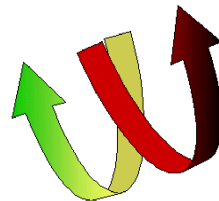


**WASSERVERFÜGBARKEIT SOWIE ÖKOLOGISCHE, KLIMATISCHE UND  
SOZIOÖKONOMISCHE WECHSELWIRKUNGEN IM SEMIARIDEN  
NORDOSTEN BRASILIENS**



**WAVES**

**Verbundprojekt WAVES  
Statusbericht der ersten Hauptphase**

**Fachbereich Wasser  
Arbeitsgruppe Großskalige hydrologische Modellierung**

Zuwendungsempfänger: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Projektleiter: Dr. F.-W. Gerstengarbe

Förderkennzeichen: 01 LK 97121

Vorhabenbezeichnung: Großskalige hydrologische Modellierung  
im Verbundprojekt WAVES

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.1997 - 31.07.2000

Berichtszeitraum: 01.08.1997 - 31.12.1999

Bearbeitung: Dipl.-Hydr. A. Güntner  
Prof. Dr. A. Bronstert

Potsdam, den 1. Februar 2000  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK)  
Telegrafenberg, Postfach 601203, 14412 Potsdam

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung / Summary</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand des Vorhabens</b> .....	<b>2</b>
2.1 Einleitung und Fragestellung des Teilprojekts.....	2
2.2 Methodisches Vorgehen .....	2
2.2.1 Übersicht zur Modellkonzeption .....	2
2.2.2 Modellansätze Einzugsgebietsskala - Stauhaltung und Abflussrouting .....	3
2.2.3 Modellansätze von der Einzugsgebietsskala zur Hangskala .....	4
2.2.4 Modellansätze Punktskala .....	9
2.2.5 Besonderheiten von HYMO-WA als Modul der Integrierten Modellierung .....	11
2.2.6 Zeitliche Disaggregation von Niederschlagszeitreihen .....	11
2.3 Datenbearbeitung und Modellparametrisierung .....	12
2.3.1 Klimaelemente .....	12
2.3.2 Topographie und Gewässernetz .....	12
2.3.3 Geomorphologie und Böden .....	13
2.3.4 Vegetation .....	13
2.3.5 Stauseen .....	14
2.4 Ergebnisse der Modellanwendung .....	15
2.4.1 Makroskala (Ebene der Bundesstaaten) .....	15
2.4.2 Mesoskala (Munizipien / Teileinzugsgebiete) .....	15
2.4.3 Mikroskala (Testgebiet Tauá) .....	18
2.4.4 Simulation der Auswirkungen eines Klimaszenarios auf die Wasserverfügbarkeit .....	19
2.4.5 Disaggregation von täglichen Niederschlagszeitreihen .....	20
2.5 Diskussion .....	21
2.6 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern.....	22
2.7 Bibliographie .....	23
2.7.1 Eigene Publikationen .....	23
2.7.2 Zitierte Literatur.....	23
<b>3 Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung und     Ausblick</b> .....	<b>26</b>
<b>4 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind</b> .....	<b>26</b>
<b>5 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten</b> .....	<b>26</b>

## 1 Zusammenfassung / Summary

Für die Skale der Bundesstaaten Piauí und Ceará wurde ein deterministisches, räumlich differenzierendes, hydrologisches Modell zur Quantifizierung der Wasserressourcen in Oberflächengewässern und der Bodenfeuchte entwickelt. Eine auf Einzugsgebiete ausgerichtete Modellversion (Diskretisierungseinheiten sind Teileinzugsgebiete) und eine für die Einbindung in die Integrierte Modellierung kompatible, auf administrative Grenzen ausgerichtete Modellversion (Diskretisierungseinheiten sind Munizipien) wurden erstellt. Ein neuartiges Hydrotopkonzept wurde entwickelt, das bei der räumlichen Abgrenzung von Modellierungseinheiten an lateralen Fließprozessen ausgerichtet ist. Das darauf aufbauende hierarchische, geomorphologisch begründete Disaggregationsschema verbindet vertikale und laterale Prozesse auf ihren jeweils typischen Skalenbereichen von der Punkt- bis zur Einzugsgebietsskala. Charakteristische Bedingungen des semiariden Untersuchungsraumes sowie die grobe Datenverfügbarkeit werden berücksichtigt. Alle erforderlichen Modellparameter werden von physiographischen Datensätzen abgeleitet, die für die gesamtstaatliche Ebene in Zusammenarbeit mit anderen WAVES-Arbeitsgruppen aufbereitet wurden. Die vorläufige Validierung des nicht kalibrierten Modells anhand gemessener Abflussdaten ergibt zufriedenstellende Simulationsergebnisse auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen. Zur Untersuchung von zeitlichen Skalenfragen wurde ein für tropische Niederschlagscharakteristika geeignetes, auf multiplikativen Kaskaden basierendes Modell zur Disaggregation täglicher Niederschlagszeitreihen entwickelt. Die weiteren Arbeiten müssen sich verstärkt mit Modellvalidierung und Sensitivitätsuntersuchungen befassen. Entsprechend sind Modellerweiterungen und der Ausbau der Parametrisierung unter Berücksichtigung der Unsicherheiten erforderlich.

### *Summary*

A deterministic, spatially distributed hydrological model for the quantification of surface water resources and of soil moisture was developed for the scale of the Federal States of Piauí and Ceará. One version of the model is based on river basins (using sub-basins as discretization units), another version is based on administrative boundaries (using municipios as discretization units) being compatible to be incorporated into the Integrated Model. An innovative hydrotope concept was developed which is based on lateral water fluxes for the delineation of modelling units. A related hierarchical, geomorphology-based disaggregation scheme links vertical and lateral processes at their respective characteristic scales, ranging from the point to the basin scale. Typical conditions of the semi-arid study area and the limited data availability are taken into account. All required model parameters are derived from physical data sets which were processed for the large scale in cooperation with other working groups in WAVES. The preliminary validation of the non-calibrated model with measured runoff shows satisfactory model simulations at different spatial scales. For the study of temporal scaling issues, a model for disaggregation of daily precipitation time series was developed, being based on multiplicative random cascades and adapted to tropical rainfall characteristics. Ongoing work has to focus on model validation and sensitivity analysis. Corresponding model extensions and amplification of its parameterization are required.

## 2 Stand des Vorhabens

### 2.1 Einleitung und Fragestellung des Teilprojekts

Das Vorhaben *Klimaanalyse/-modellierung und Großskalige hydrologische Modellierung* im Verbundprojekt WAVES wird als ein einheitliches Teilprojekt gefördert. Auf Grund der thematischen Gliederung der WAVES-Statusberichte nach Fachbereichen wird hier der Bericht der *AG Großskalige hydrologische Modellierung* im Fachbereich Wasser getrennt vom Bericht der *AG Klimaanalyse/-modellierung* dargestellt.

Wasserverfügbarkeit ist ein entscheidender Faktor im Geflecht der ökologischen, klimatischen und sozioökonomischen Wechselwirkungen mit Bezug auf Lebensqualität im semiariden Nordosten Brasiliens. Zielsetzung des Teilprojektes ist die Quantifizierung der physischen Wasserverfügbarkeit im großskaligen Maßstab auf der Ebene der beiden Bundesstaaten Piauí und Ceará. Hierzu soll ein räumlich und zeitlich differenziert arbeitendes hydrologisches Modell erstellt werden, das die verschiedenen Komponenten des Wasserkreislaufes abbildet: Bodenfeuchte, Evapotranspiration, Abfluss, Grundwasserneubildung und Speicherung in künstlichen Reservoirs. Der Modellansatz soll so gewählt werden, dass die Auswirkungen möglicher Klima- oder Landnutzungsänderungen auf die Wasserverfügbarkeit abgebildet werden können. Bei der Modellentwicklung sollen insbesondere die spezifischen semiariden naturräumlichen Bedingungen, Skalenfragen, die eingeschränkte Datenverfügbarkeit sowie Daten- und Modellunsicherheiten Berücksichtigung finden.

### 2.2 Methodisches Vorgehen

#### 2.2.1 Übersicht zur Modellkonzeption

Das zur Quantifizierung der physischen Wasserverfügbarkeit auf der Makroskala des WAVES-Projektgebietes erstellte hydrologische Modell HYMO-WA (Hydrological Model for the quantification of Water Availability) ist ein deterministisches, räumlich distribuiertes, konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell. Das Modell arbeitet mit der zeitlichen Auflösung von Tageswerten. Für die räumliche Unterteilung des Untersuchungsraumes in Modellierungseinheiten wurde ein polygonbasiertes *hierarchisches Diskretisierungsschema* entwickelt. In diesem 5 Skalenebenen umfassenden Ansatz können die hydrologischen Prozesse auf der für sie jeweils typischen Skala abgebildet werden. Dies umfasst das Abflussrouting in Teileinzugsgebieten (Kap. 2.2.2), laterale Fließprozesse auf der Hangskala (Kap. 2.2.3) und vertikale Wasserflüsse auf der Punktskala der Bodenprofile (Kap. 2.2.4). Grundlage der Ausweisung von Modellierungseinheiten ist das *Hydrotopkonzept*, also die Abgrenzung von Gebieten mit in sich ähnlichen Eigenschaften hinsichtlich ihrer hydrologischen Reaktion (z.B. Becker & Pfützner 1987, Flügel 1995, Krysanova *et al.* 1999). In HYMO-WA wird jedoch im Gegensatz zu bestehenden Ansätzen in der großskaligen hydrologischen Modellierung das Hydrotopkonzept modifiziert, indem die Ähnlichkeit von Flächen hinsichtlich der lateralen Fließprozesse als Kriterium für die Ausweisung der Hydrotope verwendet wird (siehe Kap. 2.2.3). Das Diskretisierungsschema beruht auf einem *Top-down-Ansatz*, das heißt ausgehend von Teileinzugsgebieten wird der Untersuchungsraum auf den verschiedenen Skalenebenen sukzessive in kleinere Einheiten unterteilt. Einerseits kann so der Grad der Detailliertheit der räumlichen Unterteilung auf die für die Hydrologie relevanten Charakteristika beschränkt werden. Zum anderen erlaubt der Ansatz adäquat mit der geringen Datendichte des Untersuchungsraumes umzugehen, indem räumlich nicht explizite Informationen auf kleineren Skalen in Form von Flächenanteilen oder Verteilungsfunktionen eingebracht werden können.

## 2.2.2 Modellansätze Einzugsgebietsskala - Stauhaltung und Abflussrouting

Mit einer Gesamtzahl von mehr als 8000 Stauseen (Açudes) in beiden Bundesstaaten (Araújo 1999) haben diese einen bedeutenden Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Wasserverfügbarkeit. Die Stauseen werden zur Modellierung in HYMO-WA in Größenklassen aufgeteilt (zu Datenquellen siehe Kap. 2.3).

### *Stauseen mit Speicherkapazität < 50 Mio. m<sup>3</sup>*

Stauseen mit einer Speicherkapazität < 50 Mio. m<sup>3</sup> werden weiter in die 5 Klassen < 0.1, 0.1 - 1, 1 - 3, 3 - 10 und 10 - 50 Mio. m<sup>3</sup> Speicherkapazität eingeteilt um die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen Stauvolumen, Seeoberfläche und Verdunstung für Reservoir unterschiedlicher Größe erfassen zu können. Bekannt ist die Anzahl von Stauseen in einer bestimmten Klasse für jedes Teileinzugsgebiet, jedoch nicht die genaue räumliche Lage innerhalb des Gebietes. Es wird von den Annahmen ausgegangen, dass

- (1) alle Stauseen einer Größenklasse hinsichtlich ihrer Wasserbilanz identisch sind,
- (2) Stauseen kleinerer Volumenklassen jeweils stromaufwärts von Stauseen der nächst größeren Volumenklasse gelegen sind,
- (3) jeder Größenklasse ein gleicher Teil der Gesamtfläche des Teileinzugsgebietes direkt (ohne vorherige Beeinflussung durch Stauseen anderer Größenklassen) als Abfluss beitragende Fläche zugeordnet ist.

Die verschiedenen Größenklassen werden dann im Sinne einer Abflusskaskade miteinander verknüpft. Der in einem Teileinzugsgebiet gebildete und ins Gewässernetz gelangende Gesamtabfluss (Kap. 2.2.3) wird zu je einem Sechstel auf die 5 Klassen aufgeteilt und dem aktuellen Stauvolumen hinzugerechnet. Ein Sechstel des Gesamtabflusses wird als nicht von Stauseen < 50 Mio. m<sup>3</sup> beeinflusst angenommen und fließt ohne Speicherung ab. Wird die Speicherkapazität einer Größenklasse überschritten, fließt das darüber hinausgehende Abflussvolumen der nächst größeren Volumenklasse zu. Der Ausfluss der größten Klasse zusammen mit dem nicht durch Stauseen beeinflussten Abflussvolumen ist der Gesamtabfluss des Teileinzugsgebietes. Evaporation von der Wasseroberfläche wird berechnet mit der potentiellen Verdunstung nach Penman (siehe Kap. 2.2.4) und einer für den Untersuchungsraum mittleren Stauvolumen-Seeoberfläche-Beziehung nach Campos (1996). Als Speicherausfluss wird nur der Abfluss bei Überschreiten der Speicherkapazität betrachtet, da Stauseen dieser Größenklassen in Nordost-Brasilien zumeist keinen Grundablass aufweisen. Versickerung wird vernachlässigt.

