGR/SUDENE, 1976)

Das Gebiet ist charakterisiert durch das Fluss-System des Rio Guaribas. Die Zuflüsse sind aufgrund der langen Trockenzeiten nicht perennierend. 1987 wurde der Staudamm bei Bocaina im Oberlauf des Rio Guaribas fertiggestellt. Der Bocaina-Stausee zählt mit max.  $100 \times 10^6 \text{ m}^3$  Volumen zu den großen Stauseen Nordost-Brasiliens. Das Wasser des Stausees reguliert die Wasserführung des Rio Guaribas unterstromig auf eine Länge von etwa 40 km. Der Stausee selber wird nicht weiter genutzt. Das Flusswasser wird auf den 40 km Fließstrecke zur Bewässerung genutzt. Teilweise sehr altes Grundwasser (Hydroisotop 1996, Stute et al. 1995) aus dem Serra Grande Aquifer wird in großen Mengen zur Trinkwasserversorgung und zur Bewässerung gefördert (CPRM, 1993). Der Anschlussgrad an die öffentliche Wasserversorgung beträgt 48% in Picos, im ländlichen São João da Canabrava nur 19%. An unterschiedliche Entsorgungseinrichtungen sind ca. 46% der Bevölkerung angeschlossen jedoch besteht bisher keine Kläranlage (mündl. Mitt. Sekr. für Umweltfragen von Picos: Kläranlage in Picos geplant). Durch die Nutzung von Grundwasser und reguliertem Flusswasser kann im Talgebiet Bewässerungslandwirtschaft betrieben werden. Wasserrwirtschaftliche Aufgabenstellungen beziehen sich stark auf Fragen der Planung, Verteilung und weniger auf die Fragen der Qualität und einer nachhaltigen Wasserverfügbarkeit. Die wasserwirtschaftliche Planung ist somit ein Stichwort für eine Verbesserung der Situation in der Region Picos (Soares Filho 1997).

Das zweite von uns genauer untersuchte Fokusgebiet Tauá (entspricht dem Munizip Tauá mit ca. 50.000 Einwohnern) liegt im südwestlichen Teil des Bundesstaates Ceará ca. 200 km nord-östlich von Picos (Piauí) und ca. 300 km südlich der Landeshauptstadt Fortaleza. Im Gegensatz zur Referenzregion Picos hat in der Region Tauá die Pflanzenproduktion in wirtschaftlicher Hinsicht fast keine Bedeutung. Hier dominiert die sonst im Sertão übliche Viehzucht. Tauá liegt an der überregional wenig bedeutsamen Straße von Fortaleza nach Picos. Klimatisch liegt Tauá ebenfalls in der semi-ariden Zone mit einem langjährige Niederschlagsmittel von etwa 550 mm (CPRM 1998). Die Morphologie ist leicht hügelig auf einer Höhe von etwa 300 NN+m. Geologisch ist der Untergrund von Tauá relativ einfach aufgebaut durch präkambrische Granite, Gneise und Migmatite des kristallinen Basements. Darüber liegt im wesentlichen auf die Talauen beschränkt eine nur geringmächtige quartäre alluviale Überdeckung (Cavalcante et al. 1983).

Die Region gehört zum Einzugsgebiet des „Alto Jaguaribe“. Die Flüsse sind nicht perennierend. Im Munizip Tauá gibt es 5 größere Stauseen und eine nicht bekannte Zahl kleinerer Stauseen. Die größeren Stauseen sind der Trici ( $16 \times 10^6 \text{ m}^3$  max. Stauhöhe), der Favelas ( $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), der Várzea do Boi ( $52 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), der seit mehreren Jahren trockene Stausee Broco sowie der Stausee Forquilha II ( $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). Der langjährige zeitliche Verlauf der Füllvolumen der Stauseen in Abb. 2 gibt die tatsächliche Wasserverfügbarkeit durch Stauseen wieder.

Neben den jahreszeitlichen Schwankungen der Füllhöhen gibt es Perioden ohne wirksame Regenzeiten, die zu einer kontinuierlichen Abnahme der Füllvolumen bis zur völligen Entleerung

der Stauseen führen. Solche Perioden gab es 1992/93 und 1998/99. Die Füllvolumen der Stauseen lagen Ende 93 bei nur noch knapp 10% für den Várzea do Boi, Trici und Favelas und Ende 1998 waren der Trici und der Varzea do Boi sogar im Bereich der Totvolumen.

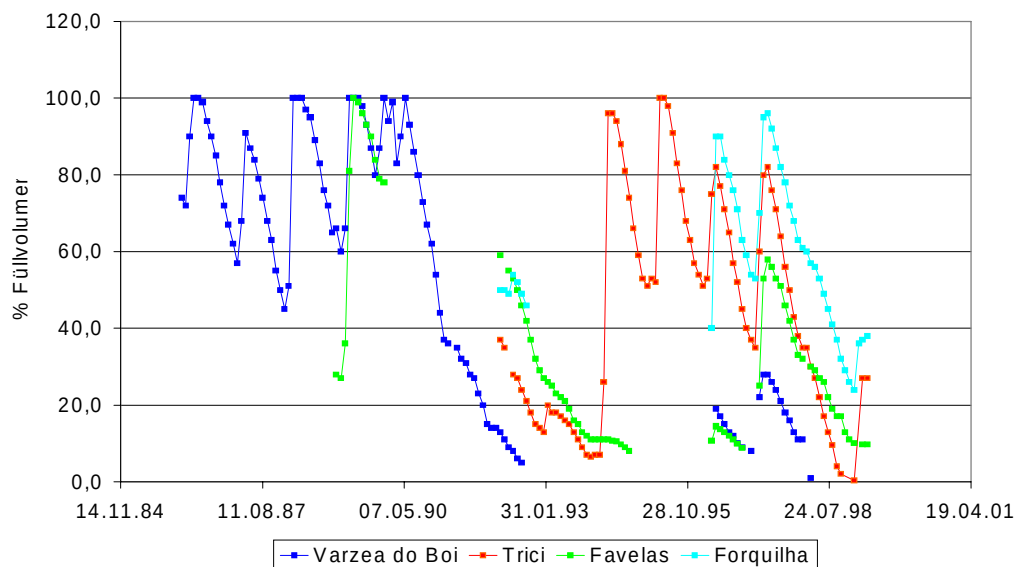


Abb. 2: Füllhöhen der vier großen Stauseen in der Fokusregion Tauá (Daten: COGERH 1999)

Grundwasser wird in Tauá durch Tiefbrunnen, die den kristallinen Kluftgrundwasserleiter erschließen und durch Flachbrunnen, die den Porengrundwasserleiter des Alluvium erschließen genutzt (CPRM 1998). Geringe Ergiebigkeit und der Salzgehalt des Wassers führt jedoch zu wesentlichen Nutzungseinschränkungen. Nach Auffassung der CPRM (1998) liegt dennoch im Grundwasser ein großes wasserwirtschaftliches Potential, welches teilweise aufgrund fehlender hydrogeologischer Kenntnisse nicht genutzt wird. So fehlen Untersuchungen zur Wasserverfügbarkeit des Alluviums, es fehlen regionale hydrogeologische Basisdaten zum Alluvium und zum Kristallin. Es gibt Überlegungen, salzhaltiges Wasser als Brauchwasser zu nutzen. Das würde die Wasserverfügbarkeit erhöhen. Insgesamt sieht die CPRM (1998) bei entsprechender wasserwirtschaftlicher Planung eine Verdoppelung der Grundwassernutzung als möglich an, was die Folgen der Dürrezeiten für die Menschen drastisch erleichtern würde.

### 2.3.2 Wasserverfügbarkeit im Fokusgebiet Picos

Die Untersuchung der Wasserbilanz, die Umsetzung in Modelle und die Simulation zukünftiger Entwicklungen auf Fokusgebietsebene erfolgt im Rahmen des modularen Ansatz WARIG (Abb. 3) für die Region Picos. WARIG ermöglicht den Abgleich mikro-, meso- und makroskaliger Modelle. Es dient dem Planungsmodell MOSDEL (AG Landschaftsökologie) als Modul der Wasserverfügbarkeit. Auswirkungen von Klimaänderungen können auf der Mesoskala differenziert dargestellt werden. WARIG wurde als gruppenübergreifender Ansatz von den AG's Wassermanagement und -ressourcen (federführend), Bodenkunde/Bodenwasserhaushalt, Landschaftsökologie sowie dem Departamento de Hídrometeorologia (DHME-SEAAAB), Teresina, aus jeweils angepassten Modell- bzw. Kalibrierungsblöcken (Modulen) aufgebaut. Die jeweiligen Modellergebnisse gehen als Randbedingungen in den nächsten Modellschritt ein.

Vor der Entwicklung dieses Ansatzes wurden verfügbare Niederschlags-Abflussmodelle gesichtet. Genauer geprüft wurden die Modelle NASIM (Hydrotec 1994) und GRM (WASY 1996). Das grundsätzliche Problem war in beiden Fällen, dass die vorliegenden Daten aus dem Fokusgebiet nur sehr unvollständig die erforderlichen Eingabeparameter der Modelle abdeckten (z.B. nur weniger Abflussmessungen im Bezug zur Gebietsgröße). Die Stärken beider Modelle,

eine komplexe Wassernutzungs- und Verteilungsstruktur darzustellen, ist demgegenüber im Fokusgebiet kein Betrachtungsgegenstand, da es keine komplexe Struktur gibt. Ein weiterer Punkt vor allem im Hinblick auf die bilaterale Zusammenarbeit ist die Tatsache, dass die Modelle teuer sind und während der Prüfungszeit 1997 nur in deutscher Sprache vorlagen. Eine Übertragung nach Brasilien wäre sehr erschwert worden bzw. unmöglich geworden. Das in Nordost-Brasilien entwickelte Abflußmodell MODHAC (Lanna & Schwarzbach 1988) benötigte ebenso wie die Ansätze zur Abflussberechnung von Billib (1997) und Sarmiento (1997) mehr Eingangsdaten, als diese im Untersuchungsraum flächig und kontinuierlich vorlagen. WARIG besteht aus einzelnen, frei oder kostengünstig verfügbaren Modulen, die teilweise über Arc-View© gekoppelt werden.

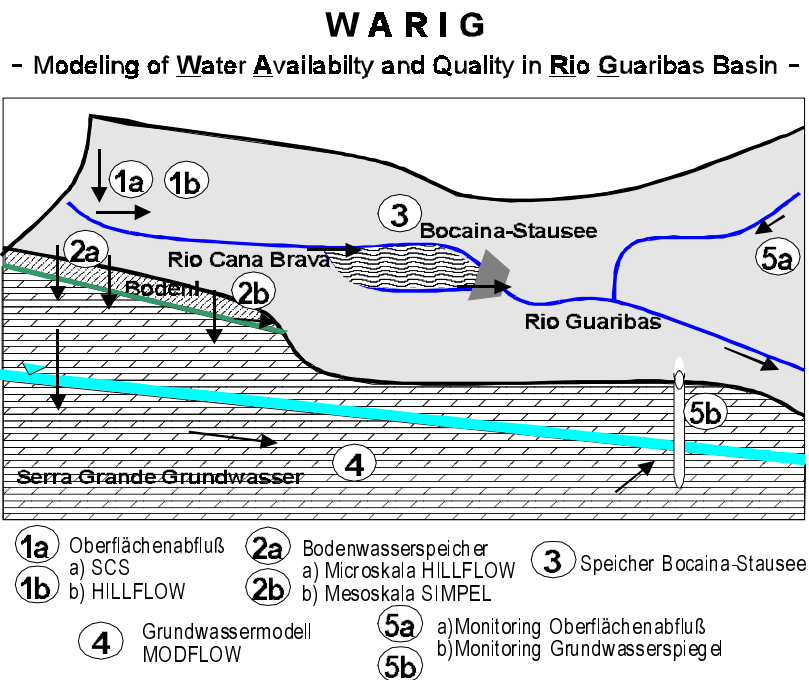


Abbildung 3: WARIG, Modulares Konzept zur Wasserhaushaltsbetrachtung des Raumes Picos

#### *Räumliche Niederschlagsauswertung*

Der Niederschlag, insbesondere in diesem durch lokale Starkniederschläge geprägten Gebiet, ist der Ursprung für jede räumlichen Differenzierung von Wasserbilanzen. Ein regionales Klimamodell besteht nicht, jedoch liegen aus dem Gebiet Daten von einigen Niederschlags-sammlern vor. Es wurde anhand der Daten von 14 Klimastationen (DHME 1998) versucht, Gesetzmäßigkeiten für unterschiedliche Niederschläge zum einen nach der geographischen Lage und zum anderen nach der Geländehöhe (NN+m) zu erarbeiten. Die Ergebnisse in Anhang 1 zeigen, dass derzeit keine Flächendifferenzierung bezüglich der Niederschläge möglich ist. Es gibt zwar Unterschiede zwischen den Stationen, die aber zufällig und nicht gerichtet sind. Sinnvolle Niederschlagsdaten für Flächen wie das Fokusgebiet können nicht zusammengestellt werden. Für die Kalibrierung der Oberflächenabfluss- und Bodenwasserhaushaltsmodellierung sind aber zeitlich festlegbare Beziehungen zwischen Niederschlag und Abfluss notwendig. Eine Niederschlags-Abflussbeziehung wurde anhand von Niederschlagsdaten und Wasserspiegelmessungen im Einzugsgebiet des Bocaina-Stausee abgeleitet.

#### *Bocaina-Stausee (Modul 3)*

Der von 1982-1985 vom Militär erbaute und von der SUDENE finanzierte Bocaina-Stausee stellt mit einer Fläche von 11 km<sup>2</sup> und einem maximalen Volumen von 106 Mio. m<sup>3</sup> Wasser einen Zwischenspeicher für ein Einzugsgebiet von 960 km<sup>2</sup> (Planungsunterlagen) dar. Geplant



waren eine Regulierung von jährlich etwa 24 Mio. m<sup>3</sup>. Dies entspricht einem kontinuierlichen Auslauf von etwa 0,76 m<sup>3</sup>/s, der den Rio Guaribas ganzjährig auf einer Strecke von 20-40 km fließen lässt. Entgegen den Planungen wird das aufgestaute Wasser bisher weder zu Trinkwasser- noch zu direkten Bewässerungszwecken genutzt, trotz geeigneter Wasserqualität. Der Stauseewasserspiegel und damit das Volumen wird mit einem Datenlogger gemessen (Anhang 2a). Er erlaubt so eine Quantifizierung von Oberflächenabflüssen, die den, an drei Mess-Stationen im bzw. am Rande des Einzugsgebietes gemessenen Niederschlägen, gegenüber gestellt werden können (Anhang 2b). Einzelne Niederschlagsereignisse korrelieren selten mit Wasserspiegelerhöhungen. Diese korrelieren jedoch mit Niederschlagsperioden, die in allen drei Stationen sichtbar sind. Zusätzlich zeigten erste SCS-Berechnungen, die mit den Daten von nur einem Niederschlagssammler den Abfluss des ganzen Einzugsgebietes berechneten, regelmäßig zu hohe Gesamtabflusswerte, die über der gemessenen Volumenänderung im Stausee lagen. Um, bezogen auf das Einzugsgebiet, zu angepassteren Niederschlagsdaten zu gelangen, wurden die bestehenden Daten ohne Flächenbezug gemittelt (Anhang 2c). Diese Daten sind in Ihren Spitzen geringer und für das Gesamtgebiet repräsentativer. Zur Ableitung einer Niederschlags-Abflussbeziehung wurden die Summen der Regenperioden (Anhang 2d) mit den Volumenveränderungen im Stausee korreliert (Anhang 2e): Neben einer generellen gewichteten Korrelation zwischen Niederschlag und Volumenerhöhung im See lassen sich auch eine Beziehung für kurzzeitige Starkniederschläge und eine für länger anhaltende, weniger intensive Regenfälle ableiten. Bei einer angenommenen Niederschlagshöhe von 10 mm ergeben sich in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität bei niedriger Intensität etwa 150.000 m<sup>3</sup> Abfluss bezogen auf das Gebiet, bei mittlerer Intensität etwa 200.000 m<sup>3</sup> und bei starker Intensität etwa 350.000 m<sup>3</sup>. Das bedeutet, dass dem Bocaina-Stausee in normalen Niederschlagsjahren mit 730 mm durchschnittlichem Gebietsniederschlag etwa  $15 \times 10^6$  m<sup>3</sup> zufließen, wobei jedoch während der Regenzeit von 5 Monaten etwa  $2 \times 10^6$  m<sup>3</sup> verdunsten und abfließen, so dass der Nettogewinn aus einer Regenzeit derzeit bei  $13 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/a (1999) liegt. Es kann festgestellt werden, dass der Bocaina-Stausee aktuell pro Jahr etwa nur 60 % der Wassermenge reguliert, für die er ausgelegt ist. Die Beziehung zwischen berechnetem Niederschlag und gemessenem Abfluss stellt die Basis für die Kalibrierung des Abflussmodelle dar.

#### *Oberflächenabfluss- und Bodenwasserhaushaltsmodellierung (Module 1a-b und 2a-b)*

Die Modellierung des Oberflächenabflusses erfolgt mit einem Verfahren des Soil Conservation Service (USDA 1972) [Modul 1a]. Die SCS-Ergebnisse zur Bodenwasserbildung gehen als flächenbezogene Daten in das Bodenwasserhaushaltsmodell SIMPEL (Hörmann 1996) [Modul 2a] ein. Die detaillierte Darstellung von SCS und SIMPEL erfolgt im Fachbericht der AG Landschaftsökologie. Das Modell SCS und das relativ einfache, aber gut flächenhaft einzusetzende Modell SIMPEL werden kalibriert durch die Anwendung des Modells HILLFLOW 1d (Bronstert 1994) [Module 2a und 2b] an 5 ausgewählten Standorte s. Anhang 3: 2 Hochflächenstandorte, 1 Standort im Randbereich der Chapadas und 2 Standorte im Hangbereich. Im Vergleich zu SIMPEL kann der Boden in HILLFLOW räumlich in beliebig viele Lagen (Horizonte) unterteilt werden. Es können Wassergehalt, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die Saugspannung für jedes Bodenelement/-lage berechnet werden. In den in Anhang 3 dargestellten Wasserhaushalts-Bilanzen nach der HILLFLOW-Simulation für einzelne Böden und verschiedene Vegetationstypen zeigen die beiden tiefgründigen Hochflächenböden (Anhang 3-1 und 3-2) wie erwartet keine laterale Flusskomponente, auch nicht, wenn Vegetation komplett fehlt. Oberflächenabfluss tritt nur im ungeschichteten, rein lehmig-tonigen Podzólico Vermelho Amarelo auf. Mit 17-18 % ist der Oberflächenabfluss unter den beiden Vegetationseinheiten Caatinga und Gras hoch, ohne Vegetation um 10 % höher.

Das auf Basis von detaillierteren Input-Bodenparametern arbeitende HILLFLOW berechnet den gesamten Nettoniederschlagsinput und kann so sowohl die Bodenwasserhaushaltsbilanz von

SIMPEL als auch den Oberflächenabfluss von SCS überprüfen. Zusätzlich wurde mit HILLFLOW der Anteil des Zwischenabflusses quantifiziert, der mit SCS und SIMPEL nicht berechnet wurde. Als Vergleichszeitraum wurde das hydrologische Jahr 1928/1929 (November-Oktober) der Klimastation Picos herangezogen, das mit einer Niederschlagsmenge von 764 mm dem langjährigen Mittel für Picos von 704 mm nahekommt. Die Häufigkeit der Niederschläge war relativ regelmäßig verteilt, die Intensität recht unterschiedlich. Die Ergebnisse der HILLFLOW-Modellierung ging in die Kalibrierung der beiden flächenhaften Modelle ein (Bericht der AG Landschaftsökologie).

Mit den vorläufig kalibrierten Modellen wurden Simulationen von trockenen und normalen Klimasituationen durchgeführt (Tab.3). Bei deutlich vermindertem Niederschlag (Simulation einer Klimaänderung) treten bezüglich Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung (Sickerung aus dem durchwurzelter Bodenraum) in etwa eine Halbierung der Fließraten ein. Regelnde Größe ist die (Evapo-)Transpiration über den Pflanzenbestand, die im Trockenjahr nur halb so hoch ist wie im Normaljahr. Wesentlicher Oberflächenabfluss entsteht in Abhängigkeit der Bodenvorfeuchte erst bei Niederschlagsintensitäten von größer als 20 mm/d.

