

Großräumige hydrologische Parametrisierung und Modellierung als Teil der integrierten Modellierung

Axel Bronstert, Andreas Güntner, Annekathrin Jaeger, Maarten Krol und Jörg Krywkow

Zusammenfassung: Unter den verfügbaren Methoden interdisziplinär-quantifizierender Betrachtungen gewinnt die integrierte Modellierung zunehmend an Bedeutung. Für die Erstellung eines integrierten Modells können verschiedene Konzepte angewendet werden. Bei dem hier verfolgten Ansatz werden zuerst - ausgehend von der vorgegebenen Fragestellung - die wesentlichen endogenen Prozesse und deren Verknüpfungen (interne Dynamik) und die maßgebenden externen Kräfte (Randbedingungen) identifiziert. Anschließend werden für die Prozesse Teilmodelle (Module) und für die Randbedingungen Szenarien erstellt. In diesem Beitrag wird die skizzierte Problematik anhand der Parametrisierung und Anwendung des Moduls „großräumige Hydrologie“ als Teil der integrierten Modellierung der Kausalkette *Klima - Wasserverfügbarkeit - landwirtschaftliche Produktion - Lebensqualität - Migration* im semi-ariden Nordosten Brasiliens erläutert.

Abstract: Integrated modelling is getting more and more important as a promising interdisciplinary coupling and quantification method. There are different concepts for the construction of an integrated model. The integrated modelling approach applied here - starting from the pre-defined modelling objective - first identifies the governing endogenous system processes and their linkages (internal dynamics), and the relevant external forces (boundary conditions). In the second stage, the internal dynamics are represented by process sub-models, and boundary conditions have to be given as scenarios. This paper presents some key issues of the integrated modelling methodology based on the parameterisation and application of the module “Large Scale Hydrology” as part of the causal chain *climate – water availability – agro-economy – living quality – migration* in the semi-arid Northeast of Brazil.

1 Integrierte Modellierung: Motivation und Beispielsregion

Die Auswirkungen von *Global Change* auf Natur und Gesellschaft sind vielfältig und komplex. Sie beschränken sich weder auf eine einzelne Komponente der Biosphäre noch auf nur einen Sektor der Ökonomie. Verschiedene wissenschaftliche Disziplinen können die einzelnen Prozesse sowie deren komplexen Interaktionen von *Global Change* Wirkungen bearbeiten. Die inhärente Interdisziplinarität dieses Forschungsgebiets legt einen integrativen Ansatz nahe.

Ein typisches Problem bei der interdisziplinären Integration ist die Konsistenzfrage an der Schnittstelle zwischen den wissenschaftlichen Disziplinen. Konsistenzprobleme treten auf verschiedenen Ebenen auf: Verständigung (Begriffsdefinitionen), Art der Beschreibungen (qualitativ bis quantitativ) sowie die Frage der benutzten räumlichen und zeitlichen Skalen. Ein integriertes Modell ist eine Methode, diese Fragen durch explizite Modellierung gezielt anzugehen.

In vielen *Global Change* Fragestellungen spielt Wasser eine zentrale Rolle. Der Wasserkreislauf ist eine der entscheidenden Komponenten des Klimageschehens, die Wasserverfügbarkeit kann sich bei Klimaänderungen dramatisch ändern, oder sie kann Sekundäreffekte wie Bodendegradation wesentlich beeinflussen. In vielen Regionen der Welt ist Wasser ein limitierender Faktor der landwirtschaftlichen Produktion. Zudem ist die Verfügbarkeit von Trinkwasser ausreichend guter Qualität eine Grundvoraussetzung für die Gesundheit der Bevölkerung.

Integrative Studien über gesellschaftliche Auswirkungen von *Global Change* werden am besten in dem Maßstabbereich durchgeführt, in dem die administrativen/politischen Folgen wahrgenommen werden können. Meist bedeutet das, daß diese Studien auf große Gebiete zielen, in denen sich die unterschiedlichen Folgen aus Kleingebieten überlagern und wo Institutionen angesiedelt sind, die gegebenenfalls steuernd reagieren können.