### *Stauseen mit Speicherkapazität > 50 Mio. m<sup>3</sup>*

Die Wasserbilanz der 42 im WAVES-Untersuchungsgebiet gelegenen Stauseen mit einer Kapazität > 50 Mio. m<sup>3</sup>, deren Lage auch räumlich explizit bekannt ist, wird unter Nutzung der für jeden Stausee jeweils individuellen Volumen-Seeoberfläche-Beziehung berechnet. Neben dem Ausfluss bei Überschreiten der Speicherkapazität wird ein geregelter Abfluss berücksichtigt, der in der hier vorliegenden Modellversion dem mit 90% Sicherheit garantierten Jahresmittel des täglichen Abflusses entspricht. Eine flexiblere, speichervolumenabhängige Steuerungsregel wird in einer folgenden Modellversion implementiert.

### *Abflussrouting in Teileinzugsgebieten*

Das Abflussrouting im Gewässernetz wird über eine lineare Transformationsfunktion unter Berücksichtigung von zeitlicher Retention und Translation in HYMO-WA angenähert (siehe auch Bronstert *et al.* 1999a). Für jedes Teileinzugsgebiet wird die Länge und das mittlere Gefälle des

Hauptvorfluters aus dem Digitalen Höhenmodell (siehe Kap. 2.3.2) bestimmt. Schätzwerte der Geometrie des Querprofils werden nach empirischen Ansätzen von Arnold *et al.* (1994) aus Gerinnegefälle und Einzugsgebietsfläche abgeleitet. Eine Verteilung von Fließgeschwindigkeiten für unterschiedliche Fliesstiefen wird über die Manning-Strickler-Gleichung bestimmt. Daraus wird eine einfache Dreiecksverteilung als Impulsantwortfunktion mit den Parametern Translationszeit (mittlere Fließzeit) und Retentionszeit (maximale - minimale Fließzeit) für jedes Teileinzugsgebiet abgeleitet.

### 2.2.3 Modellansätze von der Einzugsgebietskala zur Hangskale

Eine wichtige Grundlage für die Quantifizierung der Wasserverfügbarkeit im Rahmen eines prozessorientierten hydrologischen Modells ist die adäquate Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte als einem ausschlaggebenden Faktor für die Abflussbildung. Der Bodenwassergehalt wird nicht nur durch vertikale sondern auch durch laterale Wasserflüsse gesteuert. Hochauflösende, physikalisch-begründete Modellansätze (z. B. Abott *et al.* 1986, Bronstert & Plate, 1997) berücksichtigen zwar explizit laterale Prozesse, sind jedoch auf Grund der Datenverfügbarkeit und den Rechenkapazitäten auf kleinskalige Anwendungen beschränkt (z.B. Bronstert, 1999). Im Bereich der großskaligen Modellierung beschränkt sich die Berücksichtigung von lateralen Flüssen zumeist auf das Abflussrouting im Gewässernetz. Laterale Prozesse auf der Hangskale können jedoch auch bei großskaligen Fragestellungen eine bedeutende Rolle spielen. Beispielsweise ist auf Grund der nicht-linearen, feuchteabhängigen Rückkopplung der Geländeoberfläche mit der Atmosphäre in Klimamodellen eine verbesserte Erfassung der räumlichen Muster der Bodenfeuchte durch die Berücksichtigung lateraler Flüsse erforderlich (siehe z. B. Famiglietti & Wood 1994). Den wichtigen Einfluss auf die Abflussbildung für eine typische Abfolge verschiedener Bodentypen entlang einer Toposequenz im Kristallingebiet Nordost-Brasiliens zeigen Cadier *et al.* (1996) (Abb. 1). So trägt der auf geringmächtigen Böden gebildete Oberflächenabfluss nach der Reinfiltration in Böden mit tiefergelegenen Reliefpositionen nicht direkt zum Abfluss im Gewässernetz bei.

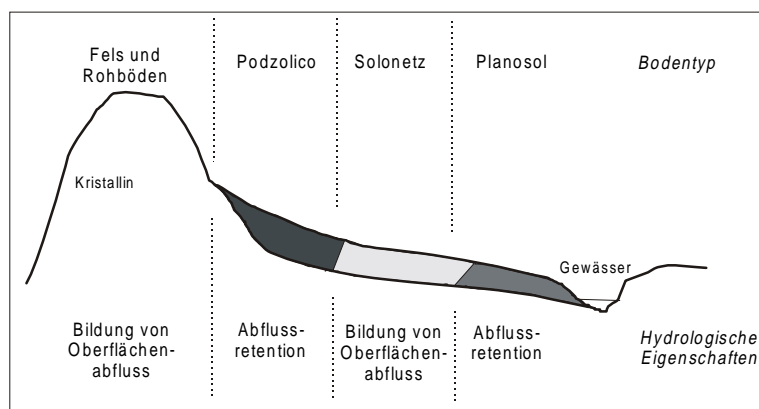


Abbildung 1: Charakteristische Toposequenz im Einzugsgebiet Juatama, Ceará, und Einfluss auf die Abflussbildung (nach Cadier *et al.* 1996)

Als Schema für die Einteilung des Untersuchungsraumes in Modellierungseinheiten hat sich das Hydrotopkonzept bewährt (Becker & Pfütznern 1987, Flügel 1995, Krysanova *et al.* 1999). Der polygonbasierte Ansatz zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität aus, da sich die Flächendiskretisierung nach naturräumlichen Grenzen richten kann und der Grad der Detailliertheit in der Ausweisung von Einzelflächen in Abhängigkeit von der Heterogenität des Untersuchungsraumes räumlich variabel ist. Die Ausweisung von Teilflächen erfolgt dabei zumeist in Bezug auf ihre ähnlichen Eigenschaften für vertikale Wasserflüsse. Die großskalige Anwendung dieses Konzepts ist jedoch eingeschränkt, da laterale Beziehungen zwischen den so erhaltenen

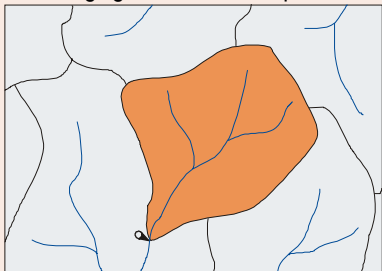
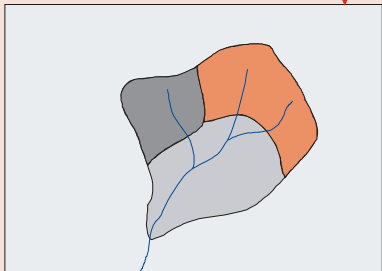
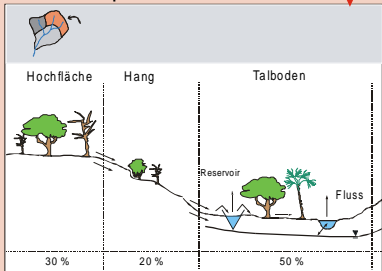
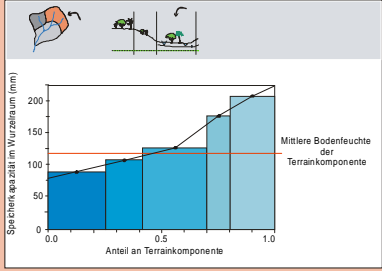
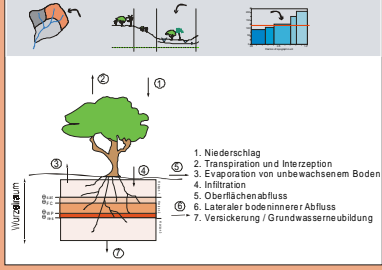
Skalenebene	Typ der Diskretisierung Ähnlichkeitskriterien	Hydrologische Prozesse Funktion
<p>1) Teileinzugsgebiet / Munizip</p> 	<p>Polygone mit räumlich expliziter Lage</p>	<p>&gt; Abflussrouting im Gewässernetz zwischen Teileinzugsgebieten</p>
<p>2) Landschaftseinheit</p> 	<p>Polygone mit räumlich expliziter Lage</p> <p>Ähnlichkeit von</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Landschaftsform / Geomorphologie</li> <li>-Lithologie</li> <li>-Bodengesellschaften</li> <li>-Toposequenzen</li> </ul>	<p>? Hydrotope mit ähnlichen Eigenschaften hinsichtlich lateraler Prozesse</p>
<p>3) Terrainkomponente</p> 	<p>Flächenanteil an Landschaftseinheit (keine räumlich explizite Lage)</p> <p>Ähnlichkeit von</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Hangneigung</li> <li>-Lage innerhalb der Toposequenz</li> <li>-Bodengesellschaften</li> </ul>	<p>? Lateraler Transport von Oberflächenabfluss und bodeninnerem Abfluss zwischen Terrainkomponenten</p> <p>? Reinfiltration und <i>Return flow</i> in Terrainkomponenten mit tieferer Lage innerhalb der Toposequenz</p>
<p>4) Boden- / Vegetationskomponente</p> 	<p>Flächenanteil an Terrainkomponente</p> <p>Ähnlichkeit von</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Boden(sub)typen</li> <li>-Vegetation / Landnutzung</li> </ul>	<p>? Quantifizierung der Bodenfeuchte einer Terrainkomponente unter Berücksichtigung der subskaligen Variabilität auf Grund variabler Boden- und Vegetationseigenschaften</p> <p>? Variable beitragende Flächen für die Bildung von Sättigungsflächenabfluss</p> <p>? Laterale Verknüpfung einzelner Boden-/Vegetationseinheiten</p>
<p>5) Bodenprofil</p> 	<p>-mehrere Horizonte möglich</p> <p>-untere Begrenzung durch Wurzeltiefe</p>	<p>? Berechnung der Wasserbilanz in der durchwurzelten Bodenzone</p> <p>? Bestimmung der vertikalen und lateralen Wasserflüsse einer jeden Boden-/Vegetationskomponente</p>

Abbildung 2: Modifiziertes Hydrotopkonzept und räumliches Disaggregierungsschema in HYMO-WA.

Hydrotopen schwer zu ermitteln sind. Auf der Grundlage der topographischen Information eines Digitalen Geländemodells mit der Rasterweite 1 km, das auch im WAVES-Untersuchungsraum die einzige verfügbare flächendeckende Datenbasis darstellt (siehe Kap. 2.3.2), können keine fundierten Lagebeziehungen mit Bezug auf die oben genannten wichtigen Hangskale abgeleitet werden.

Der für HYMO-WA entwickelte Ansatz stellt ein modifiziertes Hydrotopkonzept dar, das den Einschluss lateraler hydrologischer Prozesse ermöglicht und gleichzeitig die Anwendbarkeit in der großskaligen Modellierung und bei eingeschränkter Datendichte gewährleistet. Abb. 2 gibt eine Übersicht über das skalenübergreifende Disaggregationsschema (siehe auch Güntner & Bronstert 1999, Güntner *et al.* 1999). Der Ansatz basiert auf dem SOTER-Konzept (Soil and Terrain Digital Database) (FAO 1993), das eine hierarchische Gliederung der Landschaft nach topographischen und bodenkundlichen Gesichtspunkten durchführt und für die hydrologische Fragestellung in HYMO-WA in Zusammenarbeit mit der AG Bodenkunde erweitert wurde (siehe auch Kap. 2.3.3). Ausgangspunkt der Einteilung sind *Teileinzugsgebiete* (oder *Munizipien*, Kap. 2.2.5) als grundlegender Modelleinheit. In Abweichung vom klassischen Konzept in der hydrologischen Modellierung werden diese in Hydrotopen unterteilt, die als Flächen mit einer Ähnlichkeit hinsichtlich ihrer *lateralen* Wasserflüsse betrachtet werden (Skalenebene 2, *Landschaftseinheiten*)(Abb. 2).

Es wird angenommen dass die Ähnlichkeit von lateralen Wasserflüsse für Flächen gilt, die annähernd einheitlich sind hinsichtlich ihrer topographischen bzw. geomorphologischen Oberflächenform, d.h. einer typischen Toposequenz (Abfolge von Hoch-, Hang- und Tallagen), sowie ihrer Beschaffenheit des Ausgangsgesteins und somit einer charakteristischen Bodengesellschaft bzw. einer Bodencatena entlang der Toposequenz (siehe zum Beispiel Abb. 1). Die Ähnlichkeit der Oberflächenform dieser Hydrotopen wird in Abb. 3 an Hand eines Radarbildes aus Ceará illustriert. Es lassen sich Flächen mit unterschiedlicher Reliefintensität (unterschiedliche Tiefen und Abstände der Taleinschnitte und somit unterschiedliche Hanglängen und Gefälle) abgrenzen. Aus SUDENE (1973), DNPM (1981) und Jacomine *et al.* (1986) stehen für die Bundesstaaten Piauí und Ceará flächendeckende Informationen zur räumlich expliziten Ausweisung der Landschaftseinheiten (Hydrotopen) zur Verfügung (siehe Kap. 2.3.3 zur Datenaufbereitung und Ableitung von Parametern).

Auf der nächst kleineren Skalenebene werden die Landschaftseinheiten in *Terrainkomponenten* unterteilt, die sich durch ihre Lage in der Toposequenz (Hochlage, Hang oder Talboden), ein charakteristisches Gefälle und eine bestimmte Bodengesellschaft unterscheiden (Abb. 2). Für das WAVES-Gesamtgebiet werden die Terrainkomponenten als Flächenanteile an den Landschaftseinheiten in HYMO-WA repräsentiert. Eine räumlich explizite Information liegt auf der Bundesstaatenebene nicht vor, kann aber im Falle einer höheren Datendichte (z.B. in den Fokusregionen) im Rahmen des Top-down-Ansatzes leicht einbezogen werden. Die Unterteilung in Terrainkomponenten ermöglicht die Berücksichtigung lateraler Fließprozesse, indem Oberflächenabfluss und bodeninnerer Abfluss, der in einer Terrainkomponente gebildet wird (z.B. Hochlage) in die nächst tiefer gelegene Terrainkomponente geleitet wird (z.B. Hang). Oberflächenabfluss steht dort im selben (Tages-)Zeitschritt der Infiltration zur Verfügung, bodeninnerer Abfluss wird gemäss der Darcy-Gleichung in die tiefergelegene Terrainkomponente weitergeleitet. Als hydraulische Leitfähigkeit wird die aktuelle (ungesättigte) Leitfähigkeit des den Abfluss produzierenden Horizontes verwendet (siehe auch Kap. 2.3.3), der hydraulische Gradient wird aus Gefälle und Hanglänge der Terrainkomponente abgeleitet. Beide Abflusskomponenten werden flächenanteilig auf die Boden-/Vegetationskomponenten der tieferliegenden Terrainkomponente verteilt. Die Abflusskomponenten der am tiefsten gelegenen Terrainkomponente bilden den effektiven Abfluss der Landschaftseinheit im Gewässernetz. Die Ab-



flüsse der verschiedenen Landschaftseinheiten eines Teileinzugsgebietes werden addiert und ergeben den Gesamtabfluss dieses Teileinzugsgebietes.