Tab. 3: Ergebnisse zweier Modellläufe für das Einzugsgebiet des Bocaina-Stausees

| Simulationsjahr                             | 1941/42 Trockenjahr | 1928/29 durchschnittliches Jahr |
|---------------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Niederschlag                                | 428 mm              | 764 mm                          |
| Potenzielle Evapotranspiration              | 2.200 mm            | 1.929 mm                        |
| Aktuelle Evapotranspiration                 | 357 mm              | 633 mm                          |
| Oberflächenabfluss                          | 23 mm               | 40 mm                           |
| Seepage (Grundwasserneubildung + Interflow) | 42 mm               | 78 mm                           |

#### Grundwasserbilanzmodell (Modul 4)

Der Serra Grande Aquifer ist der wesentliche große Wasserspeicher der Region von Picos. Die schnelle Entwicklung der Stadt Picos der letzten Jahre ist unter anderem auch auf die einfache und ausreichende Verfügbarkeit von qualitativ einwandfreiem Wasser zurückzuführen. Die Förderung von Grundwasser für Trinkwasser und Bewässerung erfolgt weitgehend unkontrolliert und weist in den letzten Jahren einen gewaltigen Anstieg auf. Wurden bei der Datenerhebung der CPRM zu Beginn der 90er Jahre noch 400 Brunnen im Rio Guaribas Becken gezählt (CPRM 1993), muss zum Ende der 90er Jahre schon von mindestens 800 Brunnen ausgegangen werden (mündl. Mitteilung Secretario de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Picos 1999). Die sehr starke Nutzung des Grundwasserleiters zeigt sich durch die Absenkung des Wasserspiegels im Raum von Picos in den letzten Jahrzehnten (AGESPISA, mündl. Mitteilung). Ein regelmäßiges Monitoring des Grundwasserspiegels findet allerdings nicht statt. Aus der intensiven Nutzung des Grundwassers leiten sich die mit dem Modell zu bearbeitenden Fragen ab: **wie viel** Grundwasser kann **wo** nachhaltig gefördert werden und wie ändert sich dieses Potential in Abhängigkeit veränderter Randbedingungen in der Zukunft?

Das Modellgebiet umfasst alle wesentlichen hydrogeologischen Einheiten ist jedoch mit 60 x 80 km etwas kleiner als das WARIG-Gesamtgebiet. Für die Erstellung des Grundwassermodells wurde, neben eigenen Daten, Daten aus der Literatur verwendet (BRG/SUDENE 1976, CPRM 1993, Fröhlich et al. 1987). Der aus Wasserspiegelangaben (z.B. aus Bohrberichten) entwickelte Grundwassergleichenplan in Abb. 4 zeigt eindeutig, dass der Rio Guaribas, der in weiten Teilen des Untersuchungsgebiet im Bereich der Pimenteiras Formation fließt, für das Untersuchungsgebiet die Vorflut bildet. Es muß berücksichtigt werden, dass die Wasserspiegelangaben nur näherungsweise stimmen, da keine Höheneinmessungen vorliegen.

An der Basis des Cabeça-Grundwasserleiter treten Quellen auf, die teilweise ganzjährig dem Rio Guaribas zufließen. Der freie Wasserspiegel im Cabeças Aquifer liegt über dem gespann-

ten Wasserspiegel des Serra Grande Aquifer, so dass es zu einer Sickerung in dieser Richtung kommt. Der Serra Grande Aquifer ist im Bereich des Rio Guaribas in weiten Teilen gespannt, so dass es hier zu einem Übertritt von Serra Grande Wasser in die Talauen kommt. Direkte Grundwasserneubildung durch versickernden Niederschlag erfolgt im Cabeças Aquifer und im frei zu Tage tretenden Serra Grande Aquifer. Vertikal sickert aus dem oberen Cabeças-Stockwerk (Leckage-Prinzip) Wasser dem Serra Grande zu. Ein lateraler Grundwasserabstrom zu den Vorflutern findet in beiden Stockwerken statt. Grundwasserentnahmen finden im wesentlichen aus dem Serra Grande Aquifer statt.

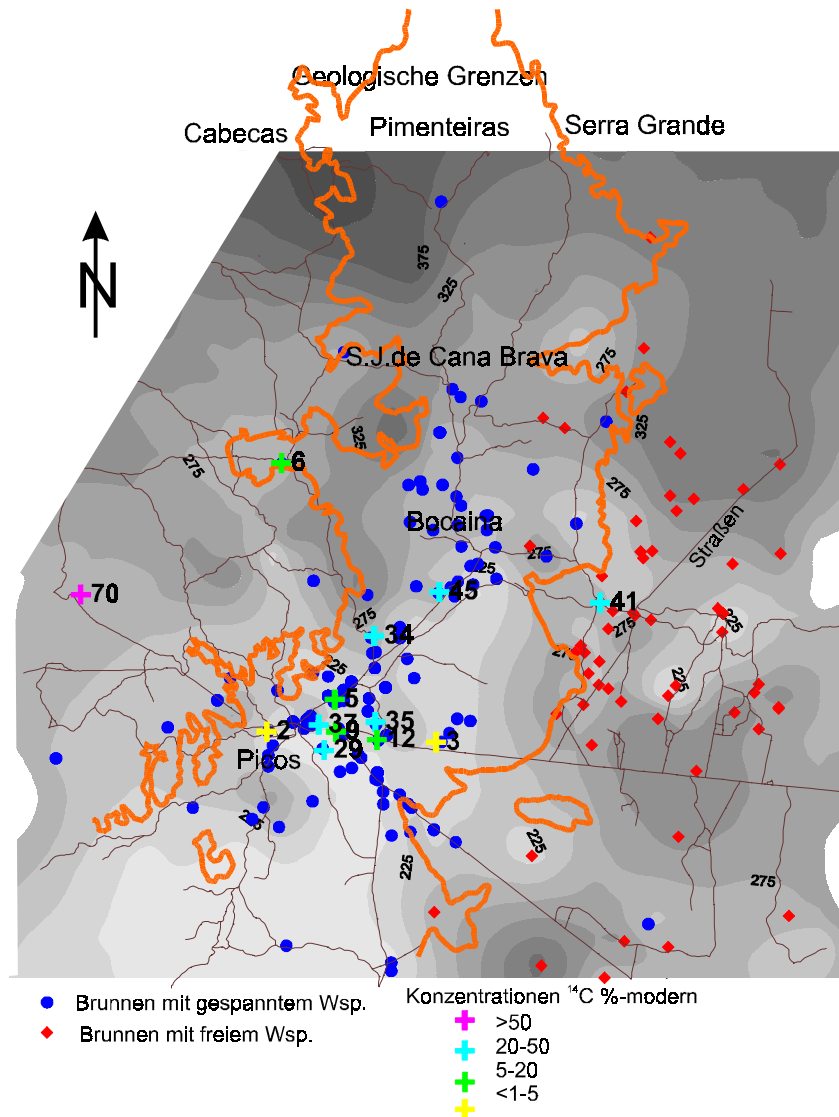


Abbildung 4: Wasserspiegel im Untersuchungsgebiet Picos mit verfügbaren Brunnen (Daten CPRM 1993), mit geologischen Grenzen und Kohlenstoff-14-Ergebnissen an Grundwässern verschiedener Entnahmestockwerke

Die Untersuchung von Grundwasser mit der Kohlenstoff-14-Methode sollte helfen, dass hydrogeologische System besser zu verstehen und sollte das Modell kalibrieren (z.B. Verhagen et al. 1999). Die in Abb. 4 dargestellten Ergebnisse sind hierzu jedoch nicht eindeutig zu nutzen. Sie zeigen vielmehr, wie stark das tiefe Grundwasser heute schon durch die unkontrollierten Bohrungen und Entnahmen gestört ist. Im Stadtgebiet von Picos liegen Grundwässer eng beieinander, die einen Altersunterschied von mehreren Jahrtausenden aufweisen. Das kann nur so erklärt werden, dass die starke Absenkung in diesem Raum zu einer Umkehrung der Fließver-

hältnisse geführt hat: Serra Grande Wasser steigt nicht mehr auf, sondern junges Wasser sickert nach unten und vermischt sich dort mit altem Wasser. Dieser Vorgang wird lokal noch verstärkt werden durch mangelhaft abgesperrte Bohrungen die so eine künstliche Leckage darstellen. Die in nicht intensiv genutzten Außenbezirken beprobten Brunnen lassen sich interpretieren: im östlichen Ausstrich des Serra Grande ist das Wasser einige tausend Jahre alt, während es im überdeckten Serra Grande im Westen > 20.000 Jahre alt ist. Der an einer Wasserpombe aus dem Cabeças-Aquifer gemessene Wert im Westen mit 70 %modern zeigt ein Wasser mit Altern im Bereich von 2000 Jahren. Diese Vorstellung entspricht dem entwickelten hydrogeologischen Modell in Abb. 5, welches als Grundlage für die numerische Berechnung entwickelt wurde.

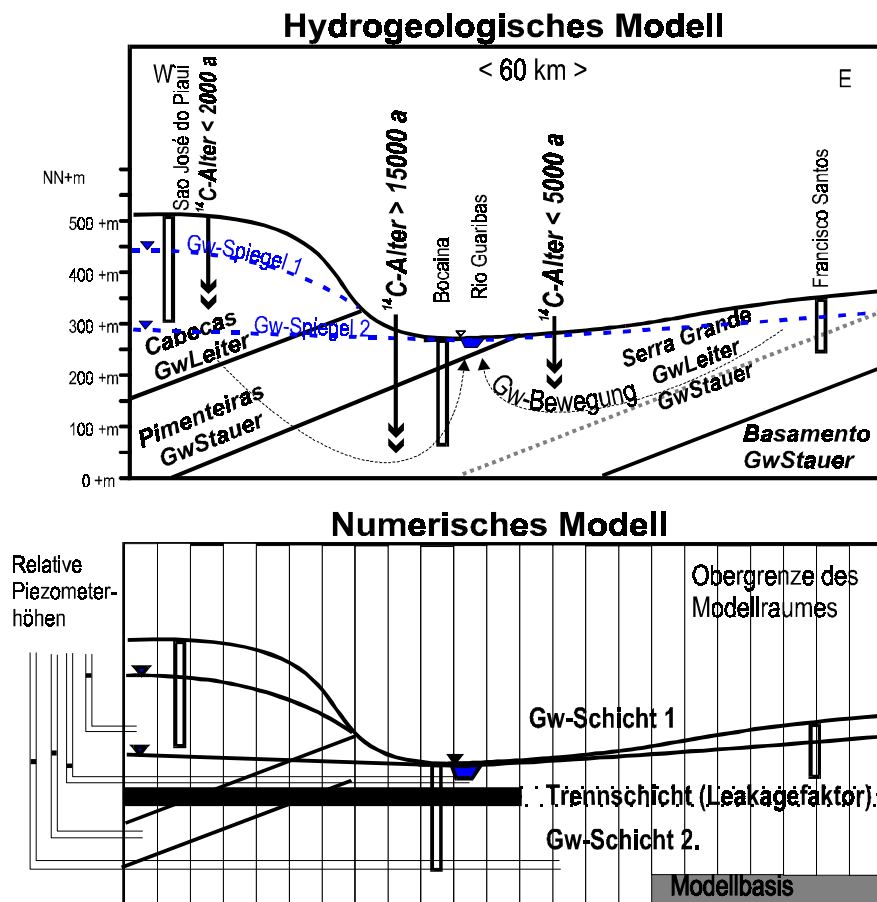


Abb. 5: oben) Schemat. hydrogeologischer Profilschnitt West-Ost unter Berücksichtigung ausgewählter  $^{14}\text{C}$ -Ergebnisse ;  
unten) Modellaufbau im Profilschnitt: Gliederung des Untersuchungsgebietes in zwei Grundwasserstockwerke:

- Oberes Stockwerk: Cabeças Aquifer ~ Modellschicht 1
- Trennhorizont: Pimenteiras ~ Leckagedefinition
- Tiefes Stockwerk: Serra Grande ~ Modellschicht 2

Der im Untersuchungsgebiet bis zu 400 m mächtige Serra Grande Sandstein ist im unteren Bereich weitgehend silifiziert und hydraulisch undurchlässig. Die oberen 200 m werden als Grundwasserleiter definiert. Die geologischen Einheiten fallen mit 10m/1km nach Westen ein (CPRM 1993). Der Cabeças Aquifer bildet mit steilen Hängen westlich des Rio Guaribas die Hochplateaus, danach folgen nach Osten die Talgebiete des Rio Guaribas und seiner Zuflüsse die im Bereich des Pimenteirasausstreichens liegen und weiter nach Osten bildet der zu Tage tretende Serra Grande einen nur mäßig ausgebildeten Hangaufstieg. Lokal von erheblicher hydrogeologischer Bedeutung, jedoch im Rahmen einer regionalen Bilanzbetrachtung ver-

nachlässigbar sind jurazeitliche Diabasintrusionen (s. Abbildung Geologie, Kap. 2.3.1). Ebenso werden, für eine lokale Wasserversorgung oder Bewässerung durchaus interessante, alluviale Deckschichten in den Tälern oder Flugsande auf den Hochlagen vernachlässigt. Tektonische Schwächezonen sind nicht in einer hinreichende Qualität bekannt, um sie in die hydrogeologischen Modellvorstellung einzubauen.

Das Bilanzmodell ist ein 2-schichtiges regionales Grundwasserströmungsmodell (stationäres Modell). Beide Grundwasserschichten sind über eine Leakagefunktion mit einander verbunden, die entsprechend dem hydraulischen Gradienten zwischen beiden Schichten Wasser austauscht. Dies gilt jedoch nur für den westlichen Teil des Modellgebietes. Da im östlichen Teil des Modellgebietes nur der Serra Grande als zu Tage tretender Aquifer verbreitet ist, wird hier eine Verschmelzung beider Aquifere durchgeführt, indem die Leakagefunktion geöffnet wird für einen freien Austausch. Da beide Aquifere sich in den hydraulischen Eigenschaften weitgehend entsprechen (CPRM 1993), ist keine Differenzierung notwendig. Die Tatsache, dass der Serra Grande Aquifer zur Tiefe hin an Durchlässigkeit verliert, macht sich bei den Brunnen im Westen des Modellgebietes bemerkbar. Die Aquiferqualität lässt dort nach. Im Modell wird dies berücksichtigt mit einer verringerten hydraulische Leitfähigkeit.

Modellaufbau und Randbedingungen:

- Vertikaler Modellaufbau: 1. Schicht: Cabeças Aquifer ( $k_f=1 \cdot 10^{-5}$  m/s, Porosität 10%), Trennschicht: Pimenteiras ( $k_f=5 \cdot 10^{-9}$  m/s), 2. Schicht: Serra Grande Aquifer ( $k_f=2 \cdot 10^{-5}$  m/s östliche Hälfte,  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s westliche Hälfte, Porosität 10%)
- Ansatz realitätsnaher Schichtgeometrien (gemäß BGR/SUDENE 1976)
- Unterer Teil des Serra Grande als dichte Modellbasis (Serra Grande Aquifer 200 m mächtig)
- Festpotential: Westlicher Rand Schicht 1 entsprechend der Wasserspiegellhöhen im Cabeças-Aquifer, Östlicher Rand Schicht 1 entsprechend den Wasserspiegellhöhen im Serra Grande, Südlicher Bereich Rio Guaribas Schicht 1 entsprechend der Wasserspiegellhöhen im Serra Grande, Rechter Rand Schicht 2 entsprechend der Wasserspiegellhöhen im Serra Grande.
- Räumlich differenzierte Grundwasserneubildung im Oberen Stockwerk gemäß SIMPEL (noch in Entwicklung, Vorversuche)
- Ansatz abgeschätzter Brunnenentnahmen gemäß den Daten der CPRM (1993) (noch in Entwicklung)
- Modelltechnische Angaben: Stationäre Strömungsberechnung nach der Finite-Differenzen-Methode, Programm MODFLOW, Vers. 3.0 USGS mit Erweiterung, 4800 Modellzellen, 1000 m Seitenlänge (McDonald & Harbaugh 1988, Chiang & Kinzelbach 1993)

Im ersten Näherungsschritt der Modelleichung erfolgte für beide Modellschichten die Anpassung der berechneten Piezometerhöhen an die bekannten Grundwasserstände. Da Stichtagsmessungen nicht vorliegen und vor allem viele Brunnen nicht nivelliert sind, ist die Anpassung nur relativ grob. In Anhang 4a ist für den Serra Grande Aquifer die Wasserspiegelmodellierung gemeinsam mit der Interpretation der Wasserspiegeldaten der CPRM dargestellt. Die Grundwasserneubildung für das Gesamtgebiet ist der Schlüsselparameter. Realistisch sind Neubildungsraten zwischen 10 (Hydroisotop 1996, Fröhlich et al. 1987 ) und 30 mm (Berechnungen mit SIMPEL FB Landschaftsökologie). Die erfolgte stationäre Modellierung stellt die Bilanzbetrachtung an den Festpotentialpunkten (westliche und östliche Modellränder und Fluß) in den Mittelpunkt (Tabelle 4). Ein großer Teil des Wassers fließt über die Modellränder zu bzw. ab, was ein bisher nicht befriedigend gelöstes Modellproblem dar. Es entsteht aufgrund der Kenntnisse der Hydrogeologie, da Wasserscheiden und genauen NN+m –Höhen nicht bekannt sind. In erster Abschätzung kann man jedoch davon ausgehen, daß sich in den Modellläufen mit 10 mm Neubildung die Zu- und Abströme über die Rändern weitgehend ausgleichen und somit für die Bilanzaussagen weniger Bedeutung besitzen. Es ist anzunehmen, dass Wasser, welches dem Rio Guaribas aus dem Liegenden zuströmt, zu großen Teilen im Bereich des Flussbettes verdunstet und so keinen Abfluß bildet. Im Falle der hohen Neubildungsrate würden dem Rio Guaribas 2,5 m³/s zufließen, also die 5fache Menge des heutigen Fließens. Diese Wassermenge könnte nicht komplett verdunsten. Eine Grundwasserneubildungsrate von 30 mm erscheint

demnach nicht wahrscheinlich. Nimmt man eine Grundwasserneubildung von 10 mm an, so ergibt sich bei einem Zufluss in den Talbereich des Rio Guaribas von 1,4 m<sup>3</sup>/s eine wahrscheinlichere Variante. Es muss berücksichtigt werden, dass alle Abflussbeobachtungen des Flusses aus Zeiten stammen, in denen die starken Entnahmen von Grundwasser schon stattfanden, also das nach oben strömende Wasser schon abgepumpt wurde und teilweise auch die Strömungsrichtung umgekehrt ist. Es ist aus dem Vergleich der beiden Grundwasserneubildungsraten auch ersichtlich, dass sich das Fließbild generell nicht ändert, jedoch die Fließdynamik bei geringerem Neubildung und damit geringerem Gefälle deutlich nachlässt.

Tab. 4: Grundwasserbilanzen aus dem Grundwassermodell für verschiedene wasserwirtschaftliche Situationen.

| Simulationen                              | 30 mm Niederschlag ohne Brunnen | 10 mm N. o.Br.          | 10 mm N. mit 450 L/s Gesamtentnahme |
|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Grundwasserneubildung                     | +4,74 m <sup>3</sup> /s         | +1,52 m <sup>3</sup> /s | +1,52 m <sup>3</sup> /s             |
| Abfluss/Zufluss                           |                                 |                         |                                     |
| Linker Rand, Layer 1 Cabeças (Westen)     | -0,4 m <sup>3</sup> /s          | +0,53 m <sup>3</sup> /s | +0,56 m <sup>3</sup> /s             |
| Rechter Rand Layer 1 Cabeças (Osten)      | -0,86 m <sup>3</sup> /s         | -0,23 m <sup>3</sup> /s | -0,21 m <sup>3</sup> /s             |
| Rechter Rand Layer 2 Serra Grande (Osten) | -0,92 m <sup>3</sup> /s         | -0,36 m <sup>3</sup> /s | -0,34 m <sup>3</sup> /s             |
| Rio Guaribas                              | -2,55 m <sup>3</sup> /s         | -1,44 m <sup>3</sup> /s | -1,06 m <sup>3</sup> /s             |
| Brunnen                                   | -                               | -                       | -0,45 m <sup>3</sup> /s             |

In der Tabelle 4 sind die jeweiligen Bilanzen dargestellt. In Anhang 4b wird der Fall mit 10 mm Grundwasserneubildung mit einer Entnahme von 240 L/s aus 10 Brunnen im Stadtgebiet und 210 L/s aus 10 Brunnen in den südlich und nördlich anschließenden Talgebieten gerechnet. Die Entnahmen wurden aus Daten für die Trinkwasserversorgung durch die AGESPISA sowie mit Daten der CPRM (1993) zur Brunnenanzahl und Leistung abgeleitet, wobei die rund 500 Brunnen schematisiert einbezogen werden müssen. Die Darstellung zeigt, dass die Entnahme lokal zu einer Absenkung des Wasserspiegels von etwa 25 m führt, was größenordnungsmäßig den Absenkungen entspricht, die in Gesprächen in Picos genannt werden. Gemessene Absenkungen liegen nicht vor. Regional ändert sich das Fließverhalten kaum. Die Randabflüsse nehmen deutlich ab. Nur der Cabeças-Aquifer müsste relativ viel Wasser aus dem westlichen Randzustrom erhalten, was nicht wahrscheinlich ist und im Modell noch überarbeitet werden muss. Die Entnahmen durch Brunnen machen sich in den Bilanzen deutlicher bemerkbar als in den Grundwassergleichplänen. Die Entnahmen im Flusstal gehen im wesentlichen auf Kosten des Zustromes in den Rio Guaribas. Das entspricht der o.g. aktuellen Situation besser, aktuell hat der Zustrom von liegendem Wasser zum Fluss deutlich nachgelassen aufgrund der Entnahmen oder findet nur noch lokal.