Die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets sollte also recht groß gewählt werden. Dessen räumliche Auflösung muß meistens aber wesentlich feiner gewählt werden, da die wesentlichen Prozesse (z.B. Niederschlag, Bodeneigenschaften oder Zugang zu Wasserressourcen) auf deutlich kleinere Skalen stattfinden. Die Wahl einer angemessenen Betrachtungsskala ist somit ein wichtiger Teil der Entwicklung des integrierten Modells und ist neben der grundlegenden Fragestellung der Modellierung abhängig von der vorhandenen Datenlage und den jeweiligen Prozeßkenntnissen.

Semi-aride Gebiete sind besonders interessantesten Gebiete zur Untersuchung der Wasserproblematik. Wasser ist dort ein limitierender Faktor, sowohl für (landwirtschaftliche) Produktion als auch generell für die Lebensqualität der Menschen. Außerdem ist in vielen dieser Gebiete die Verletzbarkeit durch Wassermangel besonders hoch, da der Entwicklungsstand oft niedrig ist und Marginalisierung auftreten kann. Somit können *Global Change* Vorgänge die Wasserproblematik in unterentwickelten semi-ariden Gebieten verschärfen (z.B. bei abnehmenden Niederschlagsmengen) oder entschärfen (z.B. bei erfolgreicher Anwendung neuer Technologien). Das Projekt WAVES (Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society, BMBF 1995) untersucht die Zusammenhänge zwischen Wasserverfügbarkeit und Landflucht beispielhaft anhand einer Region in Nordosten Brasiliens (Bundesstaaten Ceará und Piauí, siehe Abb.1). In dem Gebiet sind großräumige, schwerwiegende Dürren verbunden mit einer starken Entvölkerung der ländlichen Gebiete, was in der Vergangenheit wiederholt sowohl zu starken sozialen Problemen als auch zu politischen Reaktionen auf großräumiger, bundesstaatlicher Ebene (etwa Notwasserversorgung, Lebensmittel- und Beschäftigungsprogramme) führte.