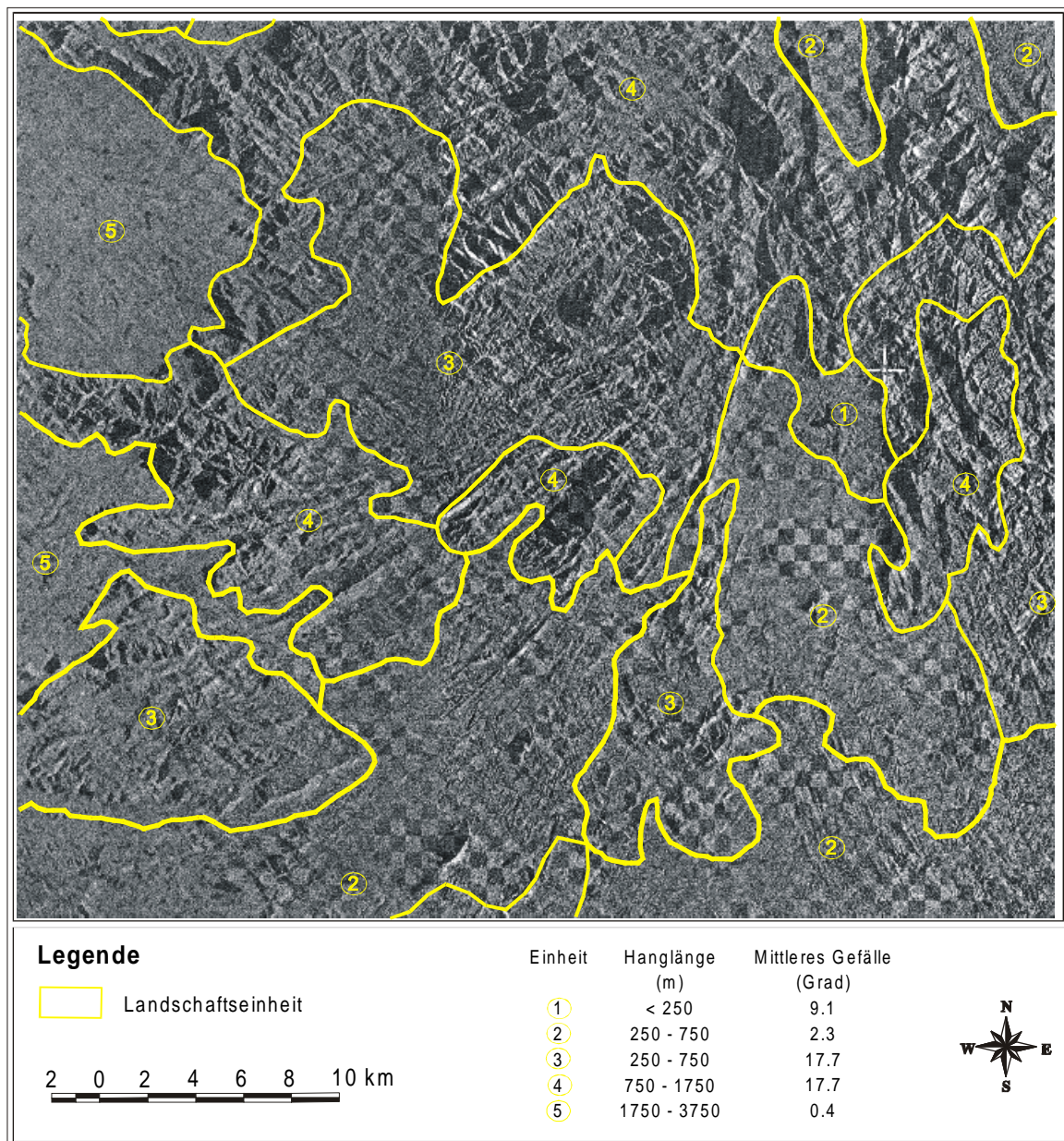


Abbildung 3: Radaraufnahme der Region Itaira / Ceará, Abgrenzung und Parametrisierung von Flächeneinheiten mit ähnlicher Oberflächenform (auf Grundlage von DNPM 1981).

Zur Beschreibung der räumlichen Variabilität von Boden- und Vegetationseigenschaften innerhalb einer Terrainkomponente wird diese auf einer weiteren Ebene des Diskretisierungsschemas in *Boden-/Vegetationskomponenten* aufgeteilt (Skalenebene 4 in Abb. 2). In Anlehnung an Schumann & Funke (1996) entspricht jede Boden-/Vegetationskomponente einer möglichen Kombination von Bodentypen und Landnutzungseinheiten und wird durch ihren Flächenanteil an der Terrainkomponente erfasst. Die jeweilige Wurzeltiefe der Vegetation beschränkt die Profiltiefe der Boden-/Vegetationskomponente, für die dann jeweils die Wasserbilanz und die Bildung von Abflusskomponenten berechnet wird (Kap. 2.2.4). Der Ansatz ermöglicht auch Einheiten mit einem sehr kleinen Flächenanteil an der Terrainkomponente explizit zu modellieren. Dies können beispielsweise im Rahmen der integrierten Modellierung in WAVES für die land-

wirtschaftliche Produktion wichtige Sonderkulturen sein. Auch auf dieser Skalenebene werden laterale Verbindungen zwischen den Einheiten berücksichtigt. Vereinfacht wird angenommen, dass von dem in einer Boden-/Vegetationskomponente gebildeten Abfluss nur ein Anteil entsprechend dem Flächenanteil dieser Boden-/Vegetationskomponente an der Terrainkomponente in die nächste tiefer gelegene Terrainkomponente weitergeleitet wird. Der restliche Abfluss steht zunächst als Zufluss den anderen Boden-/Vegetationskomponenten in der gleichen Terrainkomponente zur Verfügung. Eine typisches Beispiel im semi-ariden Untersuchungsraum ist das Auftreten von kleinräumigen Felsausragungen oder Rohböden innerhalb einer topographischen Einheit. Der dort schnell gebildete Oberflächenabfluss infiltriert unmittelbar in den umliegenden mächtigeren Böden.

In hydrologischen Modellen bestehen zahlreiche auf Verteilungsfunktionen beruhende Ansätze zur Berücksichtigung der Heterogenität innerhalb einer Modellierungseinheit auf Infiltrationseigenschaften und Abflussbildung (z.B. Zhao *et al.* 1980, Becker & Pfützner 1987, Wood *et al.* 1992, Schumann 1993). In HYMO-WA wird auf Grundlage der ihrer Größe nach geordneten Speicherkapazitäten der durchwurzelter Bodenzone aller Boden-/Vegetationskomponenten innerhalb einer Terrainkomponente eine abschnittsweise lineare Verteilung abgeleitet. In der vorliegenden Modellversion wird für jede Komponente eine Variabilität der Speicherkapazität von  $\pm 5\%$  des aus den Bodendaten gegebenen Wertes (siehe Kap. 2.3.3) für den 10- bzw. 90%-Punkt der Fläche dieser Komponente angenommen. Die Variabilität für den 0- bzw. 100%-Punkt wird zu  $\pm 10\%$  angesetzt (Abb. 4a). Der Verteilungspunkt zwischen zwei Komponenten entspricht dem Mittelwert der beiden gegebenen Werte. Die 10- bzw. 90%-Punkte werden in diesem Fall entsprechend verschoben um die gesamte Variabilität einer Komponente beizubehalten (Abb. 4b). In einer späteren Modellversion können die Variabilitätswerte beispielsweise entsprechend einer Analyse vorliegender Profildaten angepasst werden. Die Verteilungsfunktion wird in HYMO-WA schließlich im Sinne des Ansatzes der variablen beitragenden Flächen (Cappus 1960, Dunne & Black 1970) für die Bestimmung von Sättigungsoberflächenabfluss von der Terrainkomponente genutzt. Ein Teil einer jeden Boden-/Vegetationskomponente kann bereits wassergesättigt sein, auch wenn der Wassergehalt der gesamten Komponente noch nicht den Sättigungswert erreicht hat. Ein entsprechender Anteil des auf die Komponente fallenden Niederschlags bildet somit direkt Oberflächenabfluss. Der Sättigungsflächenanteil der Boden-/Vegetationskomponenten wird in jedem Modellierungszeitschritt in Bezug auf die mittleren Bodenfeuchte der Komponente aktualisiert.

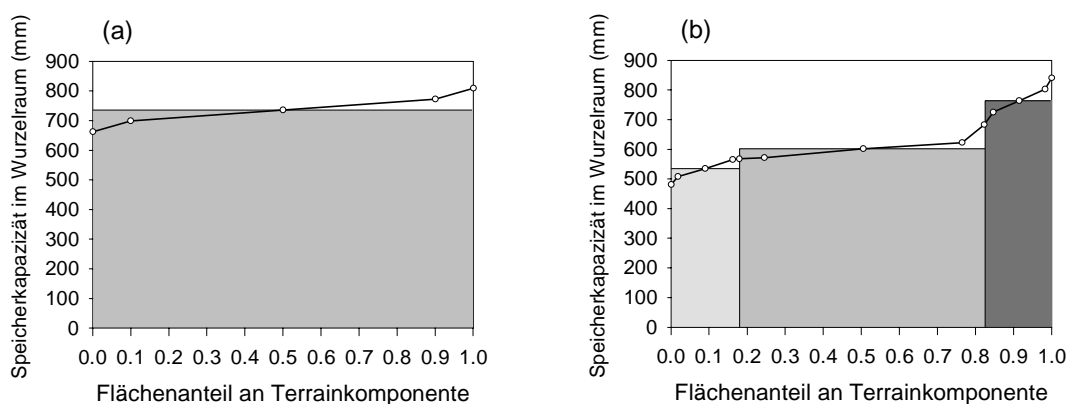


Abbildung 4: Beispiele für Verteilungsfunktionen der Speicherkapazität in der durchwurzelter Bodenzone, (a) Terrainkomponente 33 (1 Boden-/Vegetationskomponente), (b) Terrainkomponente 22 (3 Boden-/Vegetationskomponenten)

## 2.2.4 Modellansätze Punktskale

### *Bodenspeicher*

Auf der Punktskale (Skalenebene 5, Abb. 2) wird in HYMO-WA für jede Boden-/Vegetationskomponente die Wasserbilanz eines mehrschichtigen typischen *Bodenprofils* berechnet. Die Zahl der Horizonte kann beliebig gewählt werden, die untere Begrenzung des Bodenprofils ist durch die Wurzeltiefe der Vegetation gegeben. Im Modell wird die Bodenzone im Sinne der Speicheranalogie umgesetzt, d.h. jeder Horizont wird durch einen Speicherraum konzeptionalisiert, dessen Füllvolumen zwischen 0 und einem maximalen Wert entsprechend dem Produkt aus Porosität und Mächtigkeit des Horizontes variieren kann. Die betrachteten Prozesse und Modellansätze werden im Folgenden beschrieben, die zugehörige Datenaufbereitung und Parametrisierung in Kap. 2.3.3.

### *Infiltration*

Input des Infiltrationsmoduls ist der Niederschlag und möglicher Oberflächenabfluss von einer angrenzenden Boden-/Vegetationskomponente oder von einer höher gelegenen Terrainkomponente, abzüglich des dem gesättigten Flächenanteil der Boden-/Vegetationskomponente (Kap. 2.2.3) entsprechenden Volumens. In HYMO-WA wird ein auf Green & Ampt (1911) basierender Infiltrationsansatz verwendet, der das Eindringen einer sprungförmigen Feuchtefront in das Bodenprofil annimmt. Die Modellierung erfolgt auf Grundlage der Umsetzung von Peschke (1977) und Peschke (1987) im Sinne eines Zweistufenmodells, wobei in der ersten Phase bis zum Erreichen des Sättigungszeitpunktes der gesamte Niederschlag infiltriert, in der zweiten Phase mit dem Fortschreiten der Feuchtefront ins Profil die Infiltrationsrate kontinuierlich abnimmt. Zur Lösung der Infiltrationsgleichung nach der kumulativen Infiltrationsmenge im Modellierungszeitschritt wird ein iteratives Verfahren nach Schulla (1997) angewandt. Die Anwendung des Infiltrationsansatzes auf ein mehrschichtiges Bodenprofil wird im Vergleich zu Peschke (1987) in der gegenwärtigen Modellversion von HYMO-WA vereinfacht, indem der Einschicht-Ansatz nacheinander auf die verschiedenen Horizonte angewandt wird. Ist beispielsweise im obersten Horizont die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit größer als die Niederschlagsintensität (keine Infiltrationsüberschuss möglich), wird der darunter liegende Horizont auf das Erreichen einer Sättigung im aktuellen Zeitschritt getestet, wobei die Zeitspanne einbezogen wird, die zum vorherigen Auffüllen des oberen Horizontes benötigt wurde. Das die kumulative Infiltrationsmenge übersteigende Niederschlagsvolumen ist Oberflächenabfluss.