Die Schlußfolgerung der Modellierung ist, dass die Entnahmen im Raum Picos Wasser nutzen, welches dem Fluss zufließt und dort zu großen Teilen verdunsten würde. Welcher ökologische Schaden dadurch folgt ist nicht bekannt. Es wird aber eine Ressource genutzt, die im anderen Falle für eine geplante Nutzung weitgehend verloren gehen würde. Das Modell muss an einigen Stellen, z.B. an den Rändern und im Bereich der Leakagefunktion, noch verfeinert werden und es ist noch zu wenig kalibriert, es zeigt jedoch erstmals eine Bilanzbetrachtung als Planungsgrundlage die über Abschätzungen hinausgehen. Die fehlenden Punkte werden in der Restlaufzeit der ersten Phase bearbeitet werden.

### Monitoring Modul 5

Die Abflussmessungen an 10 Mess-Stellen am Rio Guaribas und seinen Zuflüssen werden seit dem Frühjahr 1999 gemeinsam mit Kollegen der DHME-SEEAB Teresina durchgeführt. Abflüsse entstehen in den Zuflüssen nur in der Regenzeit. Im Rio Guaribas fließt unterhalb des Bo-

caina-Stausees auf einer Länge von 20-40 km je nach Stausee-Auslass ganzjährig Wasser. Derzeit laufen die Abflussmessungen noch, so dass eine endgültige Auswertung erst in der Restlaufzeit der 1. Phase möglich ist. Die Mess-Stelle Angical, der letzten Mess-Stelle des Rio Guaribas Einzugsgebietes am südlichen Rand des Munizip Picos, wird in der Anhang 5a-c mit Ergebnissen zur Abflussmenge und zum Abflussverhalten dargestellt. Der Abfluss bei Angical beschränkt sich auf die Monate Dezember-Mai, erreicht 1999 Spitzen von 50 m<sup>3</sup>/s und lässt einen Gesamtabfluss von 33\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a berechnen. In einem gegrabenen Brunnen „Vigia Well 1“ etwa 200 m entfernt vom Rio Guaribas auf der Höhe der Mess-Stelle Angical wurde während der Regenzeit 1998 eine kontinuierliche Wasserstandsmessung durchgeführt um den Kontakt zwischen Talaue und Fluss zu zeigen (Anhang 5b). Der Wasserspiegel steigt zum Ende der Regenzeit um fast 5 Meter an, während er in der Trockenzeit weitgehend konstant bleibt. Der konstante Wasserspiegel spricht für die o.g. Theorie, daß ein konstantes hydraulisches Potential durch liegende Grundwässer den Talaquifer beeinflusst. Die 5 Meter Erhöhung stehen nicht im direkten Zusammenhang zu hohen Wasserständen im Fluss sondern scheinen aus Randzuflüssen in die Aue zu resultieren, die dort gestaut werden und langsam an den Fluss abgegeben werden. Der Wasserspiegel im Fluss reagiert jeweils nur kurz auf höhere Wasserspiegel. Der Vergleich mit dem Wasserspiegel im Bocaina-Stausee zeigt, dass alle drei Systeme auf Regenperioden reagieren. Der Fluss reagiert nur kurzzeitig, während der Wasserspiegel in der Talaue ähnlich dem im Bocaina-Stausee ein Reservoir darstellt. Innerhalb von 4 Monaten verliert der Wasserspiegel in der Talaue die Aufhöhung wieder, vermutlich durch Ausfluss in Richtung Rio Guaribas. Während dieser 4 Monate wäre eine stärkere Nutzung möglich und sinnvoll.

### 2.3.3 Wassermanagement, Wasserversorgungsstruktur

Die Regeln der Wassergesetzgebung in Brasilien (Wassergesetz 9.433 vom 8.1.1997) müssen in den jeweiligen Bundesstaaten umgesetzt werden. Das Gesetz gewährleistet allen Zugang zu Wasser und kontrolliert die Qualität und Quantität der Ressource. In Ceará koordiniert das Wasserministerium SRH die Institutionen, die für unterschiedliche Aspekte des Wassermanagements zuständig sind. In Piauí läuft der Prozess des Aufbaues einer eigenen wasserwirtschaftlichen Gesetzgebung (DHME-SEAAB 1997). Basis der Planungen ist die Aufteilung des Landes nach Einzugsgebieten, in denen wasserwirtschaftliche Rahmenpläne als Grundlage für den Aufbau einer Versorgungsstruktur entwickelt werden. Beispielregion ist der Rio Guaribas in der WAVES-Fokusregion Picos. Die Entwicklung eines integrierten Verwaltungssystems wird eng an die vorhandenen Verwaltungs- und Regelstrukturen angelehnt. Im Rahmen des Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) wurden die wasserwirtschaftlichen Ziele formuliert, die derzeit in Zusammenarbeit mit einem „Comite da Bacia do Guaribas“ umgesetzt werden: Bürgermeister und/oder Repräsentanten der betroffenen Munizipien. Forschungseinrichtungen, hierzu kann auch WAVES gezählt werden, können beratend tätig sein. In der Praxis wirkt sich die gesetzlichen Regelungen, dass Wasser in einem von einer Bundesbehörde erstellten Staudamm dem Bundesstaat gehört, das Wasser im Fluss davor und danach jedoch dem Land, so aus, dass am Bocaina-Stausee bei Picos unterschiedliche Vorstellungen eine Nutzung bisher verhinderten.

Die Analyse der Wasserversorgungsstruktur wurde mit Unterstützung unserer brasilianischen Partner (UECE, UFC, FNS und DHME) sowie dem FB Betriebs- und Regionalökonomie (Fragenkatalog) durchgeführt. Die Wasserversorgungsstruktur stellt sich heterogen dar. Es konnte eine direkte Verbindung der Art der Wasserversorgung mit der Trinkwasserqualität festgestellt werden:

*Städte* wie Picos in Piauí (groß >50.000 Einwohner) oder Tauá in Ceará (klein > 5.000 Einwohner) werden von einer Wasserversorgungsgesellschaft (AGESPISA bzw. CAGECE) mit Trink-

wasser über ein Leitungsnetz versorgt. Die meisten Haushalte verfügen über Hausanschlüsse mit Wasseruhren (30-50 %). Die Kosten für 10 m<sup>3</sup> Wasser liegen bei etwa R\$ 5 in Piauí und R\$ 3 in Ceará (1998). Die Bevölkerung in Außenbezirken ohne Hausanschlüsse erhalten über an das Leitungsnetz angeschlossene öffentliche Wasserstellen Trinkwasser, dessen Kosten die Gemeinde trägt. Die öffentliche Wasserversorgung von 95 % der urbanen Räume in Piauí erfolgt über Grundwasserbrunnen der AGESPISA.

Als *Ortschaften in ruralen Räumen* (500-5000 Einwohnern) werden z.B. die Muniziphauptorte (Kreisstädte) Bocaina, São João da Cana Brava oder Santo Antônio de Lisboa aber auch zentrale Siedlungen wie São Luiz do Piauí (Munizip Cana Brava) im Fokusgebiet Picos betrachtet. Die von uns besuchten Siedlungen in Piauí besitzen eine zentrale Wasserversorgung mit Tiefbrunnen, an die die meisten Haushalte direkt angeschlossen sind. Die Kontrolle der Wasserqualität und der abgegebenen Wassermenge erfolgt nicht oder sporadisch. Eine unregelmäßige (z.T. vierteljährlich, z.T. dreijährig) Desinfektion des Versorgungsnetzes wird durchgeführt. Die Kosten der Wasserversorgung liegen bei einer Versorgung durch die AGESPISA bei den o.g. Preisen von R\$ 5 / 10 m<sup>3</sup> (DM 5).

*Siedlungen in ruralen Räumen* mit wenigen 10 bis einigen 100 Einwohnern wie z.B. Angical oder Alegro dos Morenos südlich von Picos verfügen über öffentliche Wasserstellen: Brunnen, die mit einer Pumpe (Windrad) und einem Hochbehälter ausgestattet sind. Das Wasser wird kostenlos jedoch ohne qualitative oder quantitative Kontrolle zur Verfügung gestellt. Aufgrund mangelnden Schutzes gegen Verunreinigungen und fehlender Desinfektionen sind mikrobielle Qualitätsprobleme festzustellen. Häufig würde schon die Installation eines Metallhahnes anstelle des Holzstopfens im Hochbehälter einen positiven Effekt bewirken.

*Privatbrunnen:* Viele der Bauern im Fokusgebiet Picos, aber auch im Fokusgebiet Tauá, besitzen einen eigenen Brunnen der meist 60 – 150 m tief ist (in Tauá flacher) zur Trink- und Brauchwasserversorgung des Eigentümers, häufig auch der Nachbarn. Je nach Möglichkeiten der Besitzer sind die Häuser über Leitungen mit dem Brunnen verbunden. Der Bewässerung der Felder ist häufig ein kleiner Swimmingpool als Vorratsbehälter vorgeschaltet. Die Wasserqualität und -menge werden nicht regelmäßig kontrolliert.

*Andere Trinkwasserquellen:* Zahlenmäßig wenige Menschen versorgen sich mit Flusswasser oder Stauseewasser direkt oder mit Wasser aus im Flussbett gegrabenen Löchern. In abgelegenen Gebieten, während der 1998 Dürre auch Städte wie Tauá, werden Haushalte mit Tankwagen beliefert, wobei die Trinkwasserqualität von der Güte der Wasserquelle und der Sorgfalt des Lieferanten abhängt.

Aus der Korrelation der Versorgungsstruktur mit der hygienischen Wasserqualität lässt sich schließen, dass die Wasserversorgung in den Städten gut ist, in den kleineren Ortschaften befriedigend und auf dem Lande vor allem unter Berücksichtigung der hygienischen Bedingungen an vielen öffentlichen Wasserstellen unbefriedigend. Bei privaten Brunnen ist der Besitzer verantwortlich, wobei häufig eine gute Wasserqualität angetroffen wurde. Für eine mögliche Hochskalierung der Qualitäts- und Versorgungsergebnisse wurde eine Wasserstrukturanalyse durchgeführt. Wesentliche zu berücksichtigende Kriterien sind dabei: Eigentümer der Wasserversorgung, Wasserquelle, Art des Versorgungssystems, Wasseraufbereitung, Qualitätskontrolle und Wasserpreis.

## 2.3.4 Wasserqualität

*Wasserqualität: Kontaminationsquellen und Bewertungskriterien*



Die hydrochemische Wasserqualität in Piauí und Ceará ist im wesentlichen geogen geprägt. Schadstoffimmissionen liegen nur punktuell (Landwirtschaft, Müll, Abwasser) vor. Industrieabwässer spielen mengenmäßig keine Bedeutung, können lokal aber zu erheblichen Problemen führen (z.B. Fortaleza). Zur Charakterisierung und Beschreibung der Rohwasserqualität werden deshalb die Hauptanionen und -kationen, N-haltige Komponenten sowie Werte für die physikalischen Parameter (pH, spezifische elektrische Leitfähigkeit) bestimmt. In ausgewählten Fällen wurden Pestizide untersucht. Um zu einer ersten Einschätzung einer möglichen Toxizität im Flußwasser unterhalb der Stadt Picos zu kommen wurden Leuchtbakterientests durchgeführt.

Die Wasserqualität wird im Hinblick auf die Nutzbarkeit als Trinkwasser und als Wasser für die Bewässerung bewertet. Für die Trinkwassernutzung wird sowohl die hygienische als auch die hydrochemische Beschaffenheit der Grund- und Oberflächenwässer beurteilt, wobei die Priorität auf der hygienischen Beschaffenheit liegt. Durch unsere Arbeitsgruppe wurde erstmalig ein breit angelegtes mikrobiologisches Untersuchungsprogramm (140 Proben) der Wässer im Fokusgebiet Picos durchgeführt. In Tauá wurde mit dem Programm begonnen. Als Parameter wurden die fäkalen Indikatororganismen *Escherichia coli* und coliforme Keime herangezogen, die auch Indikatoren für mögliche pathogene Keime sind und die am besten geeignet sind die hygienische Qualität von Wasser zu bestimmen. *E.Coli* ist hierbei von allen Parametern der spezifischste (Moe et al. 1991). Deshalb wird das Vorhandensein stärker gewertet, als das der coliformen Keime. Zunächst wird nur der qualitative Nachweis für eine Beurteilung herangezogen. Als Beurteilungskriterien werden die von der WHO in den „Guidelines for drinking Water Quality“ niedergelegten Richtwerte sowie die Höchstkonzentrationen für Trinkwasser gemäß EG-Richtlinie verwendet. Für den Bewässerungslandbau wurde für die Grund- und Oberflächenwässer eine Klassifizierung nach dem US-Salinitätsdiagramm durchgeführt. Grundlage hierfür sind der SAR-Index, der über die Kationen Na, Ca und Mg erfaßt wird sowie die Leitfähigkeit (Rehm 1990)

#### *Wasserqualität Grund- und Oberflächenwässer*

Hinsichtlich ihrer hydrochemischen Zusammensetzung lassen sich die Wässer im Fokusgebiet Picos zu 60 % als überwiegend hydrogencarbonatische alkalische (Na-, K-) Wässer bezeichnen. 26 % werden als erdalkalische (Ca-, Mg-) , überwiegend hydrogencarbonatische Wässer mit erhöhtem Alkaligehalt eingestuft. Die untersuchten Wässer sind gemäß ihrer chemischen Inhaltsstoffe für die Trinkwassernutzung geeignet. Die untersuchten Wässer zeigen eine relativ geringe Gesamtmineralisation mit Werten für die spez. elektr. Leitfähigkeit von 100 bis 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , so daß trotz der Alkali-Gehalte keine wesentliche Einschränkung für die landwirtschaftliche Nutzung besteht (siehe SAR-Index in Anhang 6). Nur Grundwässer der Serra Grande-Formation, die durch Wasser aus der Pimenteiras-Formation beeinflusst sind, zeigen einen hohen SAR-Index und sind nur eingeschränkt nutzbar. Eine Beeinträchtigung durch Pestizide (bisher 3 Proben analysiert) war nicht nachweisbar.

In Tauá sind allerdings viele Grundwässer aufgrund hoher Salzgehalte, i.d.R. NaCl, nicht für die Trinkwasserversorgung nutzbar. Von den analysierten Stauseewässern in Tauá haben der Trici und der Foquilhas Verwendung als Trinkwasser, der Favelas kann aufgrund seines hohen Salzgehaltes nicht genutzt werden, der Várzea do Boi ist derzeit trocken. Die Verwendung der Wässer in der Landwirtschaft ist ebenfalls wegen der hohen Salzgehalte stark eingeschränkt.

#### *Trinkwasserqualität*

Der weitgehend guten hydrochemischen Qualität der Grund und Oberflächenwässer in Picos steht eine völlig abweichende Beurteilung gegenüber, wenn die hygienische Beschaffenheit mit berücksichtigt wird. Für mikrobiologischen Untersuchungen am Flußwasser wurde gegen Ende

der Trockenzeit 8 Proben aus den Rio Guaribas an 6 verschiedenen Entnahmestellen genommen. Die Anzahl der coliformen Keime lag über 2419 und die von *E. coli* zwischen 20 und >2419. Die Nutzbarkeit des Flußwassers zum Trinken ist generell als schlecht einzustufen. Um zu einer Einschätzung der hygienischen Belastung großer Flüsse im Bereich von Städten zu kommen wurden in Teresina 8 mikrobiologische Untersuchungen am Poti und am Parnaíba durchgeführt. Die Wässer aller Entnahmestellen als nicht trinkbar eingestuft werden. In den Stauseewässern der Region Picos (Bocaina, Tiririca bei Jaicos) ist die Anzahl von *E.coli* und den coliformen Keimen in den 4 analysierten Proben etwas niedriger. Dennoch werden die Wässer aufgrund der Anwesenheit von *E. coli* als nicht trinkbar eingestuft.

Im Fokusgebiet Picos wird zum überwiegenden Teil das Grundwasser als Trinkwasser verwendet. Solange keine Brunnenundichtigkeiten vorliegen bzw. die Brunnen sachgemäß abgedeckt sind, ist das Grundwasser gut gegen Schadstoffeinträge geschützt und stellt eine sichere Trinkwasserquelle dar. Dies wird durch die von uns durchgeführten Untersuchungen belegt. Bei den mikrobiologischen Tests an Rohwässern der Orte Picos, Bocaina, Cana Brava sowie im ländlichen Raum wurden keine coliforme Keime und *E.colis* nachgewiesen.

Die Qualität des Wassers, welches als Trinkwasser die Menschen erreicht, ist im wesentlichen abhängig von der Wasserbehandlung durch den Menschen. Die Stadt Picos verfügt über ein relativ langes Rohrleitungsnetz, so daß eine Schutzchlorung durchgeführt wird. Die Untersuchungen der mikrobiologischen Beschaffenheit der Wässer im Netz an 6 Entnahmestellen ergab, daß an zwei Endstellen im Netz coliforme Keime nachweisbar waren. An diesen Entnahmestellen konnte in den Wasserproben auch kein Chlor mehr nachgewiesen werden, was auf eine zu geringe Zudosierung von Kalziumhypochlorid schließen läßt. Grundsätzlich wäre zu einer wirksamen Verhinderung der Keimvermehrung im gesamten Verteilersystem ein Chlorgehalt von 0,2 mg/L  $\text{Cl}_2$  erforderlich (Hütter 1990).

In Jaicos, einer Kleinstadt südlich von Picos, wird als Trinkwasser das Wasser aus dem Stausee Tiririca verwendet. Der Chlorgehalt wird bei der Aufbereitung so hoch eingestellt, daß auch am Rohrnetzende Chlor nachweisbar bleibt. Hierdurch wird eine hygienische einwandfreie Qualität erzielt, die von uns an drei Stellen im Versorgungsnetz festgestellt wurde. Weiterhin wurden noch die Rohrleitungsnetze in Bocaina, Cana Brava und São Luiz do Piauí untersucht, die deutlich kürzer sind als in Picos. In diesen Ortschaften im ruralen Raum findet nur sporadisch eine Schutzchlorung statt. Das Wasser ist frei von *E.colis*, es wurden jedoch coliforme Keime nachgewiesen. Dies zeigt, daß auch bei einem kurzen Rohrleitungsnetz eine Schutzchlorung die Trinkwasserqualität verbessern würde. Im ländlicheren Bereichen wird die Wasserversorgung von den Gemeinden selbst oder aber privat übernommen.

Gemäß unseren Untersuchungen und den Beurteilungskriterien für Trinkwasser ist eine Nutzung bei etwa 36 % der öffentlichen Wasserstellen und 53% der privaten Brunnen nicht möglich. Der Grund für die schlechte Wasserqualität liegt darin, daß Brunnen nicht abgedeckt sind oder das Hochbehälter nur unzureichend verschlossen sind. Bevölkerungsgruppen die weiter entfernt von einem Brunnen wohnen, müssen eigene Wassertransporte per Auto, Esel, Fahrrad oder aber zu Fuß durchführen, oder sie sind auf Tankwagen (Carro de Pipa) angewiesen, die Wasser verkaufen. Einzeluntersuchungen zeigen, daß die hygienische Qualität dieser Wässer in der Regel schlecht ist.

#### *Nebeneffekte der Wasseraufbereitung*

Im Trinkwasser von Wasserversorgungsanlagen, die Chlor zur Wasserdesinfektion einsetzen, können, wenn organischen Inhaltsstoffen im Rohwasser vorhanden sind, Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) im Trinkwasser gebildet werden. Die Art der sich bildenden haloformen CKW und der bromoformen ist u.a. abhängig von der Art und dem Gehalt der organischen Substanz, vom

pH-Wert und der eingesetzten Cl-Konzentration. Höhere Gehalte an organische Inhaltsstoffe lassen sich besonders in den Wässern aus den Flüssen oder Stauseen erwarten. Wasserproben aus Fortaleza, Tauá, Jaicos (alle nutzen Stauseewasser als Trinkwasser), Teresina (Flußwasser) und Picos (Grundwasser mit niedrigen org. Kohlenstoffgehalten) wurden auf CKW hin analysiert. Bei allen untersuchten Entnahmestellen kann ein direkter Eintrag von CKW durch Reinigungs- und Lösungsmittel ausgeschlossen werden. Die festgestellten CKW-Konzentrationen liegen zwischen „nicht nachweisbar“ und 200 µg/L, wobei mengenmäßig Trichlormethan dominiert. Die analysierten Gehalte liegen deutlich über dem deutschen TVO-Grenzwert von 10 µg/L, aber auch über dem internationalen WHO-Guideline Value von 30 µg/L für Trihalogenmethane (WHO 1984).