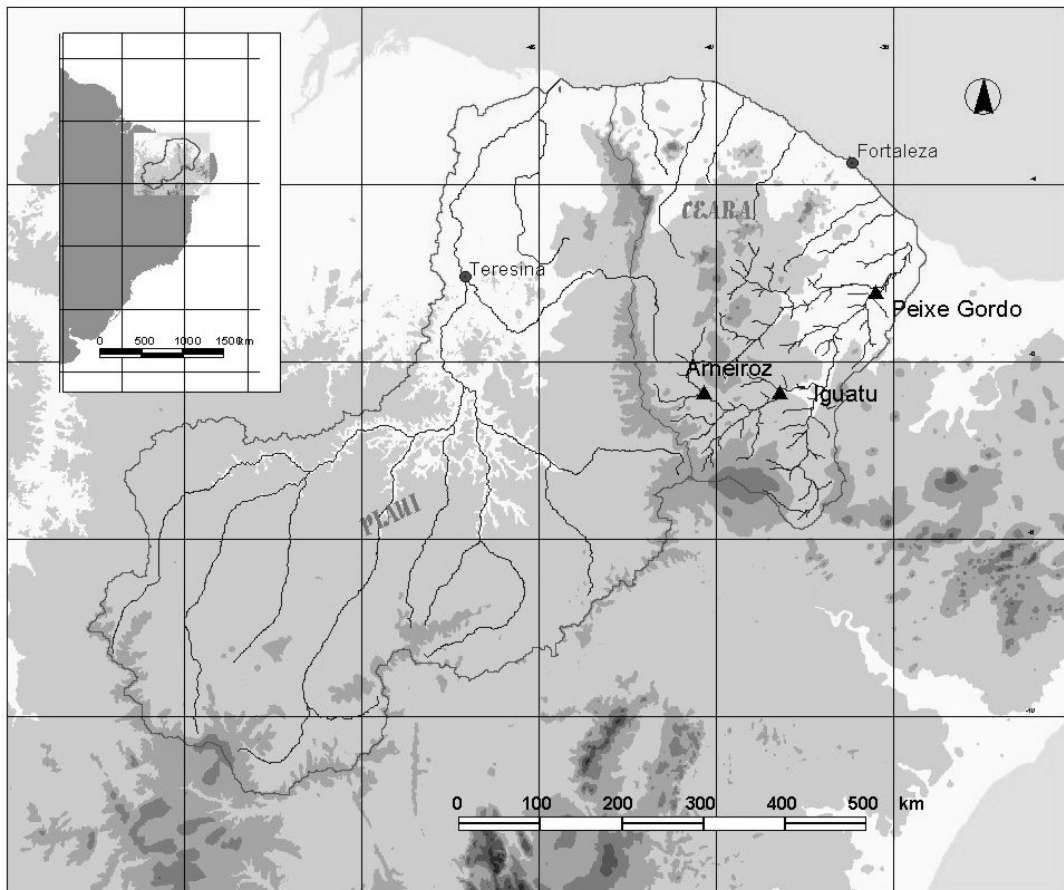


Abb. 1: Untersuchungsregion des WAVES-Projektes (mit Jaguaribe-Fluß in Ceará)

2 Besonderheiten hydrologischer Modellierung als Teil der Integrierten Modellierung

Die hydrologische Modellierung innerhalb des integrierten Modells muß an die Anforderungen der „benachbarten“ Teilmodule des integrierten Modells angepaßt sein. Das kann zur Folge haben, daß gewisse Zwischenergebnisse der benachbarten Teilmodule, welche als interne Randbedingungen des hydrologischen Moduls fungieren, für die Ergebnisse dieses Moduls von sehr hoher Relevanz (vielleicht gar Dominanz) sind. Diese Randbedingungen werden in der sektoralen hydrologischen Modellierung üblicherweise als gegeben (fest) angesehen, bzw. deren Einfluß auf das Modellergebnis wird nur in Sonderfällen betrachtet. Beispiele hierfür sind die Bedeutung der Niederschlagsmenge und –intensität für die Abflußbildung oder auch die Relevanz des Baus von Stauanlagen für das Abflußverhalten eines großen Flusses. Damit wird klar, daß die Relevanz der einzelnen hydrologischen Prozesse im integrierten Modell direkt von den Anforderungen der „benachbarten“ Module abhängig ist.

Eine weitere Besonderheit ist die hydrologische Modellierung in „untypischen“ Skalen und/oder Diskretisierungseinheiten. So kann es beispielsweise erforderlich sein, die Wasserverfügbarkeit nicht für ein hydrologisches Einzugsgebiet, sondern für eine

administrative Einheit anzugeben. Diese Skalen- und Diskretisierungsunterschiede, bzw. deren Transformation bedingen zwangsläufig zusätzliche Modellunsicherheiten und einen erhöhten Parametrisierungsaufwand.

Im folgenden wird das hydrologische Modul zusammengefaßt. Ziel des hydrologischen Moduls ist die Bestimmung der natürlichen Wasserverfügbarkeit für das gesamte Untersuchungsgebiet (ca. 470000 km²). Dabei werden Abfluß und Speicherung in Oberflächengewässern und Reservoirien, Bodenfeuchte sowie Grundwasserneubildung unterschieden. Als gemeinsame räumliche Diskretisierungseinheit aller Module des integrierten Modells fungieren administrative Teilregionen, sogenannte Munizipien, mit einer Fläche von durchschnittlich 1000 km². Die übliche (an Einzugsgebieten ausgerichtete) Diskretisierung hydrologischer Modelle muß also um den Preis von Genauigkeitseinbußen dieser Vorgabe angepaßt werden. Die Zuweisung der natürlichen Einzugsgebiete zu den administrativen Grenzen wird in Abschnitt 3 näher erläutert.

Für jedes Munizip werden die verschiedenen Anteile der Wasserbilanz in Tagesschritten berechnet. Innerhalb der Munizipien erfolgt zur Abflußbildungsberechnung eine weitere räumliche Unterteilung in die drei Landschaftseinheiten Talböden, Hochflächen und Hangbereiche, für die jeweils ein ähnliches hydrologisches Verhalten angenommen wird (Abb. 2a). Die Wasserbilanz der Bodenzone einer jeden Landschaftseinheit wird über einen einfachen Speicheransatz beschrieben. In der derzeitigen Modellversion wird eine vertikale Unterteilung in einzelne Bodenhorizonte nicht berücksichtigt. Die Berechnung der Evaporation erfolgt mit dem Ansatz nach Penman-Monteith, wobei die aktuelle Verdunstung über eine empirische, nichtlineare Reduktion der potentiellen Evapotranspiration in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte ermittelt wird.