### *Bodenwasserbewegung*

Neben dem vertikalen Zufluss aus der Infiltration erfolgt lateraler Zufluss in die Bodenhorizonte aus angrenzenden Boden-/Vegetationskomponenten oder von einer höher gelegenen Terrainkomponente. Letzterer wird entsprechend den Horizontanteilen an der Gesamtmächtigkeit des Profils auf die einzelnen Horizonte aufgeteilt. Übersteigt der Wassergehalt eines Horizontes dessen Feldkapazität, kann Perkolation in den nächst tieferen Horizont und lateraler Abfluss auftreten. Beide Prozesse werden in jedem Zeitschritt, beginnend mit dem untersten Horizont, näherungsweise durch die Darcy-Gleichung quantifiziert. Die Fliessrate wird über die aktuelle ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit des betreffenden Horizontes und das Gefälle bestimmt (wobei für die vertikale Wasserbewegung der Gradient gleich 1 gesetzt wird), das Fliessvolumen je Tageszeitschritt ergibt sich dann unter Berücksichtigung der mittleren Fliesslänge (Hälfte der Horizontmächtigkeit bzw. der Hanglänge der Terrainkomponente). Das Gesamtvolumen beider Abflusskomponenten darf nicht größer als die die Feldkapazität des Horizontes übersteigende Wassermenge sein. Schnelle Fliesskomponenten, z.B. in präferentiellen Fliess-

wegen / Makroporen (z. B. Germann, 1986), werden in der vorliegenden Modellversion weder in vertikaler noch in lateraler Richtung berücksichtigt.

### Verdunstung

Die Bestimmung der Verdunstung in HYMO-WA basiert auf dem verbreiteten Penman-Monteith-Verfahren (Monteith 1965). Die Umsetzung und Parametrisierung orientiert sich an den Ansätzen des MORECS-Schemas (Thompson *et al.* 1981, Hough & Jones 1997). Die Hauptmerkmale des hier genutzten Verfahrens sind:

- (1) Zur Bestimmung der Evapotranspiration auf Tageswertbasis wird ein effektiver Oberflächenwiderstand bestimmt, der die verminderte Transpiration der Pflanzen in den Nachtstunden berücksichtigt (Gleichung 1).
- (2) Der Gesamt-Oberflächenwiderstand der Landoberfläche wird aus separaten Werten für Vegetation und unbewachsenen Boden zusammengesetzt (Gleichung 1). Die für den semi-ariden Untersuchungsraum typische lockere Vegetationsbedeckung bzw. die in der Trockenzeit großen Anteile unbewachsener Oberflächen können somit berücksichtigt werden. Der Anteil unbewachsener Oberflächen wird aus dem Blattflächenindex der Landnutzungsformen abgeschätzt. Das Verdunstungsvolumen, das in einem Modellierungszeitschritt die nutzbare Feldkapazität eines Bodenprofils übersteigt, reduziert als Evaporation des unbewachsenen Bodens die Bodenfeuchte im obersten Horizont.

$$\frac{1}{r_s} = \frac{T}{24} \cdot \left( \frac{(1-A)}{r_{sv}} + \frac{A}{r_{ss}} \right) + \frac{(1-T)}{24} \cdot \left( \frac{LAI}{2500} + \frac{1}{r_{ss}} \right) \quad (1)$$

mit	$r_s$	effektiver Oberflächenwiderstand für Tageszeitschritt [s/m]
	$r_{sv}$	bodenfeuchteabhängiger Oberflächenwiderstand der Vegetation [s/m]
	$r_{ss}$	Oberflächenwiderstand für unbewachsene Bodenoberfläche [s/m]
	$T$	Tageslänge [h]
	$A$	Anteil unbewachsener Bodenoberfläche [-] ( $A=0.7^{LAI}$ )
	$LAI$	Blattflächenindex [-]

- (3) Die Einschränkung der Transpiration für Pflanzen unter Wasserstress wird über eine exponentielle Erhöhung des Bestandeswiderstandes als Funktion des Bodenfeuchtedefizites berücksichtigt (Gleichung 2).

$$r_s = r_{s,min} \cdot (2.5 / (1-d) - 1.5) \quad (2)$$

mit	$r_{s,min}$	minimaler Oberflächenwiderstand der Vegetation [s/m]
-----	-------------	--

$$d = \begin{cases} 0 & \text{für } nFK_{akt} \geq 0.7 \cdot nFK \\ \frac{0.7 \cdot nFK - nFK_{akt}}{0.7 \cdot nFK} & \text{für } nFK_{akt} < 0.7 \cdot nFK \end{cases}$$

$nFK$	maximale nutzbare Feldkapazität des Bodenprofils [mm]
$nFK_{akt}$	aktuelle nutzbare Feldkapazität des Bodenprofils [mm]

- (4) Die für den semi-ariden Untersuchungsraum charakteristische Änderung der Vegetationseigenschaften zwischen Trocken- und Regenzeit wird über monatlich variierende Werte für Albedo und Blattflächenindex berücksichtigt (siehe Kap. 2.3).

Für die Bestimmung der Evaporation von freien Wasserflächen der Stauseen (Kap. 2.2.2) wird  $r_s$  gleich 0 gesetzt und die zur Bestimmung des aerodynamische Widerstandes erforderliche Oberflächenrauheit 1,37 mm (Dyck & Peschke 1995). Die Beziehung geht dann in die einfache Penman-Gleichung über.

## 2.2.5 Besonderheiten von HYMO-WA als Modul der Integrierten Modellierung

Neben der auf Einzugsgebiete bezogenen Modellversion von HYMO-WA wurde für die Implementierung in das integrierte Modell des Fachbereichs Integrierte Modellierung eine auf die administrativen Einheiten der Munizipien bezogene Modellversion erstellt (siehe auch Bronstert *et al.* 1999b). Als Ausgangsebene für das hierarchische Gliederungskonzept und Disaggregationschema (Kap. 2.2.3) dienen hier Munizipien an Stelle von Teileinzugsgebieten. Es werden nun beispielsweise Flächenanteile von Landschaftseinheiten an der jeweiligen Munizipfläche bestimmt. Für die laterale Verknüpfung von Munizipien über das Gewässernetz wird zunächst jedem Munizip ein Gewässerabschnitt eines großen Vorfluters zugeordnet. Die Munizipien sind dann im Sinne eines Fließbaums miteinander verbunden, wobei jedem Munizip genau ein stromabwärts gelegenes Munizip zugeteilt wird. Die Parameter für das Abflussrouting im Gewässernetz (Kap. 2.2.2) werden munizipienbezogen aus dem zugeordneten Gewässerabschnitt bestimmt (siehe Bronstert *et al.* 1999a). Alle anderen Modellkomponenten bleiben unverändert im Vergleich zur Einzugsgebietsversion.

## 2.2.6 Zeitliche Disaggregation von Niederschlagszeitreihen

Die Modellierung in HYMO-WA erfolgt mit einem täglichen Zeitschritt. Niederschläge im tropischen Untersuchungsgebiet sind jedoch zumeist durch kurze Dauern mit hohen Intensitäten gekennzeichnet. Bei der Verwendung von täglichen Niederschlagssummen als Eingangsgröße für die Modellierung werden diese Intensitäten nicht erfasst. Die Oberflächenabflussbildung durch Infiltrationsüberschuss kann somit in der Modellierung unterschätzt werden.

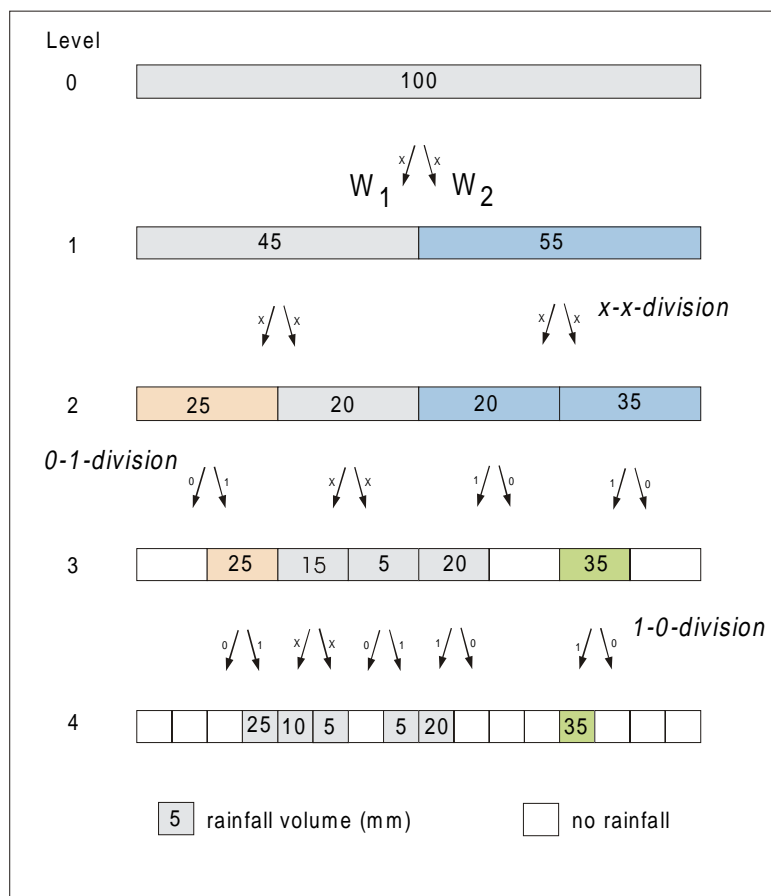


Abbildung 5: Schema des Kaskadenmodells zur zeitlichen Disaggregation von Niederschlagszeitreihen, (Zeitliche Skalenniveaus (*level*), Typen von Skalenübergängen (*division*) und Wichtungparameter (*W*)).

Zur Untersuchung dieser zeitlichen Skalenfrage wurde im Berichtszeitraum ein Verfahren entwickelt, das eine zeitliche Disaggregation der vorliegenden täglichen Niederschlagszeitreihen ermöglicht. Das Modell beruht auf dem Prinzip zufälliger Kaskadenprozesse (z.B. Schertzer & Lovejoy 1987), deren Anwendung zur Abbildung von empirischen Skalierungseigenschaften von Niederschlägen beispielsweise von Gupta & Waymire (1990) vorgeschlagen wurde. Ein auf multiplikativen Kaskaden beruhendes Modell zur zeitlichen Disaggregation von Niederschlagszeitreihen (Olsson 1998) (Abb. 5) wurde hier weiterentwickelt und für die Niederschlagsbedingungen im semiariden Untersuchungsraum parametrisiert (siehe auch Güntner & Olsson 1999, Güntner *et al.* 2000). Das Modell beruht auf der Annahme einer Skalenunabhängigkeit der Übertragungsfunktionen beim Skalenübergang von der Ebene der geringeren zu höheren zeitlichen Auflösung. Die Wichtungsparemeter ( $W$  in Abb. 5), die die Aufteilung eines Niederschlagsvolumens steuern, wurden mit Hilfe der mit einer stündlichen Auflösung vorliegenden Niederschlagsdaten der Messstationen der AG Klimaanalyse in Tauá, Picos und Projeto Piloto bestimmt. Die Parameter sind abhängig von der Lage des zu disaggregierenden Intervalls innerhalb einer Niederschlagssequenz und von dessen Niederschlagsvolumen (zu Ergebnissen siehe Kap. 2.4.5).

## 2.3 Datenbearbeitung und Modellparametrisierung

### 2.3.1 Klimaelemente

Als Eingangsvariablen für HYMO-WA werden auf die Munizipien interpolierte Zeitreihen mit täglichen Werten von Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit vom FB Klima zur Verfügung gestellt. Es liegen die Perioden 1921-1980 und 2001-2050 vor. In der zum Berichtszeitpunkt bestehenden Modellversion erfolgt die Übertragung der Eingangsgrößen auf die Skala der Teileinzugsgebiete mit einer flächengewichteten Mittelung der Munizipiendaten.

### 2.3.2 Topographie und Gewässernetz

Auf Grundlage eines rasterbasierten Digitalen Höhenmodells mit einer Auflösung von ca. 1 km (USGS 1999a) (Tab. 1) wurden im Geographischen Informationssystem (GIS) nach der Bereinigung von abflusslosen Senken das Gewässernetz und Teileinzugsgebiete ermittelt. Ein Vergleich mit dem von topographischen Karten 1:1 Mio. digitalisierten Gewässernetz ergibt für die Hauptvorfluter zumeist eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Für Nebenflüsse treten oft größere Abweichungen auf, in Einzelfällen wurde eine manuelle Korrektur durchgeführt. Die Zahl der ausgewiesenen Teileinzugsgebiete (333) orientiert sich an der Zahl der Munizipien im Untersuchungsraum (332) um eine Vergleichbarkeit beider Modellversionen zu gewährleisten. Die mittlere Fläche eines Teileinzugsgebietes beträgt 1400 km<sup>2</sup>.