Auch wenn ohne Zweifel die bakteriologische Qualität des Trinkwassers Priorität hat, sollten die CKW-Gehalte nicht außer Betracht gelassen werden, da Halogenkohlenwasserstoffe eine leberschädigende Wirkung haben, Hautreizungen hervorrufen können und kanzerogen sind. Deshalb sollte eine Reduktion der CKW-Gehalte angestrebt werden. Sie läßt sich durch eine Verringerung der organischen Inhaltsstoffe des Rohwassers bewirken. Hierfür kann eine technische Vorbehandlung z.B. Sedimentation und Filtration erfolgen (Ellis 1991).

### *Wasserqualität und Gesundheit*

Wasser mit schlechter Qualität führt zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen oder kann insbesondere bei Kleinkindern zum Tod führen. In Brasilien starben (gemeldet) zwischen 1979 und 1995 nach Auskunft der FNS (Fundação Nacional de Saúde) 342.732 Kinder unter 5 Jahren aufgrund kontaminierten Wassers. Alleine im Nordosten Brasiliens waren es 40 %. Die Krankheiten die zum Tode führen sind Cholera, Typhus, infektiöse Darmerkrankungen und Amöbenruhr (Saúde, Journal o Povo 9.12.99). Die höhere Empfindlichkeit der Kinder gegenüber wasserbürtigen Krankheiten liegt darin begründet, dass sie im Verhältnis zu ihren Körpergewicht mehr Wasser trinken (Lloyd 1989). Aus den vorliegenden Zahlen erklärt sich das Interesse der FNS (Ceará) an einer Zusammenarbeit mit WAVES, wenngleich bekannt ist, daß die Verknüpfung zwischen Umweltdaten und Gesundheitsdaten schwierig ist. Von Kolsky & Blumenthal (1995) wurde die Erfassung folgender Indikatoren als wesentlich erachtet: der Zugang zum Wasser, die Art der Quelle, die Standzeit des Wassers, die Beseitigung der Fäkalien, die Überschwemmungsgefahr für die Behausungen, die Untersuchung auf E. coli und persönliche Hygiene. Im Rahmen der von uns durchgeführten Experteninterviews und Untersuchungen wurden für das Fokusgebiet Picos diese Kriterien bis auf die Daten zur persönlichen Hygiene erhoben. Für das Fokusgebiet in Tauá wurde zusammen mit unseren brasilianischen Partnern damit begonnen. Ziel ist es, für diese Gebiete Hydrotöpfe gleicher Wasserqualität auszuweisen, die dann von Seiten der FNS genutzt werden können um die Daten zu korrelieren und eine statistische Auswertung vornehmen zu können. Aufgrund des späten Förderbeginn auf brasilianischer Seite liegt bislang nur die Zusammenstellung der im Fokusgebiet Tauá gemeldeten Krankheiten vor. Wahrscheinlich können diese Arbeiten in der noch restlichen Laufzeit der Phase I nicht abgeschlossen werden.

### 2.3.5 Untersuchung versalzter Grundwässer im Fokusgebiet Tauá

In Ceará stellen versalzte Grundwässer eine erhebliche Einschränkung der Wasserverfügbarkeit dar. Nach Kreysing (1976) sind ca. 80% der kristallinen Grundwässer in Nordost-Brasilien so stark versalzen, dass sie als Trinkwasser nicht in Frage kommen (durchschnittliche Gesamtmineralisation ca. 4000 mg l<sup>-1</sup>). Viele Brunnen werden daher nicht genutzt. Nach den Vorstellungen der CPRM (1998) könnte alleine durch die Reaktivierung öffentlicher, stillgelegter oder defekter Tiefbrunnen z.B. bei getrennter Brauch-/Trinkwassernutzung das Wasserangebot im Munizip Tauá um 33%, durch die zusätzliche Reaktivierung privater Brunnen sogar um 94%

erhöht werden. Eine solche Erhöhung der Wasserverfügbarkeit würde sich im Rahmen der Entwicklungsszenarien von WAVES deutlich auswirken. Wesentliche Grundlage für die Entwicklung von Lösungswegen ist die Kenntnis der Versalzungsursache, die nicht generell geklärt ist.

Das kristalline Basement, das geologisch den östlichen Teil des Dürrepolygons prägt (Bundesstaaten Ceará, Paraíba, Pernambuco, Alagoas und Bahia), ist nach Audry & Suassuna (1995) durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet: Festgesteine mit geringer Permeabilität, geringe Infiltrationskapazität, geringmächtige Böden und intermittierende Flüsse. Im Gegensatz zu den Sedimentbecken sind die Kristallinaquifere geringmächtig und meist an tektonische Kluftzonen gebunden, die als diskontinuierliche Kluftgrundwasserleiter nur lokal verbreitet sind. Eine primäre Porosität existiert nach CPRM (1998) nicht. Geyh & Kreysing (1973) bewiesen, dass die versalzten Grundwässer keinem alten, abgeschlossenen Grundwasserregime angehören. Kreysing (1976) begründete die überwiegende NaCl-Versalzung hauptsächlich mit den klimatischen Faktoren, wie hohe Jahresdurchschnittstemperaturen, hohe Insolation und geringe Niederschläge. Geyh (persönliche Mitteilung) sieht nach neueren Untersuchungen eine Salzanreicherung in Zusammenhang mit der Grundwasserneubildung: An der Oberfläche kristallisierte Salze werden durch Niederschläge gelöst und verhindern als hochkonzentrierte Lösung beim Einsickern über Trockenrisse das Quellen von Tonmineralen. Diese quellen erst und verschließen dann die Risse nach dem der Oberflächenabfluss geringer mineralisiert ist. Nach dieser Hypothese gelangt überwiegend versalztes Wasser in den Untergrund. Durch geringe Grundwasserneubildung und geringe hydraulische Gradienten ist die Grundwasserbewegung zudem sehr langsam, was durch Gesteinslösung und durch eine evtl. tiefgreifenden Transpiration durch Pflanzenwurzeln zusätzlich die Mineralisation erhöht.

#### *Eigene Untersuchungen zur Versalzung von Oberflächen- und Grundwässern*

Im Fokusgebiet Tauá wurden Grund- und Oberflächenwässern hinsichtlich der Versalzung hydrochemisch und isotopisch untersucht. Die Bestimmung der  $^{18}\text{O}$ -Isotopengehalte wurde zur Bestimmung des Verdunstungsanteils angewendet (Moser & Rauert 1980). Vorteil der Methode ist, dass Anreicherung des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes im Wasser allein auf den Anteil des verdunsteten Wasser zurückzuführen ist. Im Gegensatz hierzu unterliegen die hydrochemischen Inhaltsstoffe und hydrophysikalischen Parameter zusätzlichen Veränderungen durch chemische und biologische Vorgänge (z.B. Prozess der Eutrophierung). Für die Betrachtungen an Oberflächengewässern wurden die Stauseen Trici, Favelas, Várzea do Boi und Forquilhas untersucht.

Tab. 5: Daten der Stauseen hinsichtlich der Versalzungsproblematik, Veränderungen der chemischen Charakteristik infolge der Verdunstung

|                                                                                          | Trici                                                 | Várzea do Boi                                                | Favelas                        | Forquilhas                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Maximales Volumen                                                                        | $16,3 \times 10^6 \text{ m}^3$                        | $51,9 \times 10^6 \text{ m}^3$                               | $30,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ | $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ |
| Füllvolumen (%) im Beobachtungszeitraum Jan 98 bis April 99 *                            | Max. 40<br>Min. 0                                     | Max. 10<br>Min. 0                                            | Max. 30<br>Min. 10             | Max. 60<br>Min. 25          |
| Spez. el. Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) im Zeitraum (etwa Okt 98 bis Nov 99) | Max. 1350<br>Min. 170                                 | Max. 1260<br>Min. 290                                        | Max. 2500<br>Min. 2000         | Max. 890<br>Min. 604        |
| $^{18}\text{O}$ -Gehalte (‰) im Zeitraum (etwa Okt 98 bis Nov 99)                        | Max. 7,9<br>Min. -2,9<br>(~Niederschlag)              | Max. 7,1<br>Min. -1,4                                        | Max. 9,3<br>Min. 7,3           | Max. 9,0<br>Min. 3,7        |
| Chemische Klassifizierung                                                                | Ca-Na-Mg- $\text{HCO}_3$<br>Na-Mg- $\text{HCO}_3$ -Cl | Na-Ca-Mg- $\text{HCO}_3$ -Cl<br>Na-Mg-Ca- $\text{HCO}_3$ -Cl | Na-Mg-Cl- $\text{HCO}_3$       | Na-Mg-Cl- $\text{HCO}_3$    |

\*= Bei vorliegen der neuen Daten werden die Messzeiträume aneinander angepasst!

Die Nutzung der Stauseen wird bestimmt durch die Wasserqualität und die Wasserverfügbarkeit. Der Favelas-Stausee wird aufgrund des hohen Salzgehaltes nur für die Fischproduktion

genutzt, der Trici-Stausee ist das Reservoir für die Trinkwasserversorgung von Tauá, der Várzea do Boi-Stausee, ursprünglich mit einem großen Bewässerungsprojekt gekoppelt, hat aktuell aufgrund des geringen Füllvolumens keine Nutzung und das Wasser des Forquilhas – Stausee wird zur Bewässerung und als Trinkwasser genutzt, insbesondere für Trinkwassertransporte in Trockenzeiten.

Die Stauseen Trici und Várzea do Boi sind nach Ende der Trockenzeit 98 nahezu leer (Anhang 7a). Durch die zunehmend kleinere Gesamtwassermenge steigen die Werte für die spezifische elektrische Leitfähigkeit bis auf 1350 bzw. 1260  $\mu\text{S}/\text{cm}$  an (Anhang 7b). Nach Einsetzen der Regenzeit fallen die Werte und liegen dann bei etwa 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Im Gegensatz hierzu kann der Favelas-Stausee schon allein aus bautechnischen Gründen nicht komplett auslaufen, da der Auslauf etwa 6 m über der Stauseesohle liegt, was zu einem Restsee von einigen Quadratkilometern führt. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit liegt nach der Regenzeit 98/99 (relativ wenig Regen) bei 2000  $\mu\text{S}$  und steigt bis zum Ende der Trockenzeit 99 auf 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Die in Anhang 8 im „Schoeller“-Diagramm dargestellte hydrochemische Zusammensetzung der Stauseewässer lässt erkennen, dass sich der Chemismus des Favelas-Stausees von den Stauseewässern des Trici und des Várzea do Boi insbesondere direkt nach der Regenperiode unterscheidet. Das Wasser des Favelas-Stausees lässt sich als Na-Mg-Cl-HCO<sub>3</sub> –Wasser und das des Trici und Várzea do Boi als Ca-Na-Mg-HCO<sub>3</sub> –Wasser klassifizieren. Mit zunehmender Verdunstung nehmen die beiden letztgenannten im Natrium- und Chloridgehalt relativ am stärksten zu, so dass das Wasser in ein Na-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl-Wasser übergeht. Hiermit nähert es sich dem Chemismus des Favelas-Stausees an. Auf Basis der Chemiedaten erscheint es möglich, die hohen Salzgehalte in den Stauseen auf einen reinen Verdunstungsprozess zurückzuführen. Es muss kein Zustrom von Wasser (Oberflächenwasser oder Grundwasser) mit einer hohen Mineralisation vorliegen, die sich aus Gesteinslösung oder aus der selektiven Neubildung (s.o.) erklärt.

Zur Beurteilung der Chemiedaten ist es wichtig, den Verdunstungsanteil in den Wässern zu kennen, der die hydrochemische Zusammensetzung verändert. Zur Abschätzung des Verdunstungsanteils wurden die <sup>18</sup>O-Gehalte untersucht (Tab. 5). Wenn sich die Stauseen direkt mit Niederschlags-Oberflächenabfluss füllen und keine weiteren Zuflüsse (Grundwasser) haben, ist der Ausgangsisotopengehalt identisch mit dem Wert für die Niederschläge. Dieser Ausgangswert wurde mit –3‰  $\delta^{18}\text{O}$  im Trici-Stausee analysiert, nachdem der See komplett ausgelaufen war und sich mit Regenwasser frisch gefüllt hatte. Gegen Ende der Trockenzeit wurden erwartungsgemäß in allen Stauseen die höchsten <sup>18</sup>O-Gehalte in einem Bereich von etwa 8-10‰  $\delta^{18}\text{O}$  analysiert, wobei der höchste Wert im Várzea do Boi und der niedrigste im Trici gemessen wurde (Anhang 7c). Für die qualitative Abschätzung des Verdunstungsanteils aller Stauseen (im nächsten Arbeitsschritt) muss für einen See die Korrelation der <sup>18</sup>O-Werte zur Verdunstung aufgestellt werden unter Berücksichtigung des Abflusses. Nach dem Eintragen der <sup>18</sup>O-Gehalte kann dann über <sup>18</sup>O-Messwerte eine Aussage über den Verdunstungsanteil abgeleitet werden.

Die versalzten Grundwässer in Tauá wurden vor dem Hintergrund der o.g. Ursachenerklärungen untersucht. Es wurden die Brunnen Aldeota und Cohab im Stadtgebiet Tauá sowie St. Antonio Carrapateiras und Bom Jesus in Siedlungen im ruralen Raum untersucht, da sie hohe Leitfähigkeiten aufwiesen. Sie waren zur Zeit der Untersuchungen mit mobilen Entsalzungsanlagen zur Trinkwasseraufbereitung ausgerüstet.

Tab.6: Daten der Grundwässer im Hinblick auf die Versalzungsproblematik

|                                                   | Aldeota       | Cohab       | Carrapateiras                | Bom Jesus                    |
|---------------------------------------------------|---------------|-------------|------------------------------|------------------------------|
| Spez.el.Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | 3390 bis 4570 | 3040-3920   | 1820-1280                    | 3770-4230                    |
| $\delta^{18}\text{O}$ (‰) Werte                   | 0,3 bis 1,5   | -2,2        | -3,2                         | -3,9 bis –3,3                |
| Chemische Klassifizierung                         | Na-Mg-Ca-Cl   | Na-Ca-Mg-Cl | Na-Mg-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub> | Na-Mg-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub> |

Unter der Annahmen, dass die Grundwässer aktuell regional neugebildet wurden, sollten die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Grundwässer im Bereich von  $-3\text{‰}$  liegen (Trici-Stausee, s.o.) (Anhang 7e). Wenn die Werte  $-3\text{‰}$  übersteigen, wie in den Grundwässern der Brunnen Aldeota und Cohab, kann die Ursache in Verdunstungsprozessen liegen, oder im Zustrom von Wässern mit höheren  $^{18}\text{O}$ -Gehalten. Wässer mit höheren  $^{18}\text{O}$ -Gehalten können z.B. Sickerwässer aus dem Stadt- oder Ortsbereich sein, die ja ursprünglich als Trinkwasser aus den Stauseen stammen. Generell lässt sich in den Brunnen eine von der Oberflächenwässern abweichende hydrochemische Zusammensetzung feststellen, so dass ein anderer Grund für die hohen Salzgehalte wahrscheinlich ist. Zudem liegen mit Ausnahme des Grundwassers des Brunnens Aldeota die  $^{18}\text{O}$ -Gehalte in etwa im selben Bereich wie die Werte für die Niederschläge und lassen keine Verdunstung erkennen. Im Brunnen Aldeota ist eine Variationen im zeitlichen Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sichtbar, wobei mit dem Anstieg der  $^{18}\text{O}$ -Gehalte auch ein Anstieg der Werte für die spez. elektr. Leitfähigkeit verbunden ist, was auf Verdunstungsprozesse oder den Zustrom von salzreichen Wasser mit hohem  $^{18}\text{O}$ -Gehalten zurückzuführen wäre.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben keine einheitliche Versalzungsursache (Anhang 8). Während in einigen Stauseen durch die Anreicherung von  $^{18}\text{O}$  und durch die Zunahme der Leitfähigkeit eindeutige Hinweise auf eine Verdunstungsanreicherung gegeben sind, ist dies bei den versalzten Grundwässern nicht nachzuweisen. Nach den eigenen Ergebnissen spricht einiges für eine Kombination aus Ursachen, was durch weitere Untersuchungen überprüft werden muss.

#### *Vermeidungskonzept versalzter Grundwässer: Vorstudie zur künstlichen Grundwasseranreicherung*

Die bisherigen Bemühungen zu einer verbesserten Grundwasserqualität zu gelangen, erfolgten über die besser geplante Festlegung von Bohrpunkten (z.B. Kreysing 1976, De Barros Oliveira & Batista 1998) und über die künstliche Anreicherung von Grundwässern während der Regenzeit in alluvialen Aquiferen durch unterirdische Dämme (Costa et al. 1998). Während der Dürre der Jahre 1998 und 1999 wurden mit dem Einsatz aufwendiger Entsalzungsanlagen viele Brunnen nutzbar gemacht (s.o.). Auf der Basis der Ursachenuntersuchung (o.g. Geyh-Theorie: wesentliche Neubildung durch versalztes Wasser) wird von uns der Ansatz verfolgt, lokale versalzte Grundwasserleiter von Talfüllungen und Kluftsystemen im Bereich des kristallinen Basement durch eine Verdünnung mit „süßem“ Stauseewasser qualitativ so zu verbessern, dass diese als Trinkwasserreservoir und für Bewässerungszwecke genutzt werden können. Mit der hier vorgestellten Verdünnungsmethode soll das eigentliche Problem der Versalzung direkt bearbeitet werden. Ein wichtiger Vorteil ist, dass Stauseewasser bei der Einspeisung (meist) klar ist und keine Sedimentpartikel aufweist, die die Filter von Injektionsbrunnen oder die Sandfilter von Sickerschlitzen verstopfen könnten. Ganzjährig sollte genügend süßes Stauseewasser zur Einspeisung in einen versalzten, alluvialen Aquifer zur Verfügung stehen, wobei eine gesicherte Wasserentnahme aus dem Stausee für andere Zwecke gewährleistet sein muss.

Aus dem Stausee wird Wasser über eine (Pump)Leitung abgesaugt und über ein Rohrsystem im freien Gefälle vor den Staudamm zur Einspeisung in den Aquifer geleitet. Zur Einspeisung kommen eine Injektionsbrunnen-Galerie oder die Einspeisung über sandgefüllte Sickerschlitze in Frage (z.B. Frank & Schwarz 1966 od. Ginzel 1992). Das injizierte oder verrieselte Wasser tritt unter einer lokalen Erhöhung des Grundwasserspiegels in den Kluft (und/oder) Poren-Aquifer über und vermischt sich dort mit dem versalzten Wasser, wodurch ein Verdünnungseffekt in Gang kommt. Über Entnahmefrühen talabwärts, die wiederum das hydraulische Gefälle erhöhen, wird das verdünnte Wasser abgepumpt. Folgende schematisierte Abschätzungen wurden gemäß der Situation unter normalen Klimabedingungen des Trici-Stausees im Fokusgebiet Tauá abgeleitet. Während einer Dürrezeit ist eine Einspeisung nicht sinnvoll, da dann

das Oberflächenwasser direkt genutzt werden muß und zu dem die Leitfähigkeiten zu hoch sind.

**Stausee:**  $7 \times 10^6 \text{ m}^3$  Füllvolumen nach durchschnittliche Trockenzeit –  $16 \times 10^6 \text{ m}^3$  Füllvolumen nach max. Regenzeit,  $200\text{--}500 \text{ }\mu\text{S/cm}$  el. Leitfähigkeit,  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  Entnahme für Wasserversorgung, ca.  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  Verlust durch Verdunstung, 4 bis  $13 \times 10^6 \text{ m}^3$  Wasser steht unter Normalbedingungen als Rest zur Verfügung.

**Talaquifer (zur Vereinfachung ohne kristallinen Kluftaquifer):** Länge 5000 m, Breite 300 m, Mächtigkeit durchschnittlich 10 m, Porenraum 20 % (Porenvolumen = 3 Mio.  $\text{m}^3$ ), hydraulische Leitfähigkeit  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ , Grundwasserneubildung 10 mm ( $15.000 \text{ m}^3$ ), hydraulischer Gradient  $J=0,001$  (ca.  $1\text{m/km}$ ): daraus ergibt sich eine Durchflussmenge  $Q=0,003 \text{ m}^3/\text{s}$ , eine Filtergeschwindigkeit  $v_f$  von  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , eine Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  von  $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  und eine Fließzeit  $t$  für 5000 m von etwa 31 Jahren ohne Einspeisung oder Entnahmen.