Eine besondere Bedeutung für die Abflußeigenschaften der Region und die Wasserversorgung der Bevölkerung hat eine Vielzahl kleiner Staudämme („Açudes“) mit einem Stauvolumen kleiner als 1 Mio. m³, davon 80% kleiner als 200000 m³ (ca. 70000 Açudes im semi-ariden Nordosten Brasiliens, siehe Molle & Cadier, 1992). Im hydrologischen Modul wird die Wasserbilanz dieser kleinen Reservoirie unter Berücksichtigung der Wasserentnahme für Bewässerung oder Versorgung der Bevölkerung (Kopplung zum Teilmodul Wassermanagement) summarisch für jede Landschaftseinheit beachtet. Laterale Flüsse zwischen den einzelnen Landschaftseinheiten werden sowohl für Oberflächenabfluß als auch für gesättigten unterirdischen Abfluß explizit berechnet.

Jedem Munizip wird ein Gewässerabschnitt eines großen Vorfluters zugeordnet (Abb. 2c), wobei die verschiedenen Abflußkomponenten aus den Talbereichen (Oberflächenabfluß, Ausfluß aus den dortigen Açudes und Exfiltration des Grundwasser ins Gewässer) diesem Gewässerabschnitt zufließen. Die Munizipien sind über das Gewässernetz im Sinne eines Fließbaumes miteinander verbunden, wobei jedem Munizip genau ein stromabwärts liegendes Munizip zugeordnet wird (Abb. 2c). Das Abflußrouting im Gewässernetz wird über eine lineare Transformationsfunktion unter Berücksichtigung von zeitlicher Retention und Translation angenähert. Die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten in einzelnen

Gewässerabschnitten basiert auf der Manning-Strickler-Gleichung. Die geometrischen Eigenschaften des Gewässers (Querschnitt und Gefälle) werden über einfache, z.T. empirische Ansätze aus der topographischen Information des digitalen Geländemodells geschätzt (siehe Abschnitt 3). Ein weiteres Teilmodul beschreibt die Wasserbilanz der geographisch explizit berücksichtigten großen Stauseen im Gewässernetz und berücksichtigt hierbei Zu- und Abflüsse, Niederschlag, Verdunstung und Versickerung und Steuerung der Wasserabgabe (häusliche, landwirtschaftliche und Energienutzung). Dies ist die wesentliche Schnittstelle mit dem Modul „Wassermanagement“ des integrierten Modells (siehe Abb. 2b).