Tabelle 1: Digital verfügbare, auf Bundesstaatenebene flächendeckende räumliche Daten

Thema	Datentyp	Auflösung	Quelle
Topographie	Raster	30 Bogensek. (~900m)	USGS (1999a)
Vegetation / Landnutzung	Raster	1 km	USGS (1999b)
Vegetation / Landnutzung	Polygon	1: 1 000 000	DNPM (1973a,1973b, 1981)
Bodengesellschaften / Landschaftseinheiten	Polygon	1: 1 000 000	SUDENE (1973), Jacomine <i>et al.</i> (1986)
Geomorphologie	Polygon	1: 1 000 000	DNPM (1973a,1973b, 1981)

### 2.3.3 Geomorphologie und Böden

Eine für die beiden Bundesstaaten flächendeckende Datenbank mit bodenkundlichen und geomorphologischen Informationen wurde in Zusammenarbeit mit der AG Bodenkunde basierend auf SUDENE (1973) und Jacomine *et al.* (1986) (Tab. 1) aufgebaut. Diese Erläuterungen zur Karte von Bodengesellschaften für Piauí und Ceará enthalten neben den bodenkundlichen Profilangaben Informationen über Höhenlage der Kartiereinheiten, Gefälle, Lage und Flächenanteile von Bodentypen und Bodengesellschaften innerhalb von Toposequenzen in der Landschaft. Diese Informationen wurden umgesetzt in das hierarchische SOTER-Konzept der Datenbank (siehe Kap. 2.2.3) und um Angaben für die hydrologische Fragestellung erweitert, indem die Höhenlage von Landschaftseinheiten und Terrainkomponenten zueinander festgelegt wurde. Dies ermöglicht die Verknüpfung von Modellierungseinheiten im Sinne des auf laterale Flüsse angelegten Hydrotopansatzes von HYMO-WA (Kap. 2.2.3) (Abb. 2). Für einzelne Landschaftseinheiten können basierend auf den Angaben in SUDENE (1973) und Jacomine *et al.* (1986) keine unterschiedlichen Terrainkomponenten ausgewiesen werden, da sich Bodengesellschaften und Gefälleverhältnisse innerhalb der Landschaftseinheit nicht charakteristisch unterscheiden. In diesen Fällen wurden im Kristallgebiet 2 Terrainkomponenten mit gleichen Eigenschaften und einem Flächenanteil an der Landschaftseinheit von 30% (Tallagen) bzw. 70% (Hoch- und Hanglagen) ausgewiesen. Auf gesamtstaatlicher Skala werden in HYMO-WA 320 Landschaftseinheiten und 770 Terrainkomponenten unterschieden.

Die von Radarbildern abgeleitete geomorphologische Klassifizierung (DNPM 1973a, 1973b, 1981) (Tab. 1) wurde an Hand von topographischen Karten 1:100000 parametrisiert, indem mittlere Hanglängen und Gefälle für die Kartiereinheiten ausgewiesen wurden (siehe Abb. 3). Die Einbindung dieser Information in die Parametrisierung von Landschaftseinheiten und Terrainkomponenten über die Verschneidung mit der Bodenkarte ist in der vorliegenden Modellversion noch nicht realisiert.

Zur Parametrisierung der Bodenwassermodellierung (Kap. 2.2.4) wurden von der AG Bodenkunde charakteristische Bodenprofile für 73 in Ceará und Piauí vorkommende Bodentypen zur Verfügung gestellt. Zum Berichtszeitpunkt wird in Piauí jeweils nur der wichtigste Bodentyp innerhalb einer jeden Terrainkomponente parametrisiert, da hier die detaillierte Erstellung der Bodendatenbank noch nicht abgeschlossen ist. Aus den Texturangaben der Bodenprofile werden horizontspezifisch die Kennwerte der Wasserspeicherung und -bewegung abgeleitet. Als Pedo-Transfer-Funktion für die Bestimmung von residuellem Wassergehalt, permanentem Welkepunkt und Feldkapazität wird die Beziehung nach Brooks & Corey (1964) verwendet. Die Saugspannung an der Feuchtefront des Green-Ampt basierten Infiltrationsansatzes (Kap. 2.2.4) wird aus den Brooks-Corey Parametern nach Rawls & Brakensiek (1983) bestimmt. Für die Ableitung der gesättigten hydraulische Leitfähigkeit aus der Porosität des Bodenhorizontes wird eine spezifisch für tropische Böden in Brasilien erstellte Beziehung nach Tomasella & Hodnett (1997) verwendet. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des aktuellen Wassergehaltes wird bestimmt über das Modell von Van Genuchten (1980).

### 2.3.4 Vegetation

In der zum Berichtszeitpunkt vorliegende Version von HYMO-WA sind noch keine räumlich verteilten Informationen über Vegetation und Landnutzung enthalten. Es wird flächendeckend eine Vegetationsbedeckung vom Typ Caatinga angenommen. Die Parametrisierung für die Verdunstungsmodellierung erfolgt für die Bestandeshöhe  $h$  und Wurzeltiefe  $z$  gemäß vegetationskundlichen Angaben in DNPM (1981), Lima *et al.* (1984) und mündlichen Mitteilungen von Projektpartnern. Die Werte für den minimalen Oberflächenwiderstand  $r_{s,min}$  sowie die Jahressgänge von Albedo  $\alpha$  und Blattflächenindex  $LAI$  sind abgeleitet aus den großskaligen gridba-

sierten Angaben des Simple Biosphere Model für Savannenvegetation (Dorman & Sellers 1989) (Tab. 2).

Tabelle 2: Parametrisierung der Vegetation in HYMO-WA, Monatswerte Januar (1)-Dezember (12), ( $h$ ,  $z$  und  $r_{s,min}$  im Jahresverlauf konstant).

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$h$	[m]							4.0					
$z$	[m]							1.5					
$r_{s,min}$	[s/m]							90.0					
•	[-]	0.25	0.23	0.21	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.28	0.28	0.28	0.27
$LAI$	[-]	1.2	1.8	2.7	3.0	2.8	2.5	2.0	1.3	0.5	0.5	0.5	0.8

Für eine Modellerweiterung durch die Einbindung räumlich verteilter Landnutzungseinheiten sind umfangreichere Vorarbeiten erforderlich, die die Überprüfung und Anpassung der verfügbaren flächendeckenden Datenquellen (Tab. 1), die Ableitung der saisonalen Variabilität unter Zuhilfenahme von Fernerkundungsmethoden sowie korrespondierenden Geländeerhebungen beinhalten sollten (2. Hauptphase).

### 2.3.5 Stauseen

Daten zu Stauseen wurden von den Projektpartnern bei COGERH, DHME, FUNCEME und UFC sowie aus Araújo (1990), SRH (1992), Marwell (1995), Araújo (1999) für die hydrologische Modellierung zusammengefasst. Insgesamt sind auf der Skala der Bundesstaaten 7240 Stauseen in HYMO-WA erfasst. Für kleine Stauseen (< 10 Mio. m<sup>3</sup> Speicherkapazität) liegen Informationen zu deren Anzahl in verschiedenen Volumenklassen auf Munizipebene vor. Die Übertragung auf die einzugsgebietsbasierte Modellversion erfolgt für jede Volumenklasse entsprechend der Flächenanteile von Munizipien am Teileinzugsgebiet. Für die explizit modellierten Stauseen mit mehr als 50 Mio. m<sup>3</sup> Speicherkapazität (Kap. 2.2.2) sind die Daten zu technischen Eigenschaften und Baujahr teilweise lückenhaft und inkonsistent. In der einzugsgebietsbasierten Modellversion werden für die großen Stauseen separate Teileinzugsgebiete ausgeschieden, in der munizipienbasierten Modellversion wird die Lage des Stausees auf den Auslasspunkt des dem Munizip zugeordneten Gewässerabschnitts gelegt. Individuelle Volumen-Fläche-Beziehungen und Steuerregeln für große Stauseen werden in einer späteren Modellversion implementiert.



## 2.4 Ergebnisse der Modellanwendung

### 2.4.1 Makroskale (Ebene der Bundesstaaten)

Basierend auf der historischen Rekonstruktion der Klimaelemente (Kap. 2.3.1) wurde mit HYMO-WA mit täglicher Auflösung die mittlere jährliche Wasserbilanz für eine 60-jährige Periode für die beiden Bundesstaaten Piauí und Ceará bestimmt (Tab. 3). Beide Bundesstaaten sind durch ein großes Verhältnis zwischen jährlicher potentieller Verdunstung und Niederschlag gekennzeichnet. Die natürliche Verfügbarkeit von Wasserressourcen in Oberflächengewässern ist in Ceará größer als in Piauí. Der zum Abfluss gelangende Anteil des Niederschlags liegt in Ceará mit 16.9% über dem Wert von Piauí (8.4%). Die reale Evapotranspiration und die Grundwasserneubildung weisen hingegen in Piauí höhere Werte auf als in Ceará. Einerseits begründen die etwas höheren Niederschläge und die größere Verdunstungsanforderung in Piauí die im Vergleich zu Ceará höhere aktuelle Verdunstung. Zum anderen sind diese Ergebnisse zurückzuführen auf die unterschiedlichen Bodeneigenschaften des sedimentären Ausgangsgestein in Piauí im Vergleich zu den zumeist kristallinen Gebieten Ceará (80% der Landesfläche). Die größere Mächtigkeit der Böden in Piauí erhöht über einen tieferen Wurzelraum der Vegetation die Wasserverfügbarkeit und somit die Transpiration. Die höhere Durchlässigkeit der Böden und der höheren Niederschläge ergeben dennoch eine über den Werten von Ceará liegende Grundwasserneubildung. In weiten Teilen Ceará ist diese im kristallinen Festgesteinsbereich sehr gering.

Tabelle 3: Mittlere jährliche Werte für die Komponenten des Wasserkreislaufs in Ceará, Piauí und den Munizipien der Fokusgebiete, Periode 1921-1980.

Komponente [mm/a]	Ceará	Piauí	Tauá	Picos
Niederschlag <sup>a</sup>	910	925	741	671
potentielle Verdunstung <sup>b</sup>	2164	2327	2255	2312
reale Evapotranspiration <sup>b</sup>	708	856	595	655
Grundwasserneubildung <sup>b,c</sup>	48	69	1	12
Abfluss <sup>b</sup>	154	78	145	4

(a) Historische Rekonstruktion AG Klimaanalyse, (b) Simulation mit HYMO-WA, (c) Sickerrate aus der Wurzelzone.

### 2.4.2 Mesoskale (Munizipien / Teileinzugsgebiete)

Die Betrachtung der Modellergebnisse für die Munizipien der Fokusregionen auf der Mesoskale heben die in Kap. 2.4.1 genannten großskaligen Auswirkungen der naturräumlichen Unterschiede auf die Wasserverfügbarkeit noch deutlicher hervor (siehe Tab. 3). Das Munizip Picos ist in einer für Piauí charakteristischen Schichtstufenlandschaft aus sedimentären Gesteinen gelegen, gekennzeichnet durch tiefgründige aber vergleichsweise durchlässige Böden. Die Bildung von Oberflächenabfluss ist sehr gering, auf Grund der vergleichsweise niedrigen Niederschläge ist die Grundwasserneubildung geringer als im Landesdurchschnitt. Dieser Wert ist in einem groben Vergleich in Übereinstimmung mit einer auf Isotopenuntersuchungen beruhenden Abschätzung der Grundwasserneubildung in der Region Picos von 10 mm/a (Foster 1996) und punktskaligen Ergebnissen von Halm (1999). Das Fokusgebiet Tauá in Ceará liegt im Bereich des kristallinen Sockels auf dem sich nur geringmächtige Böden ausbilden. Somit werden nach einer schnellen Wassersättigung größere Mengen von Oberflächenabfluss gebildet. Das Festgestein wird in der vorliegenden Modellversion von HYMO-WA als undurchlässig angenommen, die Grundwasserneubildung ist dementsprechend sehr gering und entspricht hier der Sickerrate aus der Wurzelzone in Böden deren Mächtigkeit größer ist als die Wurzeltiefe.

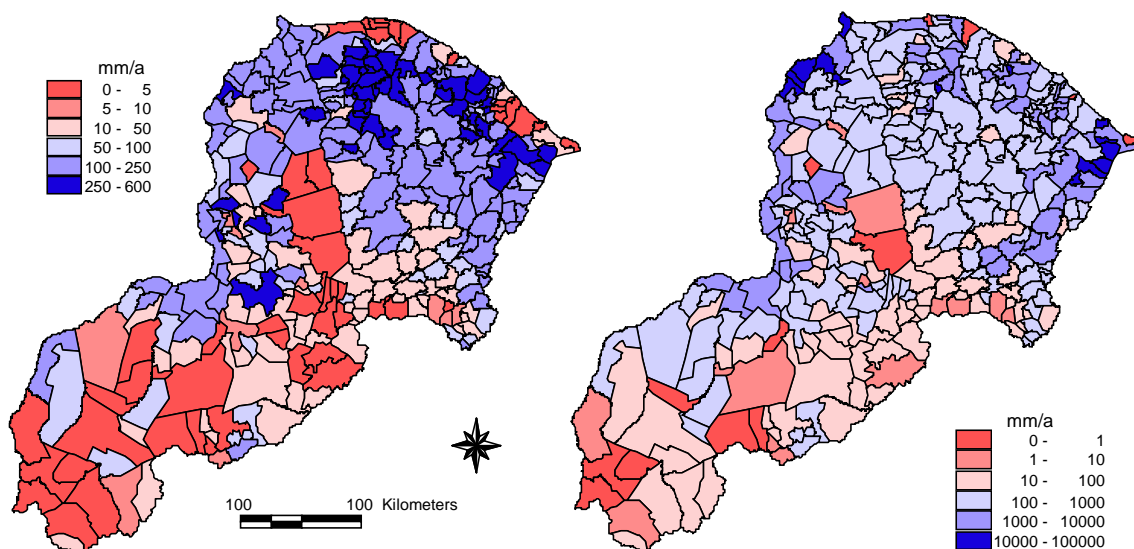


Abbildung 6: Mittlerer jährlicher Abfluss der Munizipien, Simulation mit HYMO-WA, Periode 1921-1980, (a) ohne Berücksichtigung der Zuleitung aus höher gelegenen Munizipien über das Gewässernetz, (b) mit Berücksichtigung der Zuleitung aus höher gelegenen Munizipien über das Gewässernetz (Zuflüsse im Parnaíba-Einzugsgebiet aus Maranhão werden nicht berücksichtigt).