**Versickerung und Entnahmen:** Versickerung von ca.  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  Wasser (ca.  $32 \text{ l/s}$ ) mit durchschnittlich  $300 \text{ }\mu\text{S/cm}$  in ein Grundwasser mit  $1800 \text{ }\mu\text{S/cm}$  über 8 Brunnen ( $4 \text{ l/s}$ ) und eine Entnahme von  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  Wasser aus 4 Brunnen ( $8 \text{ l/s}$ ): das führt zu einer Erhöhung des Wasserspiegels oberstromig von bis zu 5 m und einer Absenkung unterstromig von mindestens 5 m, also einer Erhöhung des hydraulischen Gradienten  $J=0,003$ :  $Q=0,009 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $v_f=3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,  $v_a=1,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , Fließzeit  $t$  für 5000 m von 10 Jahren.

Da die Grundwasserneubildung vernachlässigbar klein im Verhältnis zur künstlichen Grundwasseranreicherung ist, kann von einem Grundwasserfließen gemäß dem „Piston flow“-Prinzip ausgegangen werden. Nach etwa 10 Jahren würde der erste Aussüßungseffekt in den Entnahmebrunnen bemerkbar. Das schematische Fallbeispiel zeigt, dass innerhalb eines überschaubaren Zeitraumes durch die künstliche Anreicherung des Grundwassers mit süßem Stauseewasser eine Verbesserung der Wasserqualität herbeigeführt werden kann, ohne das vorhandene Stauseewasser in normalen Jahren zu übernutzen. In normalen Zeiten kann aus dem Grundwasser sowohl qualitativ gutes Trinkwasser als auch Bewässerungswasser entnommen werden. Besondere Bedeutung bekommt das Reservoir aber in Trockenzeiten mit Wassermangel, da ein großer Süßwasserspeicher zur Verfügung steht, der für einen ausreichenden Zeitraum eine geregelte Trinkwasserversorgung mit Wasser hoher Qualität gewährleistet.

### 2.3.6 Vergleichende Bewertung von Wasser- und Umweltprojekten in Ceará und Piauí

Mit der Betrachtung von bestehenden Wasser und Umweltprojekten werden deren regionale Auswirkungen analysiert. Daraus werden Strategien für ein optimales Management abgeleitet. Das Wissen über die Potentiale und die Probleme dieser Projekte ist ein Teil des Expertenwissens das für die Entwicklung der regionalen Szenarios genutzt wird. Im ersten Arbeitsschritt ging es um eine Aufstellung von Kriterien die geeignet sind, verschiedene Projektformen miteinander vergleichen und bewerten zu können. Bewertungs- und Analysearbeiten liegen zum Thema der ländlichen Wasserversorgung (WHO 1995, Quirós 1996) vor, z.B. von einem großen Bewässerungsprojekt (Kreditanstalt für Wiederaufbau, 1997). Ein typisches Kriterium zu Vergleich von Projekten basiert auf der Kosten-Nutzen-Analyse. Unser Ziel war daher eine vereinfachte Kosten-Nutzen Analyse an ausgewählten Projekten. Neben wirtschaftlichen Eckdaten der Projekte wurden auch die Rahmenbedingungen wie Währungsumstellungen, Inflation und Mindestgehalt erfasst.

Zur Vereinfachung bei der Bewertung und um eine gute Vergleichbarkeit herzustellen wurden im ersten Schritt hauptsächlich Projekte der DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) herangezogen. Hauptaktivitäten der DNOCS liegen in den Bereichen Verfügbarkeit von Wasser in den Dürregebieten, Nutzung der Ressource, Verbesserung der Infrastruktur und Weiterbildung von den Landarbeitern. Insgesamt sind seit der Gründung der DNOCS fast

10.000 kleine bis große Stauseen in der gesamten Region des Nordostens angelegt worden. Die ausgewählten Projekte wurde beschrieben: Lage, Indikatoren der Region, Konzept bzw. Planungsziels, technische Daten sowie Ausstattung bzw. Art der Finanzierung. Basis der Informationen sind Ortsbesuche, Interviews bei den entsprechenden Behörden und recherchierte Planungsunterlagen.

Aufgrund der bei der Recherche zusammengetragenen Daten wurde klar, daß der Ansatz der Kosten-Nutzen-Analyse verworfen werden mußte, da die Daten entweder nicht vorhanden sind oder für „Externe“ nicht einsichtig sind. Dennoch können aus der Analyse der Projekte und der vergleichenden Bewertung der Projekte Leitlinien abgeleitet werden die sich positiv oder negativ auf das Wassermanagement auswirken. Bis jetzt wurden folgende Projekte besucht und beschrieben: Açude Publico Petronio Portela in Sao Raimundo Nonato (Piauí), Projeto Piloto in Vale do Gurgueia (Piauí), Perímetro Irrigado Varzea do Boi (Tauá, Ceará) und Açude Favelas in Tauá (Ceará), SISAR in der Region von Sobral (Ceará), Distrito de Irrigacao do Plato de Guardalupe (Stausee Boa Esperanca in Piauí), Projeto de Irrigacao Baixo Acaraú (Ceará).

Die älteren Projekte Petronio Portela, Projeto Piloto, Varzea do Boi und Favelas sind DNOCS Projekte. Entwicklungsziele waren der Aufbau von Bewässerungslandbau und Fischzucht sowie die Sicherung der Trinkwasserversorgung. Hierzu wurden Stauseen oder Brunnen gebaut. Die nachhaltige Wirkung der Projekte aus heutiger Sicht ist nur gering: Für den Favelas-Stausee besteht eine nur eingeschränkte Nutzungsmöglichkeit zum Fischfang, da er versalzt ist. Der Stausee Varzea do Boi kann nicht mehr genutzt werden, da er trocken gefallen ist. Dies ist wahrscheinlich auf die große Anzahl der später oberstromig gebauten kleineren Stauseen zurückzuführen. Für die Projekte Petronio Portela und Projeto Piloto ergaben sich nach der Fertigstellung des Stausees und der Brunnengalerie Probleme bei der nachfolgenden Nutzung. Im Projekt Petronio Portela besteht seit Fertigstellung (1995) keine Nutzung. Im Projeto Piloto, das nie in der geplanten Größe umgesetzt wurde, liegen wesentliche Probleme in der fehlenden landwirtschaftlichen Aus- und Fortbildung der Bauern, so dass nach wie vor die meisten Bauern nur Subsistenzlandwirtschaft betreiben. Die Bewässerungstechnik wird vor Ort nicht verstanden, für Reparaturen fehlt die Finanzierung und es können keine Kleinkrediten in Anspruch genommen werden, da die meisten Bauern nicht Landeigentümer und damit nicht kreditfähig sind.

Im SISAR Projekt wurden für 8000 Familien in 45 Gemeinden die Wasserinfrastruktur in ländlichen Gebiet durch den Bau von kleinen Stauseen, Brunnen, Wasserleitungen aufgebaut. Das Projekt ist in das bundesstaatliche Wasserversorgungsunternehmen CAGECE (Compania de Água e Esgoto do Ceará) eingegliedert. Es wird zu 70% über die KfW aus Deutschland und zu 30% von der Bundesregierung von Ceará finanziert. Das Projekt SISAR hat bereits im Konzeptansatz versucht, für die Nachhaltigkeit des Projektes zu sorgen. Ein wesentlicher Teil ist dabei der Aufbau der Nutzergruppen, die über ihr Eigeninteresse die Nachhaltigkeit sichern. Deshalb wurde ein Zweckverband für alle Gemeinden gegründet (BMZ 1998). Begleitend wurde ein „Capacity Training“ durchgeführt, ein Prozess der Stärkung der administrativen Einheiten damit die Verwaltung und das Management im Projekt durchgeführt werden kann. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist, dass für die Wasserversorgung gezahlt werden muss. Dies ermöglicht die Aufrechterhaltung des Betriebs und fördert die Wertschätzung der Ressource Wasser. Ab Mitte 1999 ist das Projekt ganz in brasilianische Hand übergeben worden. Auftretende Probleme werden gelöst und die Kosten für die Reparaturen und Aufrechterhaltung werden getragen. Das Planungsziel, soweit es sich bis jetzt einschätzen lässt, wurde erreicht.

In den noch im Ausbau befindlichen DNOCS-Projekten Acaraú und Plato de Guardalupe wurde der Versuch unternommen wurde, die Probleme, die in den älteren Projekten bei der nachfolgenden Nutzung aufgetreten sind, in der Planung zu berücksichtigen. Ansätze hierzu bestehen in der Erhöhung der Eigenverantwortlichkeit, indem die Kleinbauern auf dem ihnen zugeteilten



Land für die Instandhaltung ihrer Bewässerungsanlagen zuständig sind. Hierzu erhalten sie eine landwirtschaftliche Fortbildungen. Die Erhebung von Gebühren für den Wasserverbrauch soll die Funktionsfähigkeit des gesamten Wasserverteilungssystem sichern. Neben den Kleinbauern soll die Einbindung der Privatwirtschaft den Erfolg der Projekte mit gewährleisten.

Die Recherche und vergleichende Bewertung von bestehenden Wasser- und Umweltprojekten zeigte, dass folgende Kriterien für den Erfolg von Projekten verantwortlich sind: Eigentumsverhältnisse, Partizipation von Nutzern, Fortbildung und „capacity building“, Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien, Einbindung in Regionalplanung. Bei neueren Projekten finden diese Kriterien Berücksichtigung. Für WAVES erscheint vor allem der Aspekt der Einbindung bestehender Projekte in die Regionalplanung und in die Szenarien von Bedeutung sowie zur Beurteilung von Wassermanagementstrategien. Um nicht nur eine Projektbewertung von deutscher Seite zu treffen, wurden die in Piauí untersuchten Projekte und unsere Bewertung derselben auch an unsere brasilianischen Partner und an von Ihnen hinzugezogene Experten gegeben. Die Ergebnisse dieser „Querprüfung“ sollten bis zum Projektende vorliegen.

## 2.4 Diskussion (Antworten auf die Fragestellung und offene Fragen)

### *Restlaufzeit erste Hauptphase WAVES*

In der Restlaufzeit der ersten WAVES-Phase wird die derzeit laufende Regenzeit noch durch Geländeuntersuchungen zur Verbesserung der Datenlage bei der Wasserbilanz in Picos und bei der Wasserqualitäts- und Versalzungsproblematik in Tauá erfasst. Die Geländearbeit wird zum großen Teil von den brasilianischen Partnern durchgeführt. Die Verknüpfung Wasserqualität und Gesundheit, die gemeinsam mit den Partnern und der FNS untersucht wird, wird vor ebenfalls vor allem bei den Partnern zur Zeit verfolgt. Die Ergebnisse der derzeitigen Untersuchungen sollen bei einem Arbeitsbesuch in Brasilien Anfang Mai gemeinsam mit den Kollegen in die bestehende Interpretation eingebaut werden und diese wesentlich verbessern. Auf der Basis der verbesserten Datenlage werden auch die Modellansätze (Oberflächenabfluß, Bodenwasserhaushalt, Grundwasser) nochmals kalibriert. Außerdem werden in der Restlaufzeit die erkannten Bezugssysteme von Wasserqualität, Wasserverfügbarkeit und Wasserversorgungsstruktur stärker abstrahiert, so daß eine bessere Übertragbarkeit auf die nächst höhere Aggregationsebene der großskaligen Modellierung und der Szenarien erfolgen kann. Das ist in Form von Arbeitsbesuchen in Berlin und Kassel geplant. Es wird damit begonnen, die für die Bundesstaaten entwickelten Szenarien auf das Fokusgebiet Picos zu übertragen. Mit den so festgelegten Randbedingungen für Simulationen werden mit den Bilanzmodellen weitere Zukunftssimulationen z.B. veränderte Niederschlagsintensitäten gerechnet. Im Arbeitsbereich der Projektbewertung wird eine Zusammenführung der Ergebnisse einer deutschen und brasilianischen Evaluierung erfolgen.

### *„Benefits“ der Tätigkeit des Teilprojektes Wassermanagement und Wasserressourcen*

Die Arbeiten unseres Teilprojektes haben innerhalb von WAVES wesentlich zum Verständnis der hydrogeologischen und hydrologischen Situation in NE-Brasilien speziell in den Fokusgebieten Picos und Tauá beigetragen. Des weiteren wurden die wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Nordost-Brasilien erarbeitet und beschrieben, in denen WAVES als Instrument der Regionalplanung eingesetzt werden soll. In den Fokusgebieten wurden Detailuntersuchungen zur Wasserqualität und zur Wasserbilanz durchgeführt, die dem Abgleich mit großskaligen Modelle dient. Die Ableitung von Kriterien zum Erfolg von Wasserprojekten dient der Entwicklung möglicher gebietsbezogener Szenarien. Essentiell ist auch unser Beitrag zur Außendarstellung von WAVES.

Umsetzungsorientierte Ergebnisse sind die erstmaligen Trinkwasserqualitätsuntersuchungen im ländlichen Raum in Picos, die mit den dortigen Behörden und Wasserversorgern diskutiert wurden und Eingang in praktische Handhabungen findet. Ebenso finden die Untersuchungen zur Wasserbilanz über unseren Partner DHME Eingang in die Regionalplanung der Regierung von Piauí. Die Untersuchungen zur Versalzungsproblematik und die Arbeiten zur Projektbewertung werden mit brasilianischen Experten diskutiert, und werden in nächster Zeit publiziert.

### *Offene Fragen*

Die entstandene oder noch offenen Fragen sind wie folgt aufzuzählen: 1. Bisher unbefriedigend gelöst ist die Erfassung des Wasserbilanzgliedes „Zwischenabfluss“, sowohl meßtechnisch als auch in den Modelle. Da nur Bruchteile des Niederschlages zum direkten Abfluß oder zur Grundwasserneubildung beitragen ist der Zwischenabfluß von großer Bedeutung für die Gesamtbilanz und zwar differenziert nach dem geologischen Untergrund z.B. von Picos und Tauá und anderer Gebiete. 2. Eine Kalibrierung des Grundwassermodells durch Isotopen war nur bedingt möglich, da die Brunnen entgegen unsere Meinung sehr stark durch Undichtigkeiten bestimmt waren. Hier muß auf eine klare Beziehung zwischen Grundwasseralter und Grundwasserströmung bisher verzichtet werden. 3. Ein mangelhafter Punkt jeder hydrogeologischen Arbeit ist das Fehlen von Höheneinmessungen, so daß kein direkter Vergleich von Wasserspiegel nicht möglich ist und Höhenlinienpläne nur mit großer Ungenauigkeit erstellt werden können. 4. Aufgrund der verspäteten Förderung der brasilianischen Partner sind vor allem die Untersuchungen in Tauá, die stärker von den Brasilianern erarbeitet werden sollten, nicht so weit gekommen, wie geplant. Hier sind vor allem noch Fragen zur Wasserstruktur, -bilanz und -qualität sowie zum Einfluß kleiner Stauseen zu untersuchen, um vor allem die Isotopendaten besser zur Übertragung auf andere Gebiete nutzen zu können. Die Versalzungsursache ist bisher nur ansatzweise an wenigen Brunnen und Stauseen mit kurzen Datenreihen bearbeitet. 5. Die Wasserqualität in Flüssen wurde in den Fokusgebieten untersucht. Die hydrologischen Bedingungen dort sind jedoch nur für Teilbereiche NE-Brasiliens typisch und in beiden Fokusgebieten fehlen typische Kontaminationsquellen wie Industrie, Deponien oder Intensivlandwirtschaft. Es wurde jedoch klar, daß die Gewässerqualität eine wichtige Restriktion für die Wasserverfügbarkeit darstellt und mit Analysen und Gewässergütemodellen auch in die integrierte Betrachtung der Klimafolgenabschätzung einbezogen werden muß. 6. Die untersuchten bestehenden Wasserprojekte beschränken im wesentlichen sich auf DNOCS-Projekte. Dies diente ursprünglich der Vereinfachung, ist nun aber auch eine Einschränkung der abgeleiteten Erfolgskriterien auf bestimmte Projekte. Eine Erweiterung der Untersuchung mit Projekten andere Träger sollte erfolgen.

## 2.5 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern

Die Zusammenarbeit zwischen dem Teilprojekt Wassermanagement und Wasserressourcen und den anderen deutschen Teilprojekten ist in der Tabelle 7 dargestellt. Seit Beginn der Arbeit der Szenariengruppe sind wir mit essentiellen Beiträgen beteiligt. Zum einen wurde ein Referenzszenario ausgearbeitet, zum anderen werden die Szenarien umgesetzt auf die Anwendung in der Fokusregion Picos. Verantwortung für das gesamte WAVES-Programm übernahm unser Fachbereich vor allem mit der Planung und Koordination des WAVES-Films und mit der Planung und Koordination der WAVES-Veranstaltungen in Picos und Teresina im November 1999, die sich an Bauern bzw. Politiker richtete und die Vorort vor allem von den WAVES-Mitarbeitern J. Herfort und M. López Gil organisiert wurden.

Die Kooperationspartner auf brasilianischer Seite sind

Prof. Dr. H. Frischkorn, Fr. Ligia Alves Semrau (Bolsista) UFC, Fortaleza: Recursos hídricos e seu gerenciamento em três áreas climaticamente distintas: Bocaína/Picos (PI), Tauá e Crato (CE) – 690043/98-8

Prof. Dr. Serejo Nelson Cabral, UECE, Fortaleza, Dr. José Wellington de Oliveira Lima, FNS, Fortaleza (1 Bosista): Qualidade microbiológica e higiênica das águas de superfície e subterrânea consumidas pelas populações rurais das circunvizinhanças das barragens de Bocaína (PI), Favelas e Castanhão (CE) - 690042/98-1

Eng. Agron. Dr<sup>a</sup>. Valdira de Caldas Brito Vieira Eng. Ms. Margarita Maria López Gil, DHME-SEAAB, Teresina, Disponibilidade hídrica no reservatório de Bocaina (Bocaina, Piauí) e impactos provocados por esta obra nos ecossistemas da região.

Tabelle 7: Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten

| Teilprojekte                       | Querbezug                                                                                 | Bedarf                                                                                                                             |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agrarökosysteme und Ökonomie       | Befragung Wassernutzer<br>Wasser zur Bewässerung<br>Kontamination (speziell PSM)<br>WARIG | Angaben des Mengenbedarfs an Wasser (Pflanzenernährung/Bodenwassermodell)<br>Szenarien Landnutzung (Landwirtschaftlicher Bereich)  |
| Landschaftsökologie                | GIS<br>Digitale Höhenmodelle<br>WARIG                                                     | Flächenbezug, Erstellung thematischer Karten<br>Oberflächenabfluss-, Bodenwasserhaushaltsmodellierung, Szenarien Landnutzung       |
| Klima                              | Großräumiges Wasserdargebot<br>Klimaverhalten                                             | Bewertung kleinregionaler Klimabedingungen in Bezug auf Niederschlag, Verdunstung und Zeitangaben über zu erwartende Trockenphasen |
| Großskaliges hydrologisches Modell | Überregionale Wasserbewirtschaftung                                                       | Vergleich meso- und makroskaliger Resultate zu Oberflächenabfluss, Verdunstung und Grundwasserneubildungsmenge                     |
| Modellierung Wasserbedarf          | Aussagen zur überregionalen Wasserbilanz                                                  | Vergleich meso- und makroskaliger Resultate zur Wassernutzung, Prozessbeschreibung                                                 |
| Integration Szenarien              | Darstellung komplexer Zusammenhänge                                                       | Erarbeitung der Szenarien<br>Umsetzung der Großszenarien auf die Mesoskala (Fokusgebiet)                                           |
| Integration (MOSDEL, SIM)          | Aussagen Wasserbilanz                                                                     | Erarbeitung der Wasserverfügbarkeit und –Nutzung                                                                                   |

Die Geländeaufenthalte unserer Mitarbeiter in Brasilien wurden in der Regel mit unseren brasilianischen Partnern durchgeführt: Wasserqualitätsuntersuchungen und hydrologische Messungen sowie Experteninterviews in den Fokusgebieten und Hauptstädten. Mit den Kollegen wurde besonders der Kontakt zu Institutionen des Staates und der kommunalen Verwaltungen hergestellt, der in Kooperationsvereinbarungen für die weitere Zusammenarbeit mündete (s. Anhang). Mit der CPRM, Ceará (geolog. Dienst) wurde eine Zusammenarbeit hinsichtlich der Versalzungsproblematik vereinbart, mit der COGERH, Ceará (Wasserwirtschaftsbehörde) die Zusammenarbeit hinsichtlich der Gewässergüte und mit der COMDEPI, Piauí (Planungsinstitution) die Zusammenarbeit hinsichtlich der Projektbewertung. Im Sommer 1999 besuchte Frau Margarita López Gil (DHME-SEAAB) unsere Firma mit dem Ziel des Informationsaustausches und der Berechnung des Wasserhaushaltes des Guaribas Einzugsgebietes. Der Besuch mündet in einer Publikation, die zur Zeit in Vorbereitung ist.