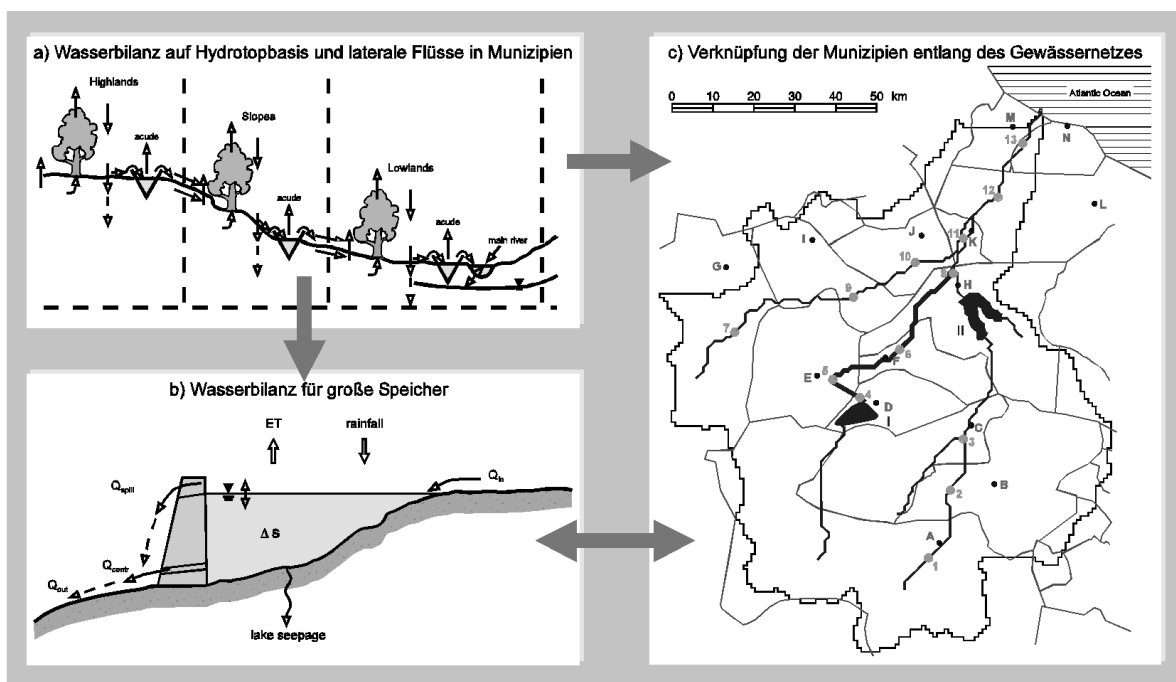


Abb. 2: Prinzip des hydr. Moduls des integrierten Modells: (a) Aufteilung von Munizipien in Landschaftseinheiten und Komponenten der Wasserbilanz. (b) Wasserbilanz großer Stauseen. (c) Beispiel für die laterale Verknüpfung der Munizipien über das Gewässernetz

3 Beispiele zu den Parametrisierungen

Eine hydrologische Modellierung im Kontext der integrierten Modellierung (große Gebiete, untypische Diskretisierungseinheiten, besondere Anforderungen zur Repräsentierung einzelner Prozesse) erfordert einen generell hohen Parametrisierungsaufwand. Ein Teil dieser Arbeiten kann auf GIS-Basis durchgeführt werden, insbesondere die Verschneidung verschiedener räumlicher Unterteilungsstrukturen und die flächendifferenzierte Ableitung von Modellparametern, welche auf verfügbaren, grundlegenden Geodaten basieren. Am Beispiel der Ableitung von Parametern für das Abflußrouting wird im Folgenden die Vorgehensweise exemplarisch erläutert. In Abb. 3 sind die einzelnen Schritte schematisch zusammen gestellt.

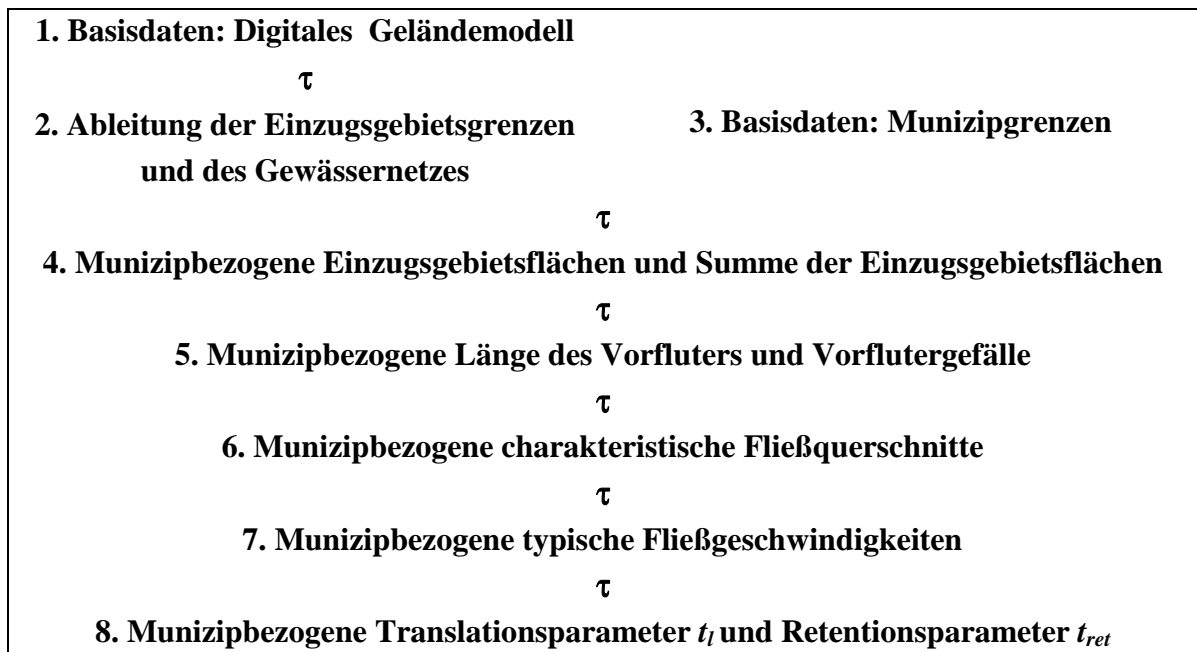


Abb.3: Schematische Darstellung der Ableitung der Routing-Parameter t_l und t_{ret}