Abb. 6a zeigt die munizipienbezogenen die räumliche Verteilung des mittleren jährlichen Abflusses. Das räumliche Muster spiegelt zum einen die unterschiedlichen Infiltrationseigenschaften der Böden im Kristallin bzw. im Sedimentgebiet wider, mit höheren Werten der Bildung von Oberflächenabfluss in weiten Teilen Cearás. Ausnahmen bilden in Ceará die küstennahen Munizipien mit einem hohen Anteil an sandigen Böden und Munizipien im Süden des Bundesstaates, die im Bereich der sedimentären Chapada do Araripe gelegen sind. Dieses geogene Muster wird überlagert von der räumlichen Verteilung der Niederschläge. So treten innerhalb des Sedimentgebietes die Munizipien mit einer höheren Wasserverfügbarkeit in den feuchteren Regionen im (Nord-)Westen Piauí's hervor. Die geringen Werte im Südwesten Piauí's sind auf die grobe Extrapolation der Niederschläge auf Grund fehlender Messdaten zurückzuführen. In Ceará ist eine niederschlagsbedingte Abnahme der Bildung von Oberflächenabfluss innerhalb des Kristallingebietes mit zunehmender Entfernung von der Küste ins Landesinnere (Sertão) erkennbar. Wird zusätzlich die über das Gewässernetz einem jeden Munizip zufließende Wassermenge berücksichtigt (Abb. 6b) treten Bänder höherer Wasserverfügbarkeit entlang der großen Flüsse (v.a. Jaguaribe, Parnaíba) im räumlichen Muster hervor. Dieser Verteilung liegt die Annahme zu Grunde, dass stromaufwärts eines jeden Munizips keine Wasserentnahme stattfindet. Der Vergleich beider Darstellungen belegt die große Bedeutung des Zuflusses über das Gewässernetz für die Wasserverfügbarkeit in einzelnen Munizipien.

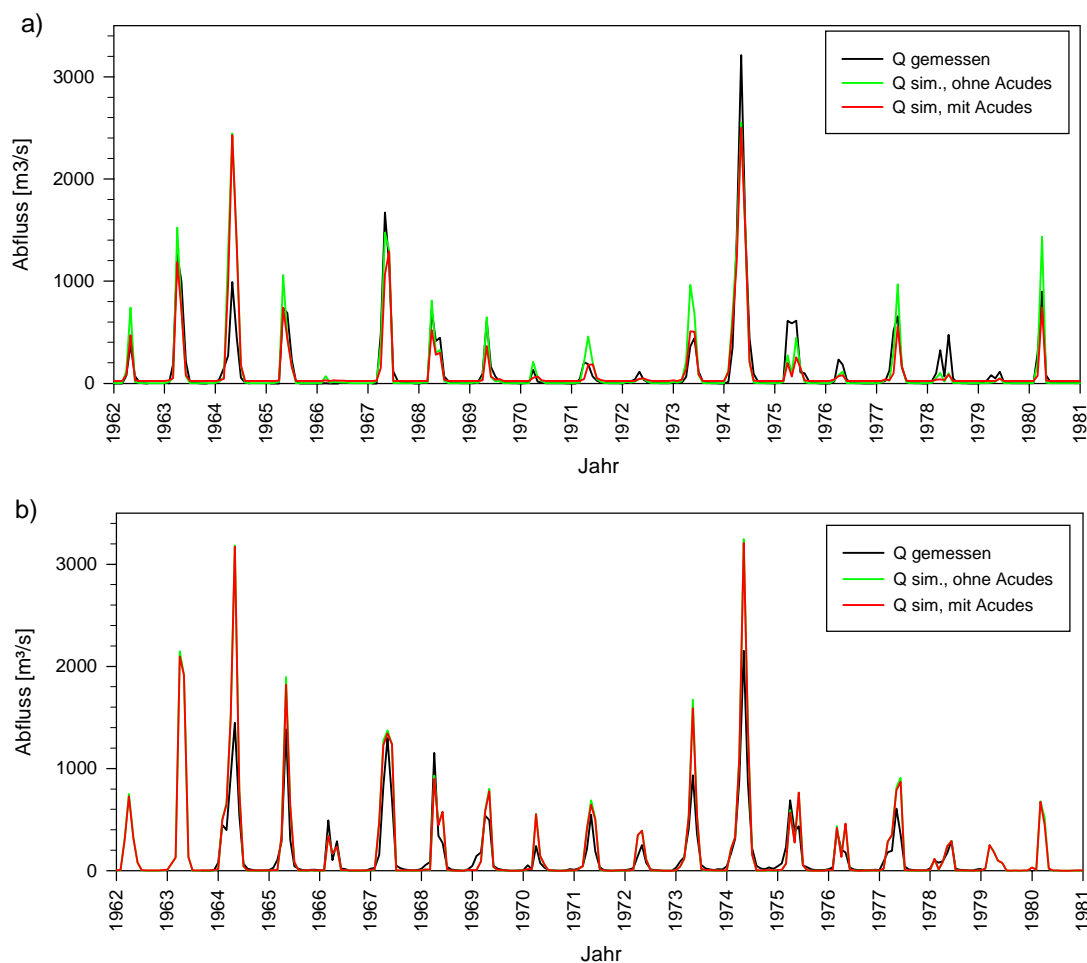


Abbildung 7: Gemessene und mit HYMO-WA (Einzugsgebietsversion) simulierte monatliche Abflüsse, Periode 1962-1980. (a) Pegel Peixe Gordo, Rio Jaguaribe, Ceará (47500 km<sup>2</sup>), (b) Pegel Faz. Catinho, Rio Potí, Piauí (51200 km<sup>2</sup>), gemessene Abflüsse hier Periode 1964-1978. (Daten von GRDC).

Abb. 7 gibt Beispiele zur Modellvalidierung an Hand gemessener Abflüsse in großen Einzugsgebieten. Pegel Peixe Gordo (Abb. 7a) befindet sich im Unterlauf des vorwiegend das Kristallin Ceará's entwässernden Flusses Jaguaribe. Pegel Fazenda Catinho (Abb. 7b) liegt im Unterlauf des überwiegend im Sedimentgebiet Piauí's gelegenen Flusses Potí. In beiden Naturräumen werden Abflussvolumen, die zeitliche Verteilung im Jahr sowie die interannuelle Variabilität von dem nicht geeichten HYMO-WA überwiegend gut widergegeben. Der Einfluss von Wasserspeicherung in den Reservoiren (Açudes) ist am Jaguaribe (Abb. 7a) mit einer hohen Dichte von Stauanlagen beträchtlich. Die Berücksichtigung des Rückhaltes führt zumeist zu plausibleren Simulationsergebnissen. Am Rio Potí treten hingegen nur geringe Änderungen in der Abflussganglinie als Folge von Speicherrückhalt auf. Es ist zu beachten, dass bei den vorliegenden Simulationsergebnissen noch keine Wasserentnahme für landwirtschaftliche oder häusliche Nutzung berücksichtigt wird. Abb. 8 zeigt, dass sich für große Gebiete die Simulationsergebnisse der einzugsgebietsbezogenen Modellversion nur wenig von den Resultaten der munizipienbezogenen Modellversion unterscheiden. Die Abweichungen können für kleinere Gebiete be-

deutender sein, da dann der Flächenfehler, der durch die munizipienbasierte Abgrenzung von Modellierungseinheiten gemacht wird, relativ zur betrachteten Gesamtfläche größer wird.

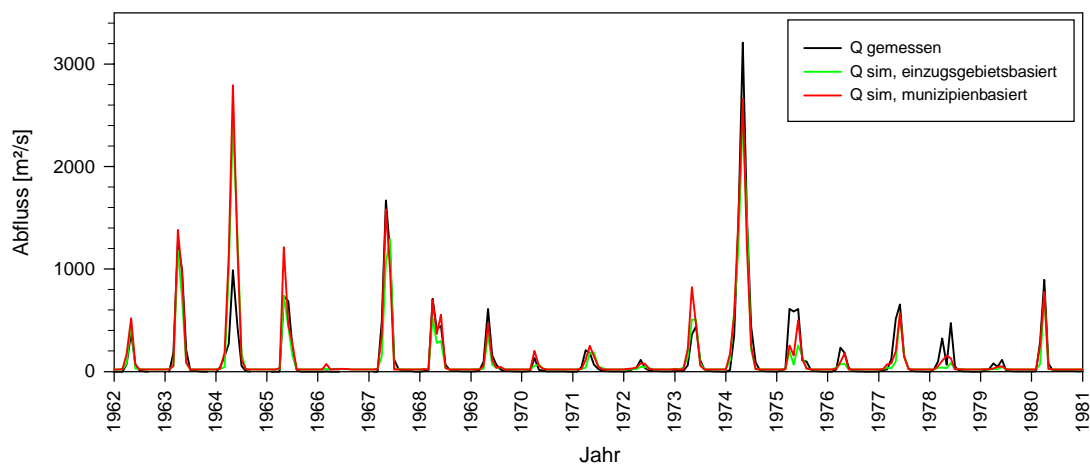


Abbildung 8: Vergleich der munizipienbasierten und einzugsgebietsbasierten Modellversionen von HYMO-WA, simulierte und gemessene monatliche Abflüsse, Periode 1962-1980, Pegel Peixe Gordo, Rio Jaguaribe, Ceará. Einzugsgebietsfläche 47500 km<sup>2</sup>, beitragende Fläche gemäß Munizipienfließbaum 50900 km<sup>2</sup>.

#### 2.4.3 Mikroskale (Testgebiet Tauá)

Zur kleinskaligen Validierung von HYMO-WA stehen aus detaillierten hydrologischen Studien von ORSTOM/SUDENE in Kleineinzugsgebieten Nordost-Brasiliens (Cavalcante *et al.* 1989, Cadier 1996, Cadier *et al.* 1996) Daten aus dem Bereich Tauá zur Verfügung. Das Einzugsgebiet Riacho Cipó (200 km<sup>2</sup>) wird als repräsentativ für weite Teile des Kristallingebietes in Ceará angesehen. Das kleinste bemessene Teileinzugsgebiet Caldeirão (0.77 km<sup>2</sup>) enthält keine Açudes und ist deshalb für die Entwicklung und Überprüfung des Abflussbildungsmoduls in HYMO-WA sehr geeignet. Tägliche Niederschlagsdaten aus einem dichten Messnetz stehen als Eingangsgröße zur Verfügung, die klimatischen Parameter wurden aus langjährigen täglichen Mitteln für das Munizip Tauá den Zeitreihen der AG Klimaanalyse entnommen. Flächenanteile von Bodentypen und empirische Größen zu deren hydrologischen Eigenschaften (z.B. Infiltrationskapazität) enthält Cavalcante *et al.* (1989). Für die nicht kalibrierte Modellanwendung zeigt die Validierung an Hand gemessener Abflussdaten, dass die vorliegende Version von HYMO-WA die Grundzüge der Einzugsgebietsreaktion gut wider gibt (Abb. 9). Bei einem mittleren jährlichen Niederschlag von 560 mm wurde ein mittlerer Jahresabfluss von 87 mm gemessen, die Simulation ergibt 88 mm. In Trockenjahren oder am Beginn der Regenzeit werden einzelne Abflussereignisse von HYMO-WA nicht wiedergegeben. Dies kann auf eine im Modell zu geringe Bildung von Oberflächenabfluss bei kleiner Bodenfeuchte zurückzuführen sein, möglicherweise auf Grund unterschätzter Niederschlagsintensitäten auf Tageswertbasis. In feuchten Perioden wird hingegen der Abfluss von HYMO-WA eher überschätzt. Eine detaillierte Auswertung der vorliegenden Daten und Simulationsergebnisse kann zu einer Anpassung oder Erweiterung der Abflussbildungsansätze in HYMO-WA führen.

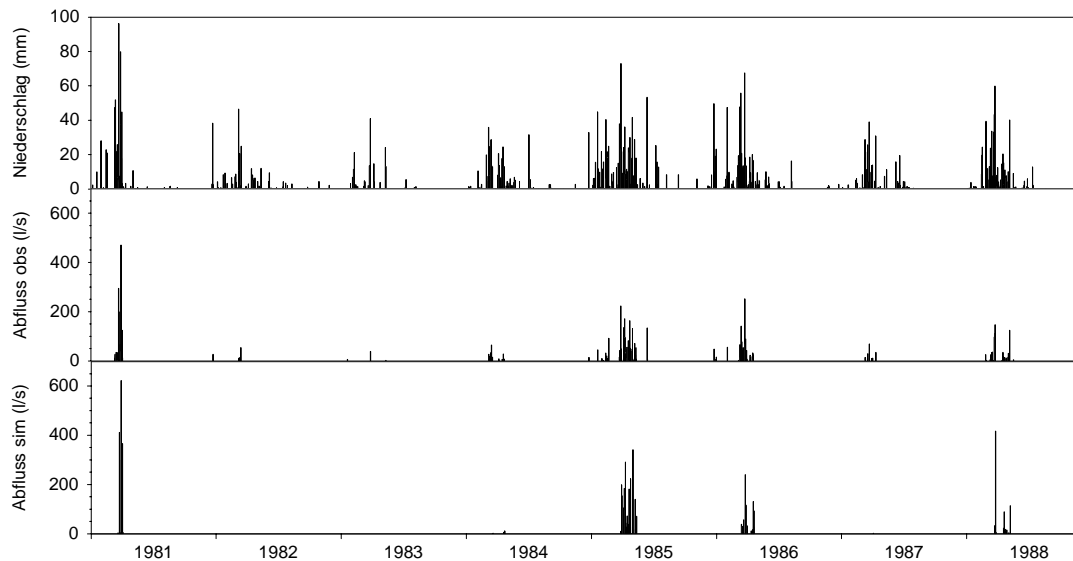


Abbildung 9: Modellvalidierung von HYMO-WA, Repräsentativgebiet Caldeirão / Tauá (0.77km<sup>2</sup>). Oben: gemessener Niederschlag, Mitte: gemessener Abfluss, Unten: simulierter Abfluss. Periode 1981-1988.