## 2.6 Bibliographie

### 2.6.1 Eigene Publikationen

Batista, J. R. de X., M. M. Freitas Santiago, H. Frischkorn, J. M. Filho e M. Forster (1998): I-sótopos ambientais na água subterrânea de Picos-PI. CD, X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas 9 a 11 de Setembro 1998, ABAS, São Paulo, 10 p.

- Carneiro, C. E. de D., M. M. Freitas Santiago, H. Frischkorn, J. M. Filho e M. Forster (1998): Oxigênio-18, Deutério e condutividade elétrica para caracterização da água subterrânea no vale do Guguéia. Abstract, X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas 9 a 11 de Setembro 1998, ABAS, São Paulo, 10 p.
- Forster, M., Voerkelius, S., Frischkorn, H., Santiago, M., da Silva, C., Lantermann, E., Brühl, D., (1995): Water availability and socioeconomic conditions as limiting factors for regional planning and development in the northeast of Brazil.- Isotopes in water resources management, Proceedings of a symposium, Vienna 20-24 March 1995, 444-445; Vienna.
- Güntner, A., Hauschild, M., Heinrichs, G., Jaeger, A., Bronstert, A., Döll, P., Forster, M., Krol, M., Lopez Gil, M.M. (1999): Integrated modelling of water availability and water use at different scales in the semiarid Northeast of Brazil.- abstract, Deutscher Tropentag 1999, Berlin, Germany
- Heinrichs, G., Voerkelius, S., López Gil, M.M., de Caldas Brito Vieira, V. (1999): The German-Brazil "WAVES" project: Investigations of drinking water quality in northeast Brazil.- extended abstract, XXIX Congress International Association of Hydrogeologists, Hydrogeology and Landuse Management, Bratislava, Slovak Republic
- Heinrichs, G., López Gil, M.M., Halm, D., Lang, R. Mörtl, S. (1999): Application of the modular water balance model WARIG in the focus area of Picos, Piauí – WAVES program in northeast Brazil.- Tagungsband, Deutscher Tropentag 1999, October 14-15, 1999, Berlin.
- Hydroisotop (1996): Wasserverfügbarkeit im semi-ariden Nordosten Brasiliens, Projektbereich Hydrologie/Isotopenhydrologie, Untersuchungen zur Wasserqualität, zur Wasserverfügbarkeit und zur aktuellen Nutzung sowie Erarbeitung eines Beitrages zur Entwicklung eines Wassermanagementkonzeptes.- Abschlußbericht, Vorphase WAVES, BMBF-PTUSF.
- Stute, M., Forster, M., Frischkorn, H., Serejo, A., Clark, J.F., Schlosser, P., Broecker, W.S. and Bonani, G. (1995) Cooling of tropical Brazil (5°C) during the last glacial maximum Science (269) 379 – 383.
- Voerkelius, S., López Gil, M.M., Alves Semrau, L. (1999): Water management and waterquality investigations in Picos/Piauí and Tauá/Ceara – WAVES program in northeast Brazil.- Tagungsband, Deutscher Tropentag 1999, October 14-15, 1999, Berlin.

## 2.6.2 Zitierte Literatur

- Audry, P., Suassuna, J. (1995): A salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação no sertão nordestino - caracterização, variação sazonal, limitações de uso. 128 p., Recife.
- de Barros Oliveira, S. P., Batista, J.J. (1998): Influência do índice aridez e da litologia nos processos de salinização das águas do aquífero fissural na região semi-árida do Nordeste. CD, X Cong. Bras. de Águas Subter. 9 a 11 de Setembro 1998, ABAS, São Paulo, 13p.
- BGR/SUDENE (1976): Pesquisas Hidrogeológicas, Pedológicas e Agro-Econômicas para o Aproveitamento da Região centro-l'este do Piauí Recife (Missão Hidrogeológica Alem., Departamento de Recursos Minerais).
- Billib, M. (1997): Analyse und stochastische Simulation intermittierender Abflüsse in semi-ariden Gebieten. Mitt. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 85, Hannover, Germany. 247pp.
- BMZ (1998): Wasser, eine Ressource wird knapp.- Bundesminist. für Zusammenarbeit, Bonn.
- Bronstert, A. (1994): Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. IHW 46: 192 S., Karlsruhe.
- Cavalcante, J.C. et al. (1983): Mapa Geológico do Estado do Ceará, Escala 1:500000. Fortaleza, MME/DNPM/CEMINAS/SUDENE
- CEPRO/IBGE (1990): Atlas. Estado do Piauí. Rio de Janeiro
- CEPRO (1992): Perfil dos Municípios Piauienses Fund. Centro de Pesquisas Economia e Sociais do Piauí Teresina 492 p

- Chiang, W.H., 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.
- Costa, W. D. et al. (1998): Barragem subterrânea: uma forma eficiente de conviver com a seca. CD, X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas 9 a 11 de Setembro 1998, ABAS, São Paulo, 10 p.
- CPRM (1993): Programa de água subterrânea para a região nordeste, Projeto Hidrogeológico do Piauí, Picos-Perfil Hidrogeológico do Município.- Série Hidrogeológica Informações básicas, Vol.11, 28 S.; Teresina.
- CPRM (1998): Diagnóstico do município de Tauá. Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará, 15 p. CPRM-Fortaleza, Brazil.
- DHME-SEAAB (1997): Model de Gestão dos recursos Hídricos da bacia do Rio Guaribas. Projecto BRA/IIICA-95/004, Parte I und II, Governo do Estado do Piauí, Teresina
- DHME (1998): Governo do Estado do Piauí, Secretaria de Agricultura, Departamento de Hidrometeorologia: Dados pluviométricos. Teresina.
- DVWK (1991): Wasserwirtschaftliche Meß- und Auswerteverfahren in Trockengebieten. DVWK-Schriften, Heft 96, pp.84-143.
- Ellis, K.V. (1991): Water disinfection: A review with some consideration of the requirements of the Third World. Crit. Rev. Environ.Control 20(5-6) 341-407.
- Frank, W. H., Schwarz, D. (1966): Zur Geschichte der künstlichen Grundwasseranreicherung. Veröff. der Hydrologischen Forschungsabteilung der Dortmunder Stadtwerke AG 9: 7-26.
- Fröhlich, K. et al. (1987): Isotopenhydrologische Methoden zur Begutachtung von Grundwasser in Trockengebieten-Entwicklung eines Instrumentariums für die Beurteilung gefährdeter Vorkommen.- Forschungsberichte des Bundesministeriums für Wirtschaftliche Zusammenarbeit, Band 85, 65-77.
- Geyh, M. A., Kreysing, K. (1973): Sobre a idade das águas subterrâneas no polígono das secas do Nordeste do Brasil. Rev. Brasil. Geosciênc. 3/1: 53-58, São Paulo
- Ginzel, G. (1992): Beitrag zur hydrogeologischen Erkundung von Vorhaben der künstlichen Grundwasseranreicherung. Diss., Fakul. für Bau-, Wasser-, Forstw. der TU Dresden, 111 S.
- Hörmann, G. (1996): SIMPEL- ein einfaches, benutzerfreundliches Bodenwassermodell zum Einsatz in der Ausbildung.- Dtsch. Gewässerkundl. Mittl., 41, 2, pp.67-72.
- Hütter, L.A. (1990): Wasser und Wasseruntersuchung. Verlag Otto Salle und Sauerländer. Frankfurt, Aarau, Salzburg.
- Hydrotec (1994): Informationsmaterial zum Programm NASIM, Demoversion.- Aachen
- Kolsky, P.J., Blumenthal, U.J. (1995): Environmental health indicators and sanitation-related disease in developing countries: limitations to the use of routine data sources. Rapp.trimest. statist. Sanit. Mond., 48, 132-139
- Kreditanstalt für Wiederaufbau (1997): Entwicklungszusammenarbeit braucht einen langen Atem. Tinajones- ein Bewässerungsprojekt in Peru, Frankfurt /Main, Mai
- Kreysing, K. (1976): Hydrogeologische Forschungsarbeiten im Kristallin NE-Brasiliens. Münster. Forsch. Geol. Paläont. 38/39: 89-98.
- Lanna, P.A., Schwatzbach, M. (1988): MODHAC-Modelo Hidrológica Auto-Calibrável. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.
- Lloyd B.J. et al. (1989): The relationship between water related disease and water quality with particular reference to urban water supply in a developing country. Water Sci. Technol. 21(6-7) 579-91.
- McDonald, M.C., Harbaugh, A.W. (1988). MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. U.S. Geol. Survey. Open-file report 83-875, Chap. A1.
- Moe, C.L. et al. (1991): Bacterial indicators of risk of diarrhoeal disease from drinking water in

the Philippines. Bull. World Health Organ. 69 (3)305-17.

Moser, H., Rauert, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie in: Matthess, G. (Hrsg.) Lehrbuch der Hydrogeologie.- Gebrüder Bornträger Berlin Stuttgart.

Quirós, R.M. (1996): Rural water supplies that work, endure and reach the poor: lessons from Ceará, Brazil. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology.

Rehm, J. (1990): Handbuch der Landwirtschaft und Ernährung in den Entwicklungsländern Band 3, Grundlagen des Pflanzenbaues in den Tropen und Subtropen, Stuttgart.

Sarmiento, F.J. (1997). Ermittlung des Wasserdargebotes für die Wasserwirtschaftsplanung im Nordosten Brasiliens. Thesis University of Hanover, FB Bauingenieur und Vermessungswesen. Hanover Germany. 268 pp.

Soares Filho, A.R. (1997), Programa de água subterranea para a região nordeste, Projeto Hidrogeológico do Piauí, Perfil hidrogeológico do município Picos. CPRM-Reste, Teresina-PI, Brazil. 29pp.

USDA ed. (1972). SCS- National engineering handbook. Section 4: Hydrology. USDA. Washington, Reprinted March 1985.

Verhagen, B., Th., Butler, M., J., van Rensburg, H., J. (1999): Report to IAEA-CRP: Isotope response to the dynamic changes in groundwater systems due to long-term exploitation. Vienna 8-12 November 1999: Long-term isotope series and the hydrological model of Jwaneng mine northern well field.

WASY (1996): Informationsmaterial zum Programm GRM.- Berlin.

World Health Organization (1984): Guidelines for drinking-water quality. Volume I, recommendations; Genf.

World Health Organization (1995): Technical documents prepared for the second technological consultation on integrated rural water management, Genf.

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

Bis Ende 1999 ist das von uns verfolgte Arbeitsprogramm bisher ohne größere Probleme abgelaufen, abgesehen von den Verzögerungen, die durch den verspäteten Beginn der Förderung unserer brasilianischen Partner entstanden sind. Probleme treten bei der Geländearbeit auf, da hier mit einem verstärkten Einsatz der brasilianischen Partner während der Regenzeiten gerechnet wurde, was aber aufgrund von fehlenden Reisemitteln nur in geringerem Umfang als geplant geschieht.

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

Über die in angegebenen Publikationen und Daten hinaus wurden keine Ergebnisse Dritter genutzt.

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

Es wurden keine Erfindungen gemacht. Es wurden keine Schutzrechte angemeldet.

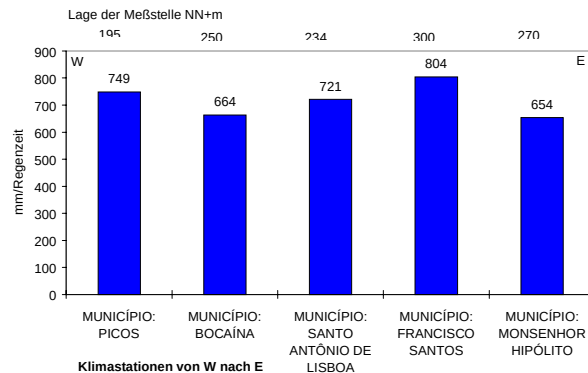
## Anhang

### Anhang 1:

#### Auswertung von Klimadaten, Versuch einer Regionalisierung von Niederschlägen

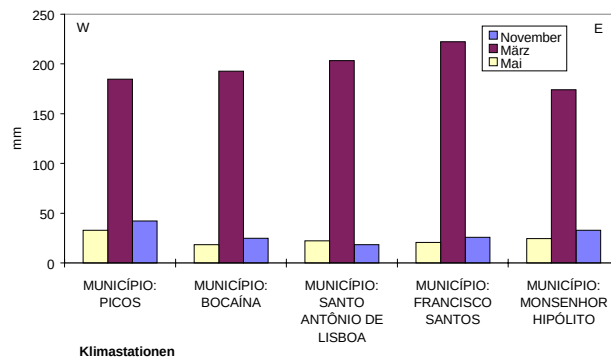
a) Niederschlagsmittel über 14 Regenzeiten (November 1984- Mai1997) für fünf E-W-verteilte Klimastationen die auf möglichst gleicher geographischer Breite im WARIG-Einzugsgebiet liegen.

⇒ Kein genereller E-W-Trend



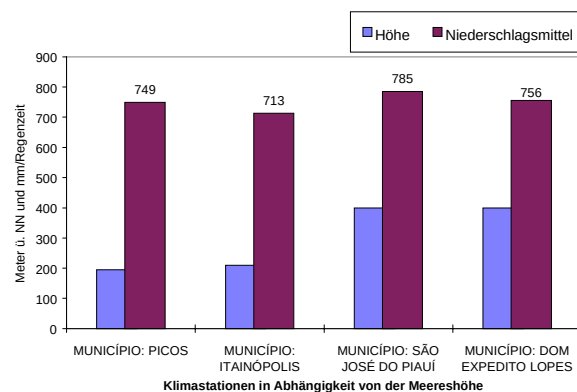
b) Monatliche Niederschlagsmittel über 14 Jahre (1984-1997) von E-W-verteilten Klimastationen im WARIG-Einzugs-gebiet für die Monate November (Beginn der Regenzeit), März (Höhepunkt der Regenzeit) und Mai (Ende der Regenzeit).

⇒ Kein E-W-Trend bezogen auf einzelne Niederschlagsperioden



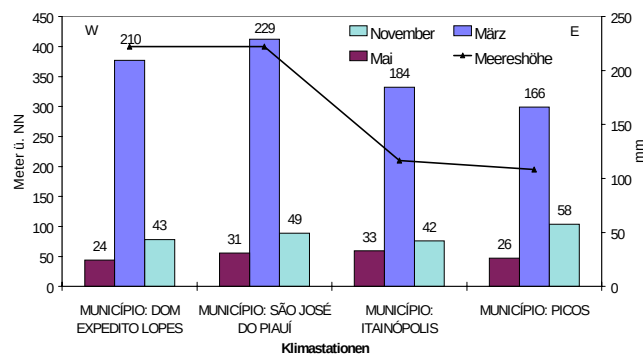
c) Niederschlagshöhen über 14 Regenzeiten (November 1984-Mai 1997) von Klimastationen im WARIG-Einzugsgebiet mit ähnlicher geographischer Länge in Abhängigkeit von der Meereshöhe.

⇒ Keine generelle Abhängigkeit von der Höhenlage



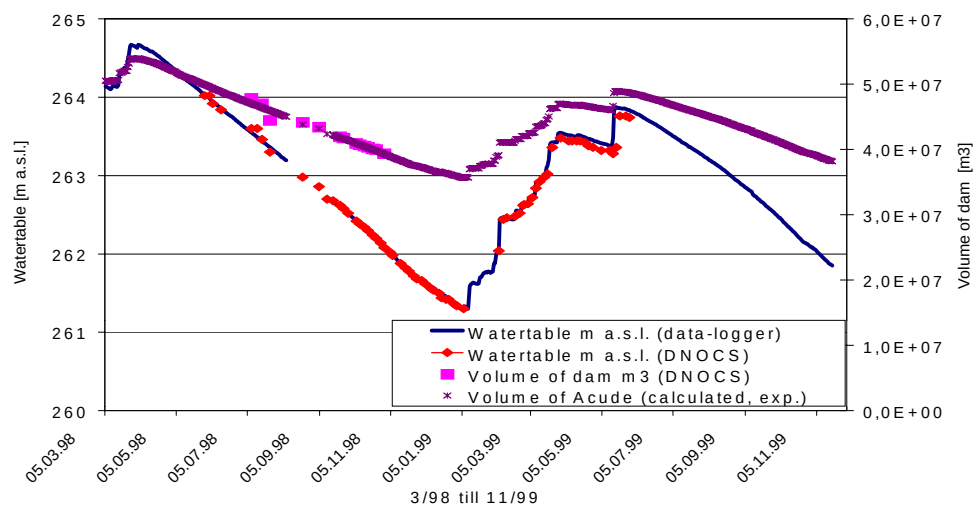
d) Monatliche Niederschlagsmittel über 14 Jahre (1984-1997) von Klimastationen in Abhängigkeit von der Meereshöhe im WARIG-Einzugsgebiet für die Monate November (Beginn der Regenzeit), März (Höhepunkt der Regenzeit) und Mai (Ende der Regenzeit)

⇒ keine eindeutige Abhängigkeit einzelner Niederschlagsperioden von der Höhenlage

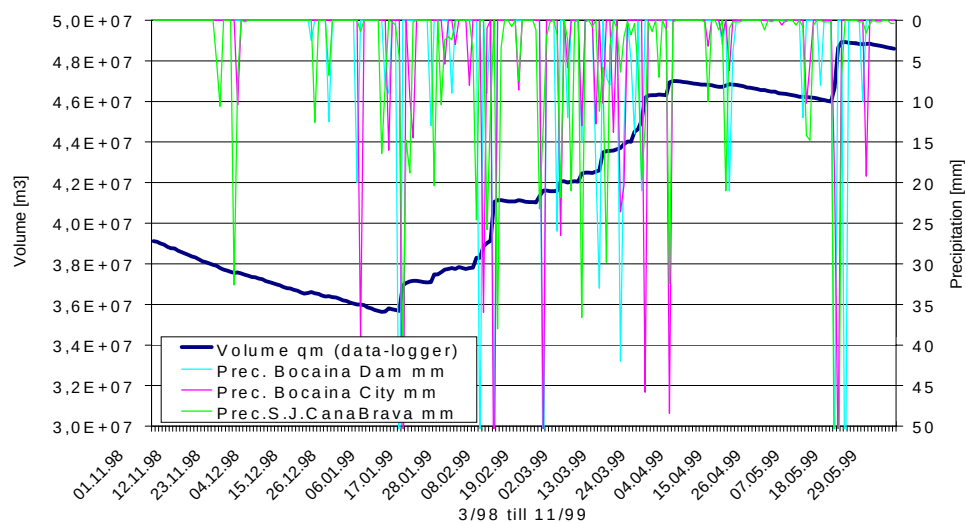


## Anhang 2: Niederschlags-Abflussbeziehung Bocaina Einzugsgebiet

### a) Wasserspiegel und Volumen des Bocaina-Stausees

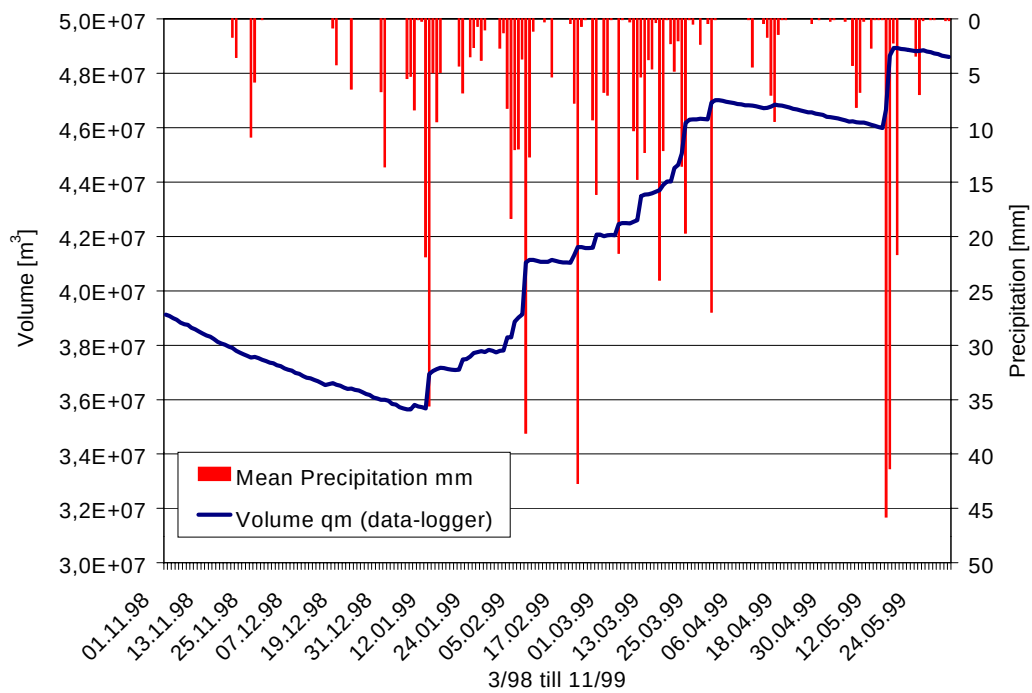


### b) Niederschlagsaufzeichnungen von drei Regensammlern im Bereich des Bocaina-Stausees mit dem Volumenverlauf des Stausees