Ableitung von Einzugsgebietsgrenzen und Gewässernetz aus dem DGM (1 & 2)

Als Grundlage für die Ableitung topographischer Parameter dient das 30-Arc-Sec Geländemodell des (USGS, 1996). Die Höhendaten wurden zunächst von Geographischen Koordinaten nach UTM konvertiert, um eine möglichst flächentreue Abbildung zu erhalten. Die Pixelauflösung in UTM beträgt 1km^2 . Bevor weitere Reliefparameter abgeleitet werden konnten, mußte über die ARC/INFO-Fill-Funktion (ESRI, 1993) ein senkenloses, digitales Geländemodell erzeugt werden. Auf Grundlage dieses "bereinigten" Modells wurden im D8-Algorithmus (von Werner, 1995) die Abflußrichtung und die Fließakkumulation bestimmt. Mit diesen Parametern kann das Flußnetz sowie die Einzugsgebiete für ausgesuchte Pegel an den Hauptflüssen ermittelt werden. Dafür müssen die Koordinaten der Meßstationen in das GIS eingelesen werden (Maidment, 1996).

Ein Vergleich mit dem digitalisierten Flußnetz zeigt, daß gewisse systematische Abweichungen auftreten. Diese Abweichungen resultieren zum einen aus der relativ groben Auflösung (1km^2 -Raster) und zum anderen in der automatischen Festlegung von Abflußrichtungen in wenig reliefiertem Gebieten (Tiefland). Hier wird der kürzeste Weg zum jeweiligen Hauptvorfluter gesucht (Tomlin, 1990).

Ableitung der lateralen hydrologischen Verknüpfung der Munizipien (3 & 4)

Die Munizipengrenzen liegen für beide Bundesstaaten (Ceará und Piauí) als Polygon-Coverage im ARC/INFO-Format vor. Insgesamt existieren 332 Munizipien. Aufgrund der verschiedenen Datenquellen gibt es keine eindeutige gemeinsame Grenze.

Die Hauptvorfluter wurden durch Editieren des o.g. Flußnetz-Vektordatensatzes abgeleitet. Dabei wurde jeweils nur eine unverzweigte Polylinie pro Munizip als zugehöriger Hauptvorfluter zugelassen, wodurch parallele Abflußdarstellungen vermieden werden konnten. Durch die Verschneidung von Munizipgrenzen, Teileinzugsgebieten und Gewässersystem konnte in erster Näherung die laterale hydrologische Verknüpfung der Munizipen ermittelt werden. Da nicht jedem Flußabschnitt immer nur ein einziges Munizip automatisch zuzuordnen ist, mußte in einem zweiten Schritt das daraus entstandene, durch das Flußsystem verbundene Munizipienetz manuell korrigiert werden. Durch eine einfache Addition der Flächen der betreffenden Munizipen wird die kumulative Einzugsgebietsfläche für alle Munizipen ermittelt. Dieser Parameter wird für die Abschätzung des mittleren Fließquerschnittes des Hauptvorfluters in jedem Munizip benötigt (Schritt 6).

Ableitung munizipbezogener Länge und Gefälle des Vorfluters (5)

Durch den zuvor erzeugten Bezug zwischen Munizippolygon und Vorflutervektor kann innerhalb des GIS die Fließlänge des Hauptvorfluters pro Munizip abgeleitet werden. Genauigkeitsprobleme treten auch hier aufgrund der 1km-Rasterweite auf, da der minimale Abstand der Vektorstützpunkte nicht geringer als der Abstand der Pixelmittelpunkte (1km bzw. ~1.41km) sein kann. Mäanderschleifen unter einem Kilometer Größe werden z.B. nicht berücksichtigt, was die Annahme von zu kurzen Durchflußwegen mit sich bringen kann. Ein Vergleich mit dem vorliegenden digitalisierten Flußnetz steht noch aus.