#### 2.4.4 Simulation der Auswirkungen eines Klimaszenarios auf die Wasserverfügbarkeit

Für das Klimaszenario der Periode 2001-2050 der AG Klimaanalyse/-modellierung wurde die Auswirkung auf die Wasserverfügbarkeit mit HYMO-WA simuliert. In Tab. 4 wird auf der Bundesstaatenebene die Basisperiode 1971-1980, auf dessen mittleren Klimabedingungen das Szenario aufsetzt, mit einer gleichlangen Periode am Ende des Szenarienzeitraumes (2041-2050) verglichen. Es wird ausschließlich eine Änderung des Klimas angenommen, alle anderen naturräumlichen und wasserwirtschaftlichen Faktoren werden beibehalten.

In Folge einer Abnahme der Jahresniederschläge um etwa ein Viertel zwischen Basis- und Szenarioperiode bei annähernd unveränderten Werten der potentiellen Verdunstung tritt gemäß den Simulationsergebnissen eine drastische Reduktion der Wasserressourcen im WAVES-Untersuchungsraum auf. Die relative Verminderung der Abflussvolumen und der Grundwasserneubildung ist insbesondere in Ceará deutlich größer als die prozentuale Abnahme der Niederschläge. Ein sehr starken Rückgang der Verfügbarkeit von Oberflächenwasser (ohne Berücksichtigung der oberstromigen Wassernutzung und von Änderungen der Speicherkapazitäten von Stauseen im Vergleich zur Basisperiode) ergibt sich insbesondere im Süden Ceará, entlang des Rio Jaguaribe, sowie im Südosten Piauí (Abb. 10).

Tabelle 4: Mittlere jährliche Werte für die Komponenten des Wasserkreislaufs in Ceará und Piauí. (I) Basisperiode 1971-1980 [mm/a], (II) Szenarioperiode 2041-2050 [mm/a], (III) Änderung relativ zu Basisperiode [%].

Komponente	Ceará			Piauí		
	(I)	(II)	(III)	(I)	(II)	(III)
Niederschlag <sup>a</sup>	1016	760	-25.2	952	753	-20.9
potentielle Verdunstung <sup>b</sup>	2188	2196	+0.4	2356	2216	-5.9
reale Evapotranspiration <sup>b</sup>	799	651	-18.5	826	664	-19.6
Grundwasserneubildung <sup>b,c</sup>	49	29	-40.8	55	40	-27.3
Abfluss <sup>b</sup>	168	80	-52.4	71	49	-31.0

(a) Klimaszenario AG Klimaanalyse/-modellierung, (b) Simulation mit HYMO-WA, (c) Sickerrate aus der Wurzelzone.

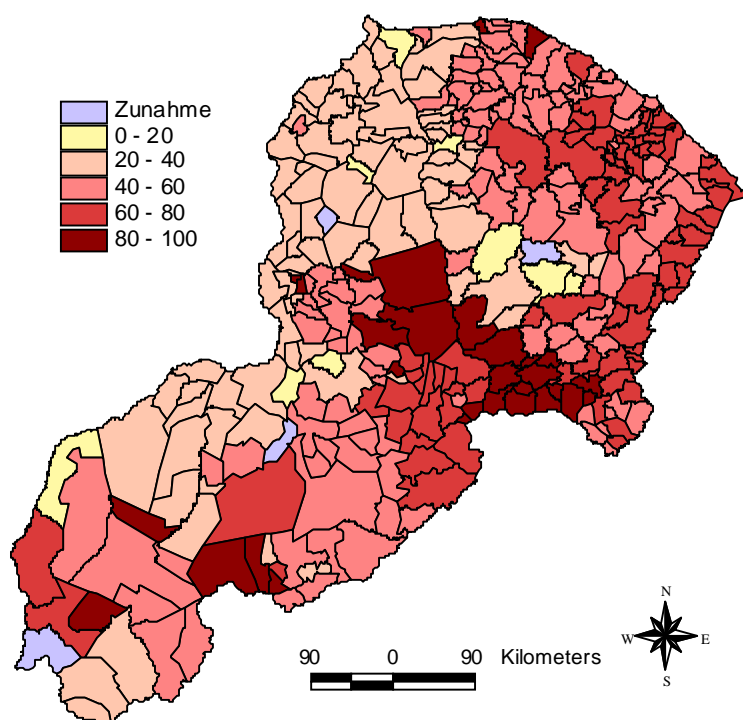


Abbildung 10: Abnahme [%] des mittleren jährlichen Abflusses der Munizipien zwischen Basisperiode 1971-1980 und Szenarienperiode 2041-2050, basierend auf dem Klimaszenario, Simulation mit HYMO-WA.

#### 2.4.5 Disaggregation von täglichen Niederschlagszeitreihen

Das Kaskadenverfahren zur zeitlichen Disaggregation von Niederschlagszeitreihen (siehe Kap. 2.2.6) ermöglicht die Aufteilung von Tageswerten in Stundenwerten auf Grundlage der von den Messdaten der WAVES-Stationen in Tauá, Picos und Projeto Piloto abgeleiteten Parameter. Wichtige Eigenschaften der stündlichen Zeitreihen (Niederschlagsvolumen einzelner Intervalle, Dauer von zusammenhängenden Niederschlagssequenzen (Ereignisse) oder Extremwerte von Intensitäten) konnten durch das Modell für die semiariden Niederschlagscharakteristika gut wiedergegeben werden (siehe Abb. 11). Eine Kreuzvalidierung der 3 Stationen belegt, dass die Parameter zwischen den Stationen übertragbar sind und somit eine Anwendung des Verfahrens für das gesamte WAVES-Untersuchungsgebiet angenommen werden kann (siehe auch Güntner & Olsson 1999, Güntner *et al.* 2000). Die Ergebnisse werden für die

Untersuchung von zeitlichen Skalierungsfragen insbesondere hinsichtlich der Parametrisierung der Infiltrationsroutine in HYMO-WA genutzt.

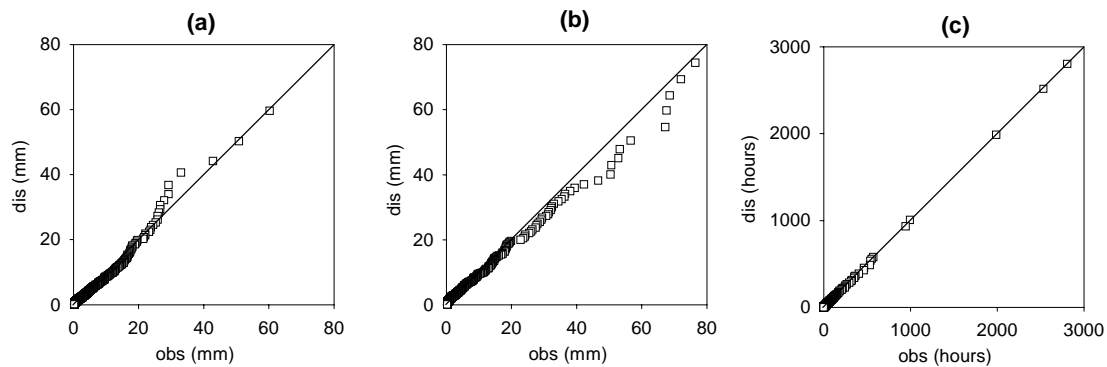


Abbildung 11: Validierung des Kaskadenverfahrens: Vergleich der Verteilungen von Eigenschaften der gemessenen (obs) und disaggregierten (dis) Niederschlagszeitreihen mit Auflösung 1 Stunde, Station Projeto Piloto, Periode 07/95-03/99, Disaggregation von Tageswerten. (a) Niederschlagsvolumen einzelner 1-h-Intervalle, (b) Volumen von Niederschlagsereignissen (ununterbrochene Sequenzen von 1-h-Intervallen mit Regen), (c) Länge von niederschlagsfreien Perioden.

## 2.5 Diskussion

Die zum Berichtszeitpunkt vorliegende Version des großskaligen hydrologischen Modells HYMO-WA stellt eine erste einfache, nicht kalibrierte Modellversion dar, die auf der Bundesstaatenebene flächendeckend mit verteilten Parametern für Böden und Topographie arbeitet und die die zur Bestimmung der Wasserverfügbarkeit im WAVES-Untersuchungsraum angenommenen wichtigsten Modellkomponenten enthält. Wie die Ergebnisse der vorläufigen Modellvalidierung zeigen (Kap. 2.4.1-2.4.3), können das hydrologische Verhalten des Untersuchungsraumes einschließlich der charakteristischen Unterschiede in den beiden wichtigsten Naturräumen (Kristallin und Sedimentgebiet) mit dieser Version in den Grundzügen bereits gut wiedergegeben werden. Auf Grund seiner physikalisch basierten Modellansätze ist das Modell ein geeignetes Werkzeug um die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen auf die Wasserverfügbarkeit dynamisch abbilden zu können (Kap. 2.4.4). Das skalenübergreifende Konzept zur Abflussbildung und Diskretisierung von Modellierungseinheiten (Kap. 2.2.3) ermöglicht Aussagen auf verschiedenen räumlichen Skalen und eine entsprechende Kopplung im Rahmen der integrierten Modellierung im WAVES-Projekt. Die Modellansätze berücksichtigen durch die Verwendung von Flächenanteilen und Verteilungen (Kap. 2.2.3-2.2.4) die eingeschränkte Datenverfügbarkeit und können Datenunsicherheiten erfassen. Wichtige Komponenten im Rahmen der Fragestellungen des Teilprojektes (Kap. 2.1) werden somit berücksichtigt.

In der weiteren Arbeit ist ein Schwerpunkt auf eine möglichst breite Modellvalidierung auf verschiedenen Skalenebenen und an Hand unterschiedlicher Validierungsgrößen zu legen (siehe z.B. Güntner *et al.* 1999). Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Quantifizierung von Unsicherheiten. Zusammen mit Sensitivitätsstudien können Defizite in den Simulationsergebnissen (siehe z.B. Kap. 2.4.3) erforderliche Modellmodifikationen oder Erweiterungen des vorliegenden einfachen aufzeigen. Mögliche zusätzliche Modellkomponenten betreffen beispielsweise die Erfassung von Schrumpfrissbildung, die Verschlammung der Bodenoberfläche oder die Berücksichtigung von Abflussverlusten im Gewässernetz durch Verdunstung oder Versickerung. Die Reduzierung der Wasserverfügbarkeit durch Verlandung des Stauraumes von Reservoirs soll durch die Kopplung mit einem Erosionsmodell der Projektpartner an der Universidade Federal do Ceará berücksichtigt werden. Skalierungsregeln für zeitliche Skalierungsfragen der Ab-

flussbildung werden auf Grundlage des entwickelten Disaggregationsschemas für Niederschläge untersucht (Kap. 2.2.6 und 2.4.5). Die räumlich verteilte Parametrisierung des Modells ist in Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen zu erweitern. Dies betrifft Ergänzungen der Bodendatenbank, insbesondere aber die Berücksichtigung der Landnutzung und ihrer geeigneten Parametrisierung einschließlich der intraanuellen Variabilität. Hierzu sind umfangreichere Vorarbeiten auf der Basis von Fernerkundungsmethoden und korrespondierenden Geländeerhebungen in Zusammenarbeit mit einer AG Fernerkundung erforderlich. Über eine Einbindung des hydrologischen Modells in das integrierte Modell des FB Integrierte Modellierung sind gekoppelte Simulationen der Wasserverfügbarkeit unter Berücksichtigung von Wasserentnahmen für die konsumptive Nutzung zu erstellen.

## 2.6 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten und brasilianischen Wissenschaftlern

Im Folgenden werden die wichtigsten Bereiche der Zusammenarbeit mit den deutschen und brasilianischen Partnern zusammengefasst. Zu genauen Angaben über gemeinsame Reisen, Kongressteilnahmen und Veröffentlichungen siehe Projekttagbuch bzw. Kap. 2.7.1.

### *Deutsche Partner*

- *AG Klimaanalyse/-modellierung*: Bereitstellung von Eingangsgrößen für die hydrologische Modellierung; Fragen der räumlichen Interpolation von Klimatelementen; Nutzung der hochauflösenden Niederschlagsdaten der Messstationen in Tauá, Picos, Projeto Piloto für die Entwicklung eines zeitlichen Disaggregationsschemas (Kap. 2.2.6).
- *FB Integrierte Modellierung*: Gemeinsame Erstellung von räumlichen munizipienbezogenen Basisdaten und Modellroutinen im integrierten und hydrologischen Modell; Programmierung des in beiden Modellen benötigten Verdunstungsansatzes; Bereitstellung einer Prototypen-version des hydrologischen Modells für das integrierte Modell; Definition von Schnittstellen zwischen HYMO-WA und anderen Teilmodellen.
- *AG Großskalige Wassernutzungsmodellierung*: Gemeinsame Geländebegehungen, Datenerhebungen, Behördenbesuche, Literaturrecherchen, etc. zum Thema Wasser in Nordost-Brasilien; Bereitstellung von Niederschlags- und Verdunstungsdaten für die Wassernutzungsmodellierung; vergleichende Modellanwendungen beider großskaligen Modelle.
- *AG Bodenkunde*: Erweiterung der Konzeption der Bodendatenbank für die hydrologische Fragestellung in HYMO-WA; gemeinsame Erweiterung der Bodendatenbank auf die gesamtstaatliche Ebene.
- *FB Landschaftsökologie*: GIS-basierte Erstellung von flächendeckenden Datensätzen als Grundlage der distribuierten hydrologischen Modellierung, Austausch analoger und digitaler Kartengrundlagen.