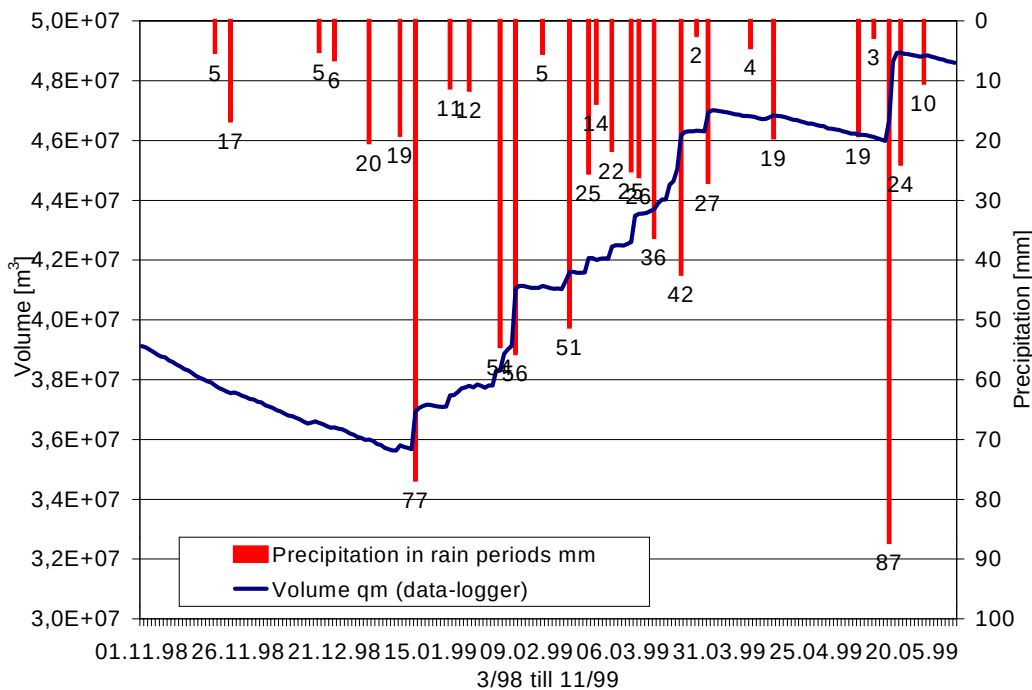




c) Mittlere Niederschläge im Bereich des Stausees mit dem Volumenverlauf des Stausees



d) Bildung von mittleren Niederschlagsperioden mit Angabe der Niederschlagsmengen und der Volumenaufzeichnung des Stausees

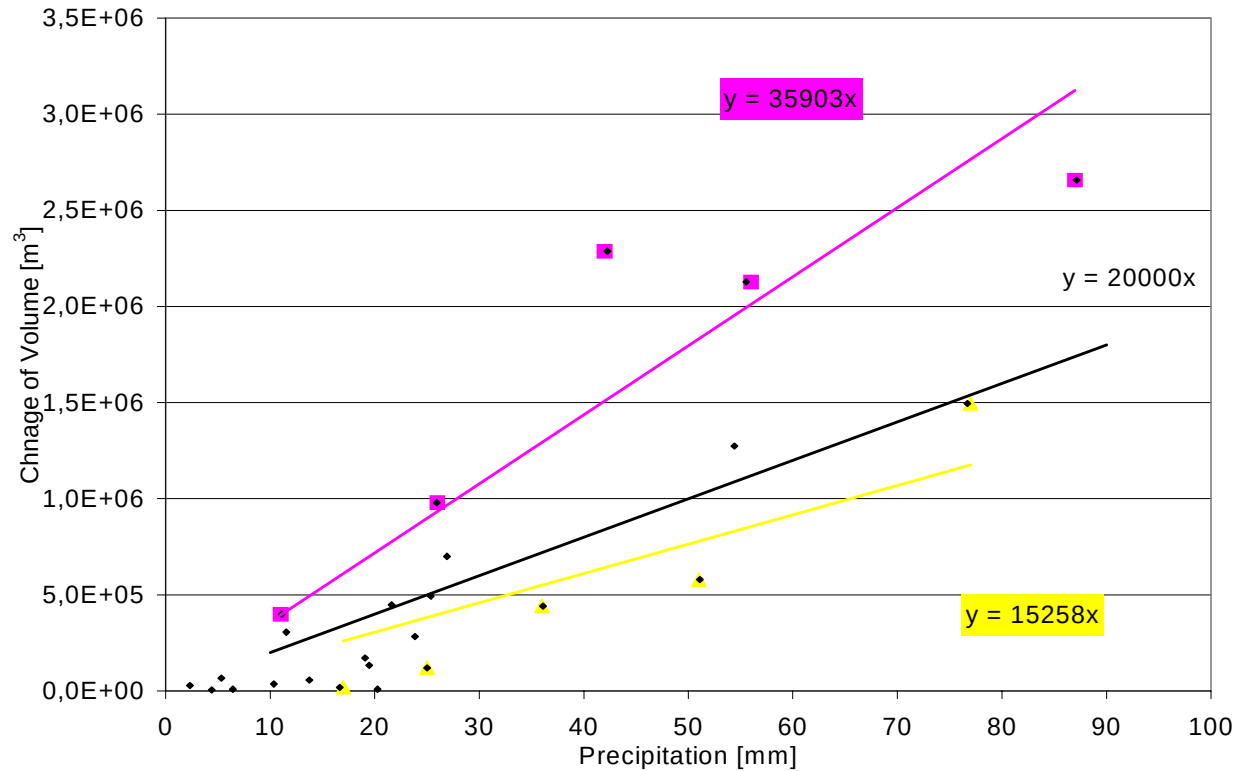


e) Beziehung zwischen den Niederschlagsperioden und den Volumenänderungen im Stausee

schwarz: mittlere Beziehung mit allen Regenperioden

lila: Beziehung von kurzen Starkniederschläge

gelb: Beziehung von längeren Regenperioden mit geringer Niederschlagsintensität



### Anhang 3:

#### Bodenbeschreibung für die HILLFLOW-Simulation

##### Areia Quartzosa:

120 cm mächtiger Decksand auf Chapada, Bodenart: bis 50 cm Tiefe LS, ab 50 cm SL. Tongehalt zwischen 8 und 12 %. Der Areia Quartzosa ist sandiger und daher poröser als der Latossolo Amarelo Vermelho. Sättigungswassergehalt zwischen 39 Vol % im Oberboden und 34 Vol % im Unterboden. FK zwischen 9 und 12 Vol%.

##### Latossolo Vermelho Amarelo:

120 cm mächtiger Decksand auf Chapada, Bodenart SL im Oberboden, SCL im Unterboden. Tongehalt zwischen 15 und 25 %. Sättigungswassergehalt zwischen 34 und 36 Vol%, FK zwischen 12 und 15 Vol%.

##### Solo Litólico:

35 cm mächtige Sandauflage über verwittertem Sandstein. Bodenart LS-SL. Tongehalt um 10 %. Sättigungswassergehalt 39-41 Vol%. Sandsteinunterlage wurde als sandiger C-Horizont mit geringer Leitfähigkeit implementiert.

##### Podzólico vermelho Amarelo, geschichtet:

30 cm mächtige Sandauflage (SL) über lehmig-tonigem Unterboden (L-CL). Tongehalt 9-15 % in Sandauflage, 36-47 % im Unterboden. Sättigungswassergehalt: 40 Vol% im Ober-, 32 Vol% im Unterboden. FK 12 Vol% im Ober- und 45 Vol% im Unterboden.

##### Podzólico vermelho Amarelo, erodiert, ungeschichtet:

Gesamtprofil lehmig-tonig (L-CL). Tongehalt 36-47 %. Sättigungswassergehalt: 32 %, FK 45 Vol%.

#### Ergebnisse der HILLFLOW Simulation

**Tabelle 1:** Bodenwasserbilanz für Areia Quartzosa (in % Gesamtniederschlag)

| (mm)                   | Maniok | Caatinga | Gras | ohne Vegetation. |
|------------------------|--------|----------|------|------------------|
| Niederschlag           | 100    | 100      | 100  | 100              |
| Interzeption           | 16     | 14       | 9    | 0                |
| Oberflächen-Abfluß     | 0      | 0        | 0    | 0                |
| Interflow              | 0      | 0        | 0    | 0                |
| Sickerung am unt. Rand | 24     | 18       | 26   | 70               |
| Tra                    | 46     | 56       | 45   | 0                |
| Eva                    | 10     | 9        | 13   | 17               |
| ETa (ges.)             | 56     | 65       | 58   | 17               |

**Tabelle 2:** Bodenwasserbilanz für Latossolo Vermelho Amarelo (in % Gesamtniederschlag)

| (mm)                   | Maniok | Gras | ohne Vegetation |
|------------------------|--------|------|-----------------|
| Niederschlag           | 100    | 100  | 100             |
| Interzeption           | 16     | 9    | 0               |
| Oberflächen-Abfluß     | 0      | 0    | 0               |
| Interflow              | 0      | 0    | 0               |
| Sickerung am unt. Rand | 5      | 6    | 57              |
| Tra                    | 56     | 55   | 0               |
| Eva                    | 11     | 15   | 17              |
| Eta (ges.)             | 67     | 70   | 17              |

**Tabelle 3:** Bodenwasserbilanz für Solo Litólico (in % Gesamtniederschlag)

| (mm)                   | Caatinga | Gras | Ohne Vegetation |
|------------------------|----------|------|-----------------|
| Niederschlag           | 100      | 100  | 100             |
| Interzeption           | 18       | 17   | 0               |
| Oberflächen-Abfluß     | 0        | 0    | 0               |
| Interflow              | 0,5      | 0,6  | 0,8             |
| Sickerung am unt. Rand | 29       | 35   | 64              |
| Tra                    | 29       | 24   | 0               |
| Eva                    | 18       | 16   | 22              |
| ETa (ges.)             | 47       | 40   | 22              |

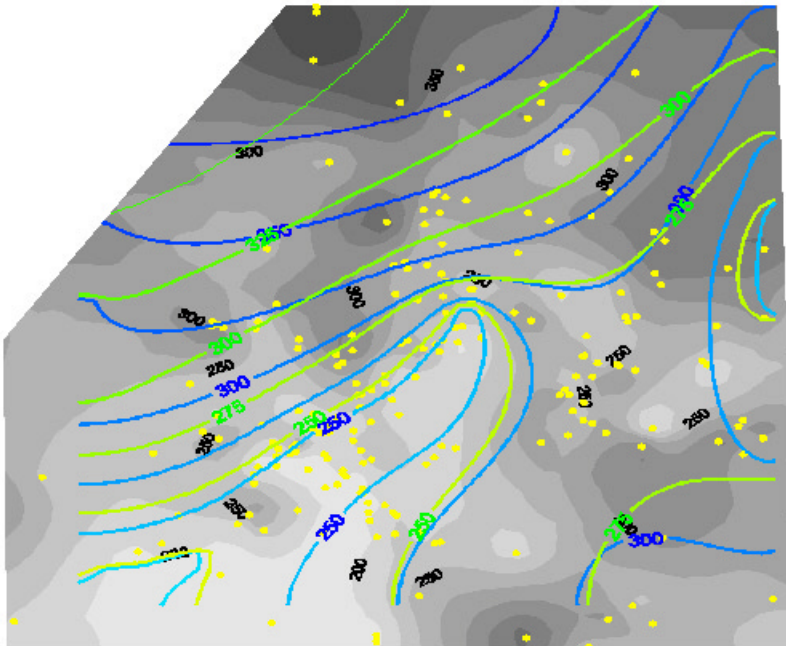
**Tabelle 4:** Bodenwasserbilanz für Podzólico Vermelho Amarelo, geschichtet  
(in % Gesamtniederschlag)

| (mm)                   | <b>Caatinga</b> | <b>Gras</b> | <b>ohne Vegetation</b> |
|------------------------|-----------------|-------------|------------------------|
| Niederschlag           | 100             | 100         | 100                    |
| Interzeption           | 18              | 17          | 0                      |
| Oberflächen-Abfluß     | 0               | 0           | 0                      |
| Interflow              | 4               | 4           | 7                      |
| Sickerung am unt. Rand | 7               | 13          | 54                     |
| Tra                    | 58              | 53          | 0                      |
| Eva                    | 16              | 15          | 22                     |
| Eta (ges.)             | 74              | 68          | 22                     |

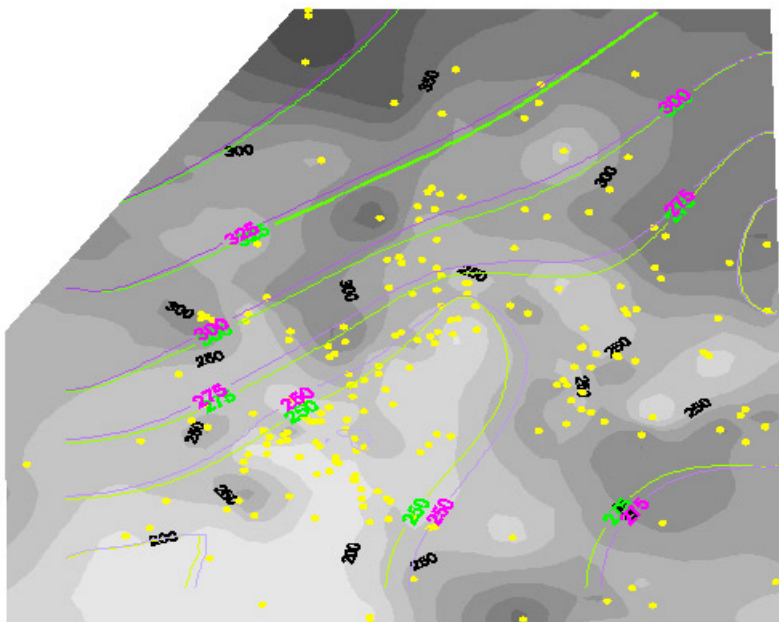
**Tabelle 5:** Bodenwasserbilanz für Podzólico Vermelho Amarelo, erodiert, ungeschichtet (in % Gesamtniederschlag)

| (mm)                   | <b>Caatinga</b> | <b>Gras</b> | <b>ohne Vegetation</b> |
|------------------------|-----------------|-------------|------------------------|
| Niederschlag           | 100             | 100         | 100                    |
| Interzeption           | 18              | 17          | 0                      |
| Oberflächen-Abfluß     | 17              | 18          | 26                     |
| Interflow              | 0               | 0           | 0                      |
| Sickerung am unt. Rand | 13              | 13          | 35                     |
| TRa                    | 20              | 21          | 0                      |
| EVa                    | 18              | 17          | 22                     |
| ETa (ges.)             | 38              | 37          | 22                     |

## Anhang 4: Grundwassermodell



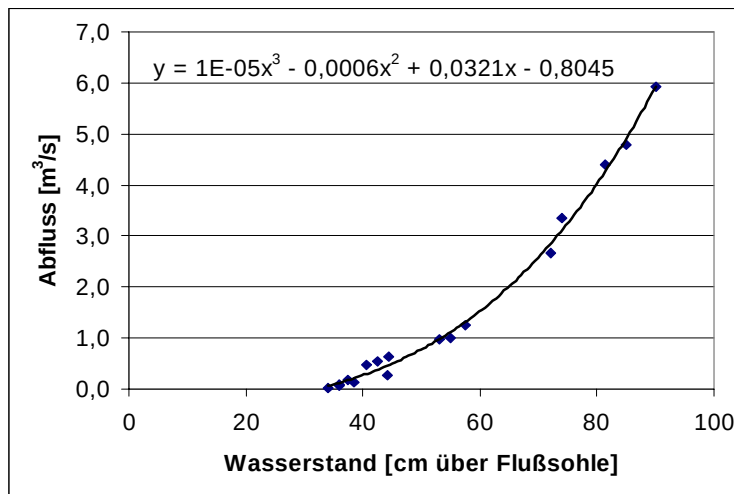
a) Vergleich der Grundwasserspiegelpläne Fokusregion Picos: Gelbe Punkte (nach CPRM-Daten) sind Brunnen im Serra Grande Aquifer mit denen der Grundwasserspiegel (Grau) berechnet wurde, Wasserspiegel aus Grundwassermodell mit 30 mm Grundwasserneubildung (Blau), Wasserspiegel aus Grundwassermodell mit 10 mm Grundwasserneubildung (Grün)



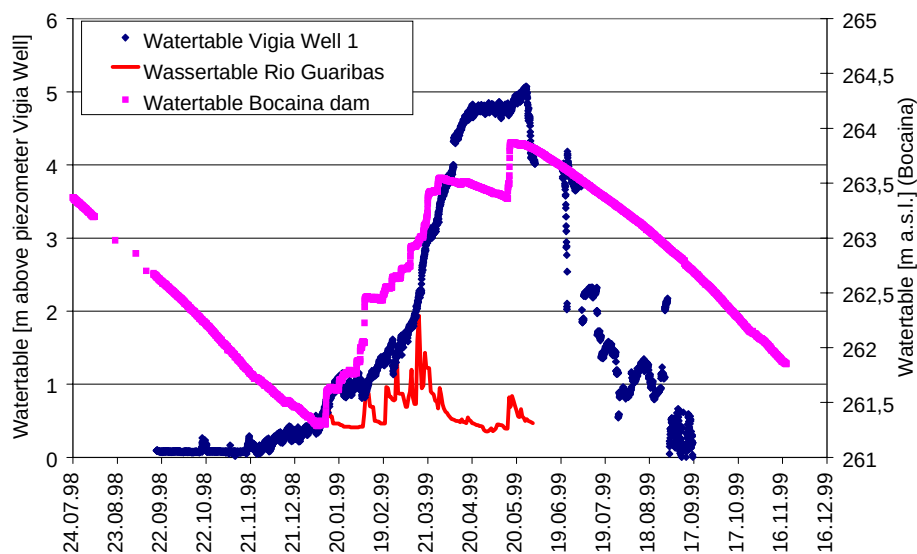
b) Vergleich der Grundwasserspiegel Fokusregion Picos: Gelbe Punkte (nach CPRM-Daten) sind Brunnen im Serra Grande Aquifer mit denen der Grundwasserspiegel (Grau) berechnet wurde, Wasserspiegel aus Grundwassermodell mit 10 mm Grundwasserneubildung (Grün) ohne Brunnenentnahmen, Wasserspiegel aus Grundwassermodell mit 10 mm Grundwasserneubildung (Lila) mit etwa 450 m³ /s Entnahmen aus Brunnen im Bereich von Picos

## Anhang 5: Monitoring

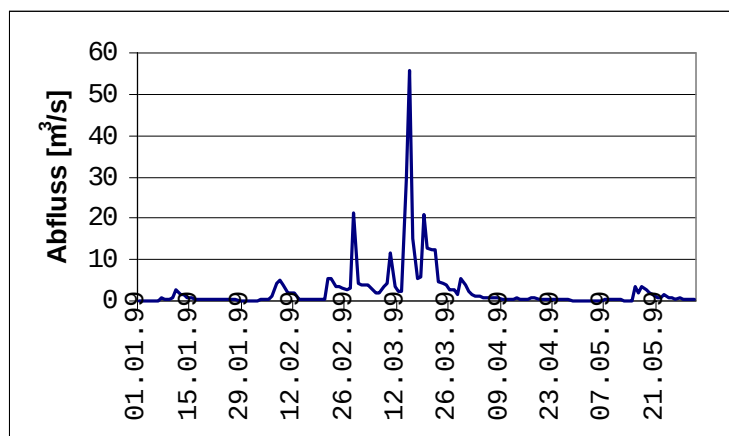
- a) Beziehung Wasserstand-Abfluss am Beispiel der Messstelle Angical, Grundlage für Abflussberechnungen



- b) Wasserspiegelvergleich: in einem Brunnen in der Talaue bei Angical-Vigia, im Rio Guaribas bei Angical, zum Vergleich im Bocaina-Stausee