Das mittlere Gefälle des Vorfluters pro Munizip wird ausgehend von den zonalen Maxima und Minima in ARC/INFO-GRID ermittelt (ESRI, 1993). Zur Verschneidung mit dem DGM ist dabei eine Konvertierung von Vorfluternetz und Munizipengrenzen in Rasterdarstellung notwendig. Um Höhenmaxima, -minima und Gefälle in die Polygonattributtabelle einzutragen, werden die Rasterdaten dann wieder in Vektoren rückkonvertiert. Das durchschnittliche Gefälle kann nun direkt berechnet werden.

Munizipbezogene charakteristische Fließquerschnitte (6)

Es gibt eine Reihe von Verfahren zur Schätzung der Querprofilgeometrien von großen Flüssen in Abhängigkeit von den geomorphologischen Grundgegebenheiten der Landschaft (siehe z.B. die Übersicht in Leopold et al., 1964). In diesem Fall wurde der von Allen et al. (1994) vorgestellte Ansatz verwendet. Dabei gehen Vorflutergefälle und zugehörige kumulative Einzugsgebietsfläche in den empirischen Ansatz ein, als Ergebnis werden Schätzwerte der Breite und Tiefe des Vorfluters geliefert.

Munizipbezogene typische Fließgeschwindigkeiten (7)

Mit dem aus dem genannten Verfahren geschätztem Querprofil und dem Vorflutergefälle (Schritt 5) kann über die Manning-Strickler-Gleichung die zugehörige Fließgeschwindigkeit berechnet werden. Um eine gewisse Verteilung möglicher Fließgeschwindigkeiten zu erhalten, wird dieses Verfahren für verschiedene Fließtiefen des

Vorfluters durchgeführt: Vollfüllung (ergibt max. Geschwindigkeit), 2/3-Füllung (ergibt die mittlere Fließgeschwindigkeit) und 1/10-Füllung (ergibt minimale Geschwindigkeit)

Munizipbezogene Translations- und Retentionsparameter (8)

Anhand der oben abgeleiteten Geschwindigkeiten und der Fließlängen (Schritt 5) können maximale, mittlere und minimale Fließzeiten des Hauptvorfluters durch die Munizipien berechnet werden. Dies wird als einfache Dreiecksverteilung der Fließzeiten betrachtet, welche direkt als Impulsantwortfunktion mit den Parametern Translationszeit (mittlere Fließzeit) und Retentionszeit (max – min. Fließzeit) für das Abflußrouting durch das Munizip verwendet wird.

Mit der in diesem Abschnitt vorgestellten „Parametrisierungskette“ werden die munizipbezogenen Parameter des Abflußroutings ermittelt. Jeder Schritt des Verfahrens beinhaltet gewisse Unsicherheiten. Deren Quantifizierung und Einflußabschätzung auf die Ergebnisse des Abflußroutings (Sensitivität) steht noch aus.

4 Exemplarische Ergebnisse

Die mit dem vorgestellten Modul „Großskalige Hydrologische Modellierung“ innerhalb des integrierten Modells bislang erzielten Ergebnisse werden anhand einiger Beispiele dokumentiert:

Im Einzugsgebiet des Jaguaribe (siehe Abb. 1) mit einem Gesamtgebiet von 77500 km² wurde in Tageszeitschritten für den Zeitraum von 1920 bis 1980 flächendetailliert die Modellierung durchgeführt. In Abb. 4a) ist für einen Zeitraum von 3 Jahren (1955 - 1957) der berechnete Abfluß am Pegel Iguatú in Tagesschritten dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten ist zufriedenstellend: Das charakteristische, saisonale Abflußverhalten wird gut wiedergegeben, die einzelnen Tageswerte weisen z.T. große Unterschiede auf, was sowohl auf die nur grob gegebenen Niederschlagsrandbedingungen als auch auf die noch sehr grobe Bodenparametrisierungen zurückzuführen ist.