### *Brasilianische Wissenschaftler*

Wichtigster Kooperationspartner ist auf brasilianischer Seite die Arbeitsgruppe von Prof. J.C. de Araújo am Dpt. de Eng. Hidraulica der Universität Fortaleza (UFC) mit gemeinsamen Exkursionen, Datenerhebungen im Gelände und bei Behörden, Erfahrungsaustausch, Koordination der künftigen Kopplung der auf beiden Seiten entwickelten Modelle. Wichtige Ergebnisse hinsichtlich der Hydrologie des Untersuchungsraumes und der Parametrisierung des hydrologischen Modells wurden von Araújo (1999) zusammengefasst. Im Berichtszeitraum bestanden wichtige Kontakte und Kooperation zum Wissens- und Datenaustausch (siehe auch Kap. 4) mit im Wasserbereich tätigen Wissenschaftlern bei INPE/CPTEC (São



Paulo), Fundação Joaquim Nabuco, DNPM, Universidade Federal de Pernambuco (alle Recife), DHME (Teresina), SHR, FUNCEME, COGERH, CPRM, UFC, Universidade Rural und DNPM (alle Fortaleza). Mit der COGERH wurde vereinbart, die künftige Zusammenarbeit auf Grundlage eines Kooperationsvertrages zwischen COGERH und PIK hinsichtlich Daten- und Modellaustausch auszubauen.

## 2.7 Bibliographie

### 2.7.1 Eigene Publikationen

- Bronstert, A. (1999). Capabilities and limitations of detailed hillslope hydrological modelling. In: *Hydrological Processes*, Vol. 13, Nr. 1, pp. 21-48.
- Bronstert, A., Güntner, A., Jaeger, A., Krol, M. & Kryukow, J. (1999a). Großräumige hydrologische Parametrisierung und Modellierung als Teil der integrierten Modellierung. In: N. Fohrer, Döll, P. (Eds.). *Modellierung des Wasser- und Stofftransports in großen Einzugsgebieten*. Kassel University Press, Rauischholzhausen / Giessen, pp. 31-40.
- Bronstert, A., Jaeger, A., Güntner, A., Hauschild, M., Döll, P. & Krol, M. (1999b). Integrated modelling of water availability and water use in the semi-arid Northeast of Brazil. In: *Physics and Chemistry of the Earth*, in press.
- Bronstert, A. & Plate, E.J. (1997). Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. In: *Journal of Hydrology*, Vol. 198, Nr. 1-4, pp. 177-195.
- Güntner, A., Olsson, J., Calver, A. & Gannon, B. (2000). Cascade-based disaggregation of continuous rainfall time series: the influence of climate. Submitted to *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Güntner, A. & Bronstert, A. (1999). A large-scale hydrological model for the semi-arid tropics of north-eastern Brazil. In: *Proceedings of the Intern. Symposium on "Hydrological and Geochemical Processes in Large-Scale River Basins"*, November 16-19 1999, Manaus, Brazil, CD-Rom
- Güntner, A. & Olsson, J. (1999). Application of a cascade model for rainfall disaggregation in semi-arid tropics. In: *EGS (Editor), EGS 24th General Assembly, The Hague*, p. 291.
- Güntner, A., Bronstert, A. & Gaiser, Th. (1999). Parameterization of lateral hydrological processes based in geomorphologic units. In: *IUGG 99, XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Birmingham. Books of abstracts II*, p. B.317.
- Güntner, A., Uhlenbrook, S., Seibert, J. & Leibundgut, Ch. (1999). Multi-criterial validation of TOPMODEL in a mountainous catchment. In: *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp. 1603-1620.
- Krysanova, V., Bronstert, A. & Müller-Wohlfeil, D. (1999). Modelling River Discharge for Large Drainage Basins: from Lumped to Distributed Approach. In: *Hydrological Science Journal*, Vol. 44, Nr. 2, pp. 313-331.

### 2.7.2 Zitierte Literatur

- Abott, M.B. *et al.* (1986). An introduction to SHE, 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system. In: *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Araújo, J.C. de (1999). Hydrological aspects of the states of Ceará and Piauí, Brazil. Technical Report, Universidade federal do Ceará, Depto. de Eng. Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, Brazil.
- Araújo, J.A. de (1990). Barragens no Nordeste do Brasil. DNOCS, Fortaleza, 328 pp.
- Arnold, J.G. *et al.* (1994). SWAT, Soil and Water Assessment Tool. USDA, Agricultural Research Service, Soil & Water Research Laboratory, Temple.
- Becker, A. & Pfützner, B. (1987). EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling. In: *Acta Hydrophysica*, Vol. 31, Nr. 3/4, pp. 125-141.

- Brooks, R.H. & Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper, Vol. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Cadier, E. (1996). Hydrologie des petits bassins du Nordeste Brésilien semi-aride: typologie des bassins et transposition écoulement annuels. In: Journal of Hydrology, Vol. 182, pp. 117-141.
- Cadier, E., Leprun, J.C. & Nouvelot, J.F. (1996). Le comportement des bassins versants représentatifs du Nordeste Brésilien - Bilan de la collaboration entre hydrologues et pédologues. In: IAHS Publications, Vol. 238, pp. 41-52.
- Campos, J.N.B. (1996). Dimensionamento de reservatórios. Edições Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, Brazil, 56 pp.
- Cappus, P. (1960). Étude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. In: La Houille Blanche, Nr. A, pp. 493-520.
- Cavalcante, N.M., Doherty, F.R. & Cadier, E. (1989). Bacia hidrografica representativa Tauá - Relatório final. Série Hidrologia, Vol. 28, SUDENE, Recife.
- DNPM (1981). Projeto Radam, Levantamento de recursos naturais, Vol.23, Folhas 24/25 Jaguaribe/Natal. Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, Brasil.
- DNPM (1973a). Projeto Radam, Levantamento de recursos naturais, Vol.1, Folhas 23/24 Rio São Francisco/Aracaju. Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, Brasil.
- DNPM (1973b). Projeto Radam, Levantamento de recursos naturais, Vol.3, Folhas 23/24 São Luis/Fortaleza. Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, Brasil.
- Dunne, T. & Black, R.D. (1970). An experimental investigation of runoff production in permeable soils. In: Water Resources Research, Vol. 6, pp. 478-490.
- Dyck, S. & Peschke, G. (1985). Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Famiglietti, J.S. & Wood, E.F. (1994). Multiscale modelling of spatially variable water and energy balance processes. In: Water Resources Research, Vol. 30, Nr. 11, pp. 3061-3078.
- FAO (1993). Global and national soils and terrain digital databases (SOTER). Procedures Manual. World Soil Resources Reports No.74. Roma, Italy.
- Flügel, W.-A. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analysis for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl, Germany. In: Kalma, J.D. and Sivapalan, M. (Eds.): Scale Issues in Hydrological Modelling, John Wiley, pp. 181-193.
- Foster, M. (1996). WAVES-Statusbericht, Band II - Fachberichte, Projektbereich 100 (Hydrologie)
- Germann, P.F. (1986). Rapid drainage response to precipitation. In: Hydrological Processes, Vol. 1, pp. 1-13.
- Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics: I. The flow of air and water through soils. In: Journal of Agricultural Sciences, Vol. 4, pp. 1-24.
- Gupta, V.K. & Waymire, E. (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. In: J. Geophys. Res., Vol. 95, pp. 1999-2009.
- Halm, D. (1999). Soil water balance in the semiarid Northeast of Brazil - characterisation, simulation, evaluation, and comparison of hydrological properties and processes in representative soils of the Picos region, Piauí. Dissertation Universität Tübingen.
- Hough, M.N. & Jones, R.J.A. (1997). The United Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS version 2.0 - an overview. In: Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 1, Nr. 2, pp. 227-239.
- Jacomine, P.K.T. *et al.* (1986). Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Piauí. Série Recursos de Solos No. 18, Divisão de Recursos Naturais, DRN-SUDENE, EMPRABA, Rio de Janeiro, Brasil.
- Lima, M.F., Lima, F.A. & Teixeira, M.M. (1984). Mapeamento e demarcação definitiva da Floresta Nacional Araripe - Ceará, Brasil. In: Ciência Agronômica, Vol. 15, Nr. 1/2, pp. 59-69, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil.

- Marwell, P. (1995). Projeto Aridas, Tema 7: Análise de sustentabilidade do Estado do Piauí quanto aos recursos hídricos. Secretaria de Planejamento, Teresina.
- Monteith, J.L. (1965). Evaporation and environment. In: Proc. Sympos. Soc. Exp. Biol., Vol. 19, pp. 205-234.
- Olsson, J. (1998). Evaluation of a cascade model for temporal rainfall disaggregation. In: Hydrol. Earth System Sci., Vol. 2, pp. 19-30.
- Rawls, W.J. & Brakensiek, D.L. (1983). A procedure to predict Green Ampt infiltration parameters. In: Adv. Infiltration, Am. Soc. Agric. Eng., pp.102-112.
- Peschke, G. (1977). Ein zweistufiges Modell der Infiltration von Regen in geschichtete Böden. Acta hydrophysica, Vol. 22, Nr. 1, pp. 39-48.
- Peschke, G. (1987). Soil moisture and runoff components from a physically founded approach. Acta hydrophysica, Vol. 31, Nr. 3/4, pp. 39-48.
- Schertzer, D. & Lovejoy, S. (1987). Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. In: J. Geophys. Res., Vol. 92, pp. 9693-9714.
- Schulla, J. (1997). Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, Dissertation Geographisches Institut ETH Zürich, Zürcher Geographische Schriften, Vol. 69, 161 pp.
- Schumann, A.H. (1993). Development of conceptual semi-distributed hydrological models and estimation of their parameters with the aid of GIS. In: Hydrological Science Journal, Vol. 38, Nr. 6, pp. 519-528.
- Schumann, A.H. & Funke, R. (1996). GIS-based components for rainfall-runoff models. In: K.N. Kovar, H.P. (Editor), Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. IAHS-Publ. 235, IAHS Press, Wallingford, pp. 477-484.
- SRH (1992). Plano Estadual dos Recursos Hídricos. Vol.1, Diagnóstico. Secretaria dos Recursos Hídricos, Governo do Estado do Ceará, Fortaleza, Brasil.
- SUDENE (1973). Levantamento exploratorio - Reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Série Pedologia No. 16, Divisão de Agrologia, DRN-SUDENE, Ministério de Interior, Recife, Brasil.
- Thompson, N., Barrie, I.A. & Ayles, M. (1981). The Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS. Hydrological Memorandum, Vol. 45, Meteorological Office, Bracknell, UK.
- Tomasella, J. & Hodnett, M.G. (1997). Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil-water retention data. In: Soil Science, Vol. 162, Nr. 10, 703-712.
- USGS (1999a). Global 30 Arc Second Elevation Data Set. <http://edc.usgs.gov/landdaac/gtopo30/gtopo30.html>, USGS Eros Data Center.
- USGS (1999b). South America Land Cover Characteristics Data Base. [http://edc.usgs.gov/landdaac/glcc/sa\\_int.html](http://edc.usgs.gov/landdaac/glcc/sa_int.html), USGS Eros Data Center.
- Van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation für predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp.892-898.
- Wood, E.F., Lettenmaier, D.P & Zartarian, V.G. (1992).. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 97D, pp. 2717-2728.
- Zhao, R.J. et al. (1980). The Xinanjiang Model. In: IAHS-Publ. 129, IAHS Press, Wallingford, pp. 351-356.

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

Der Stand des Vorhabens im Teilprojekt Großskalige Hydrologische Modellierung entspricht unter Berücksichtigung des verzögerten Arbeitsbeginns auf Grund der späteren Einstellung von Herrn A. Güntner (11/97) der ursprünglichen Planung. Die zentrale Aufgaben des Berichtszeitraumes, die Erstellung eines großskaligen hydrologischen Modells, die Modellprogrammierung und die entsprechende Datenaufbereitung wurden durchgeführt. Eine Prototypenversion des hydrologischen Modells wurde als Teilmodul für das integrierte Modell bereitgestellt. Die aktuelle Modellversion konnte noch nicht integriert werden. Auf Bundesstaatenebene wurden sowohl für die munizipienbasierte als auch für die einzugsgebietsbezogene Modellversion von HYMO-WA flächendeckende Datensätze zur räumlich differenzierten Parametrisierung des Modells aufgestellt und die Parameter abgeleitet. Der Grad der Detailliertheit der Daten entspricht noch nicht dem entgeltigen Zustand. Als Grundlage der Bearbeitung von zeitlichen Skalierungsfragen wurde ein an die semiariden Bedingungen angepassten Verfahren zur Disaggregation von Niederschlagszeitreihen entwickelt. Die für den Berichtszeitraum vorgesehene Kopplung des hydrologischen Modells mit einem Klimamodell konnte jedoch wegen Verzögerungen bei der Anpassung und programmiertechnischen Parallelisierung des regionalen Klimamodells nicht durchgeführt werden. Erste Sensitivitätsuntersuchungen, Modellanwendungen und Szenarienrechnungen des hydrologischen Modells wurden entsprechend dem Zeitplan durchgeführt.

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

Von COGERH, FUNCEME und CPRM (Fortaleza) wurden langjährige Niederschlagsdaten von Stationen aus dem Projektgebiet zur Verfügung gestellt, die als Eingangsgrößen für die hydrologische Modellierung genutzt werden können. GRDC (Global Runoff Data Center, Koblenz) und CPRM (Fortaleza) stellten Abflussdaten mit täglicher oder monatlicher Auflösung zur Verfügung. COGERH, FUNCEME und DHME (Teresina) stellten technische Daten sowie Zeitreihen von Speichervolumen für Stauseen in Piauí und Ceará zur Verfügung. DNPM (Recife) stellte Kartenmaterial und Erläuterungsbände von physiographischen Datensätzen des flächendeckenden Projektes RADAMBRASIL zur Verfügung. Aus den Arbeiten von ORSTOM / IRD im ehemaligen Forschungseinzugsgebiet bei Tauá wurden von Dr. E. Cadier Niederschlags- und Abflusszeitreihen digital bereitgestellt. Zu weiteren Angaben über relevante Ergebnisse Dritter siehe Kap. 2.7.2.

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

Im Berichtszeitraum wurden keine Erfindungen oder Schutzrechte angemeldet.