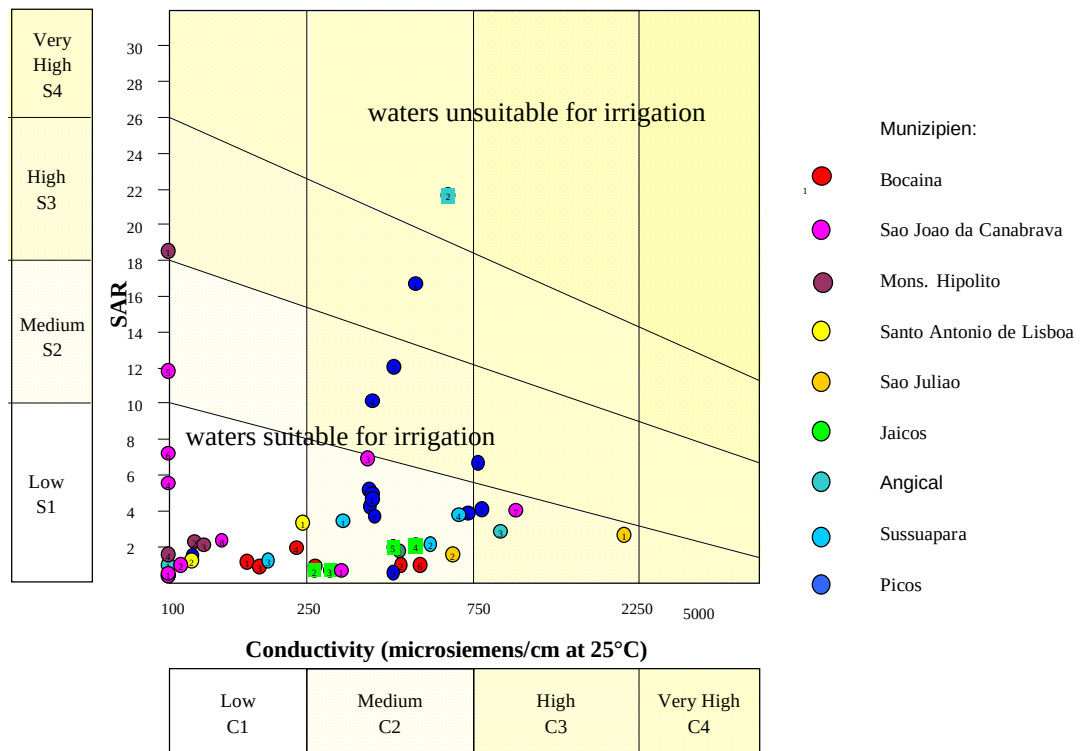


- c) Abfluss bei der Messstelle Angical, Ausfluss des Rio Guaribas aus dem Munizip Picos gemessen Regenzeit 1999, Gesamtabfluss:  $33 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$

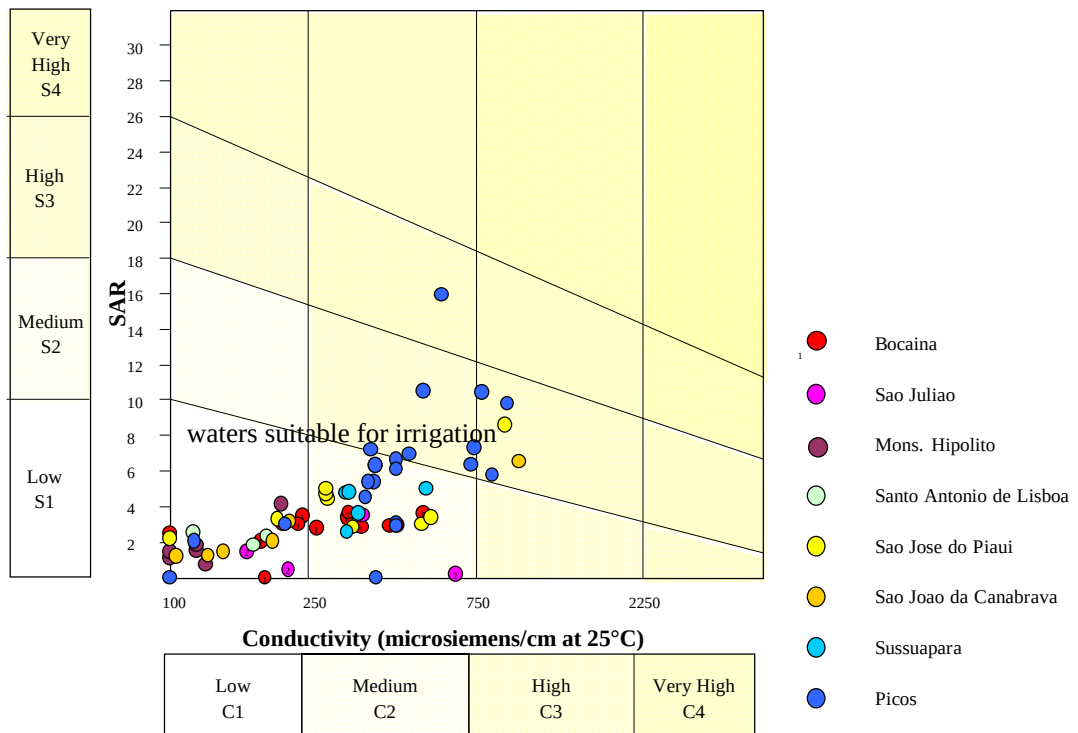


## Anhang 6: Qualität der Grund- und Oberflächenwässer des Fokusgebietes Picos

Klassifizierung der Grund- und Oberflächenwässer des Focusgebiets Picos  
nach dem US-SAR-Index (Wasserproben vom September 98)

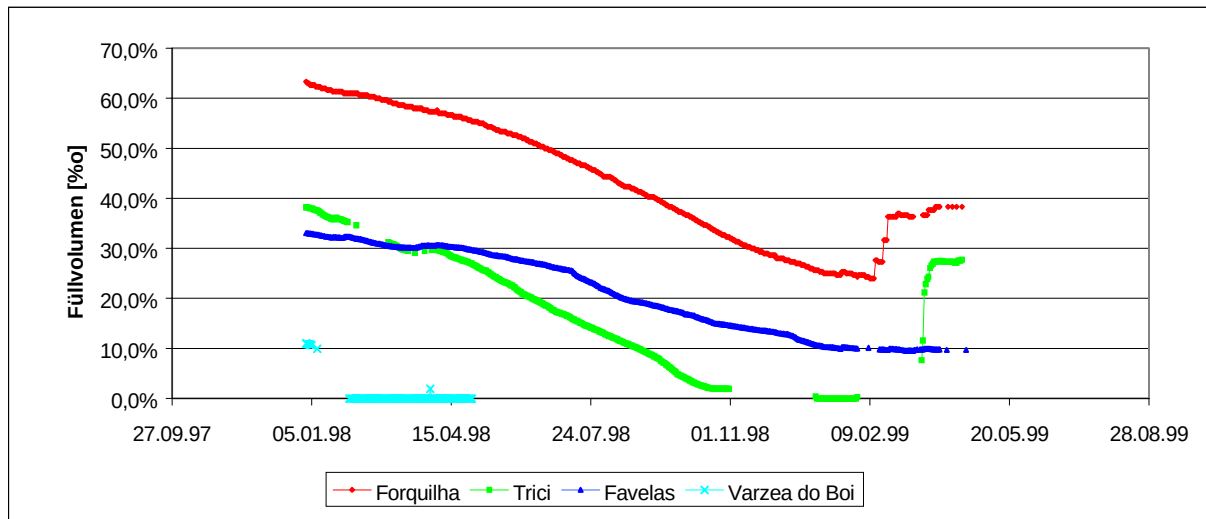


Klassifizierung der Grund- und Oberflächenwässer des Focusgebiets Picos  
nach dem US-SAR-Index (Wasserproben vom November 98)

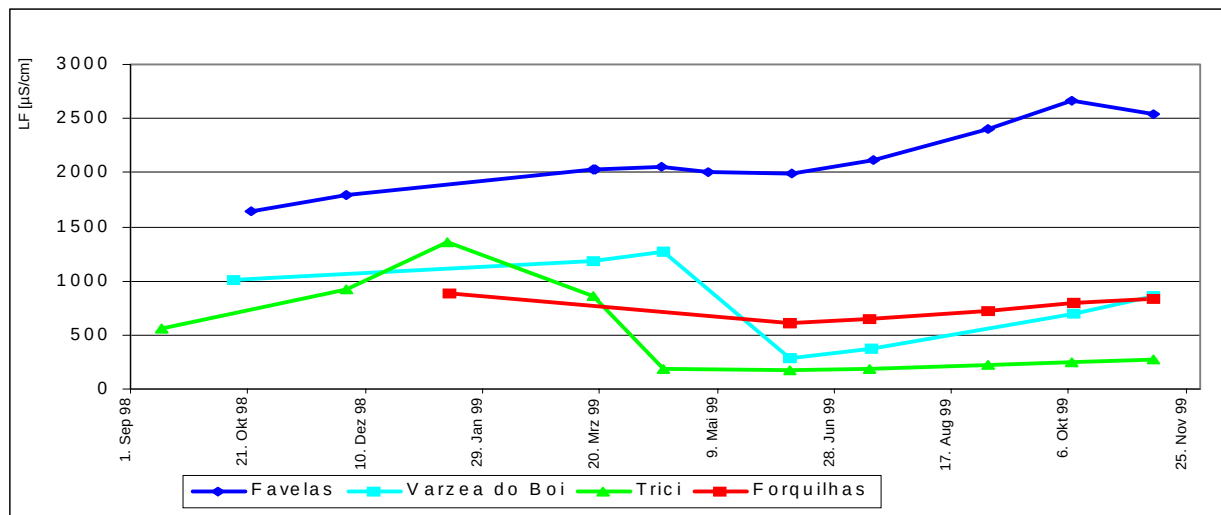




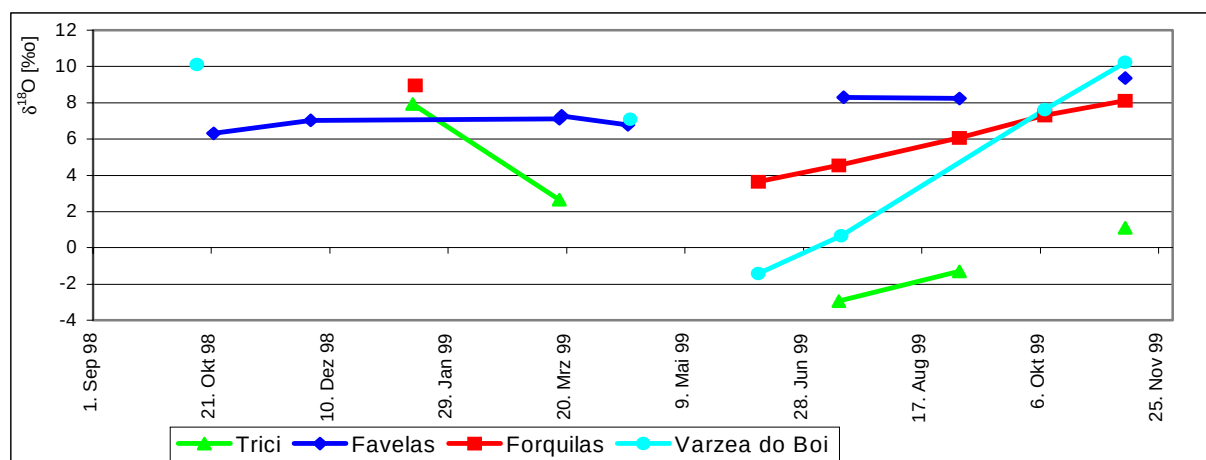
## Anhang 7: Versalzungsproblematik im Fokusgebiet Tauá



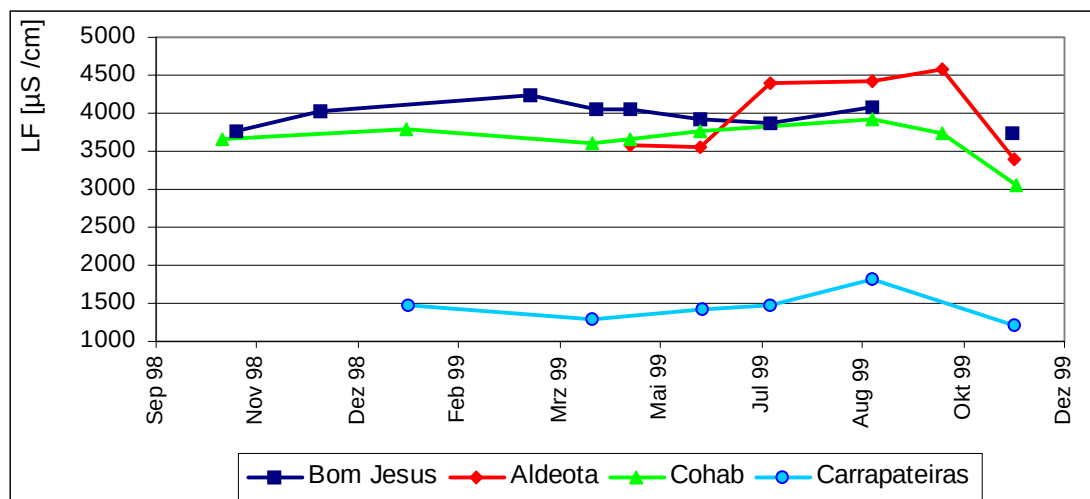
a) Füllvolumen der Stauseen im Zeitbereich 1998 bis 1999



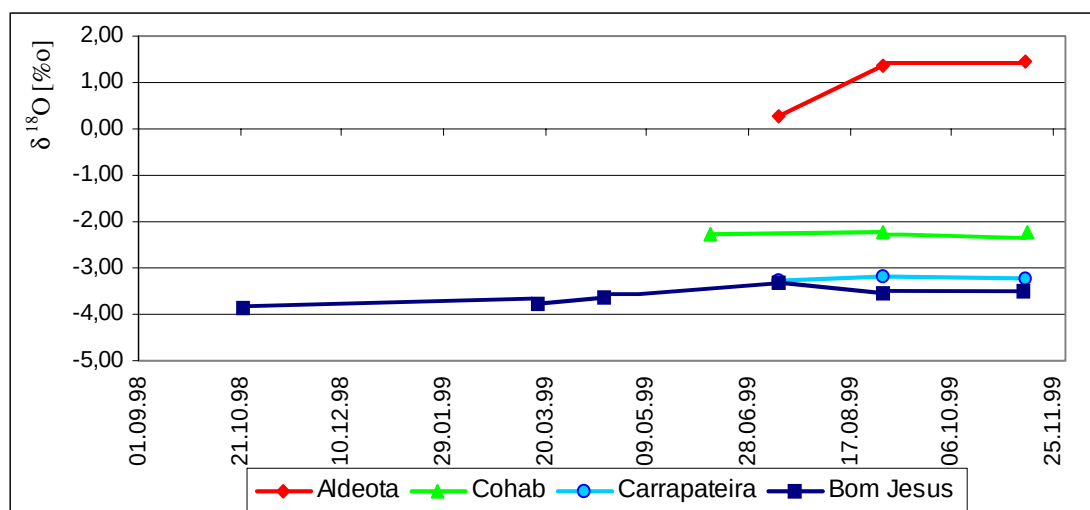
b) Verlauf der Werte der spez. elektrischen Leitfähigkeit in den Wässern der Stauseen von Tauá im Zeitbereich 1998 bis 1999



c) Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den Wässern der Stauseen von Tauá im Zeitbereich 1998 bis 1999

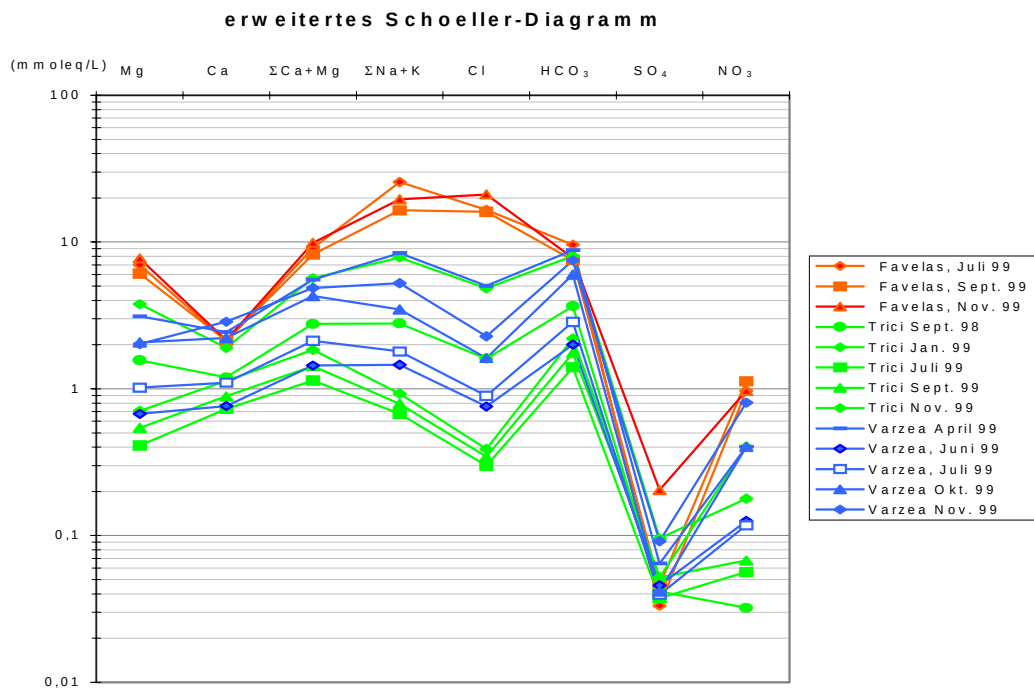


d) Verlauf der Werte der spez. elektr. Leitfähigkeit in den Grundwässern ausgewählter Brunnen im Fokusgebiet Tauá im Zeitbereich 1998 bis 1999

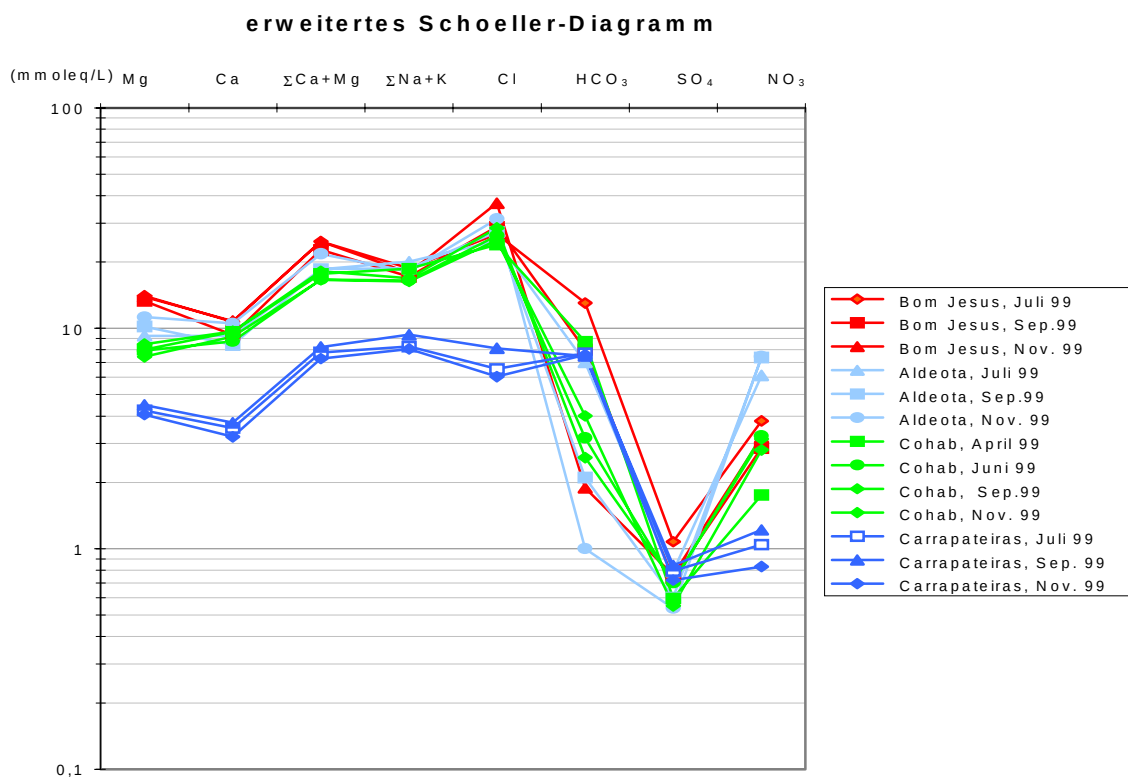


e) Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}$ -werte in den Grundwässern ausgewählter Brunnen im Fokusgebiet Tauá im Zeitbereich 1998 bis 1999

## Anhang 8: Wasserchemie der Stauseewässer und Brunnenwässer in Tauá



a) Darstellung der hydrochemischen Zusammensetzung der Wässer der Stauseen Acude Favelas, Acude Trici und Acude Várzea do Boi in Tauá im Schoeller-Diagramm



b) Darstellung der hydrochemischen Zusammensetzung der Grundwässer der Brunnen Aldeota, Cohab, Carrapateiras und Bom Jesus im Fokusgebiet Tauá im Schoeller-Diagramm