In Abb. 4b) ist der mittlere Abfluß (mittlere Monatswerte für die Periode 1920 – 1980) für drei Pegel im Jaguaribe-Gebiet dargestellt. Die Übereinstimmung ist z.T. sehr gut (Pegel Iguatú, 24790 km²) z.T. auch sehr dürftig (Pegel Arneiroz, 6920 km² und Pegel Peixe Gordo 48790 km²). Die gute Übereinstimmung ist wohl eher zufällig (es handelt sich um erste, ungeeichte Ergebnisse), die Gründe für die Abweichungen wurden bereits zuvor skizziert.

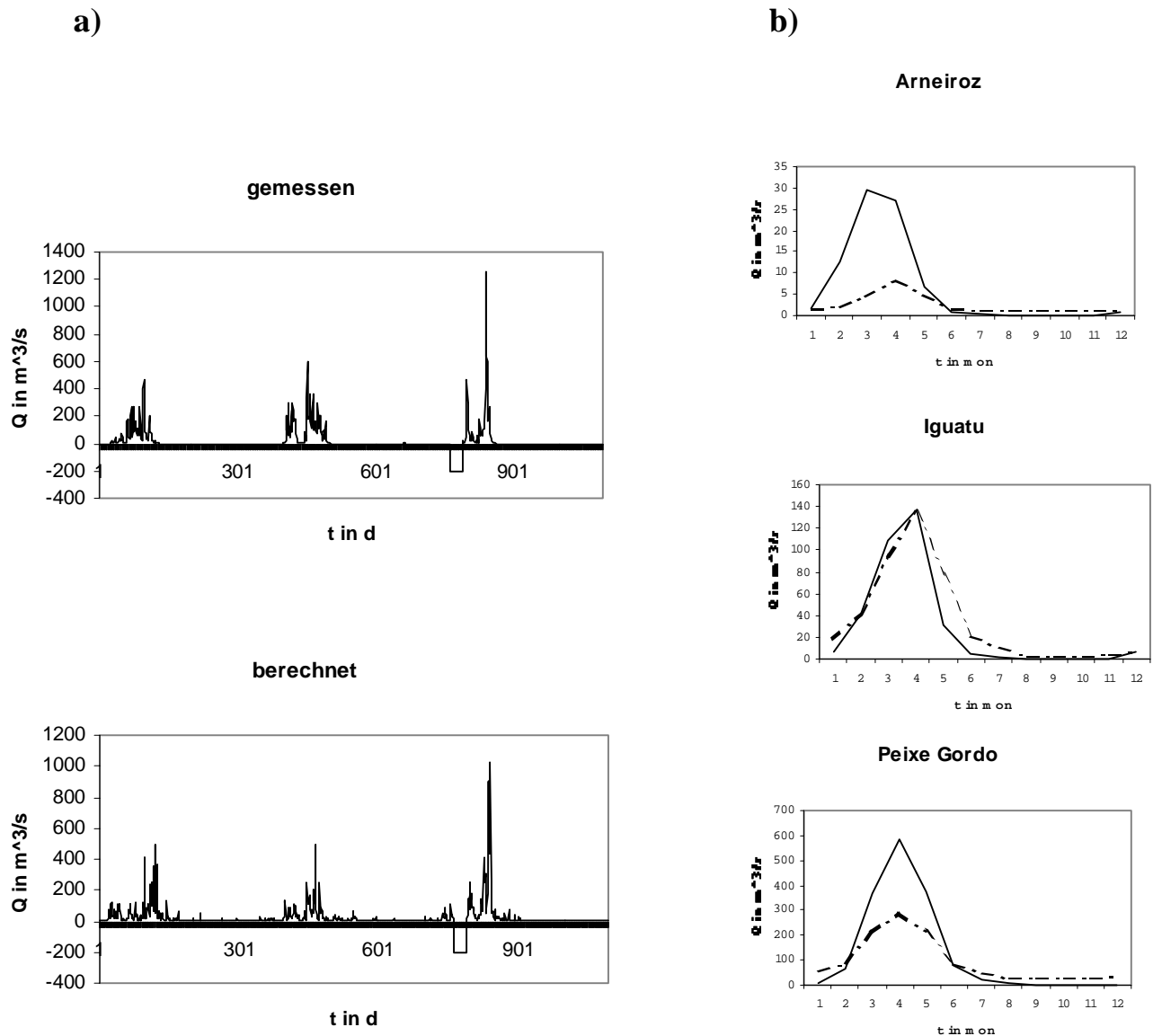


Abb. 4: Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Abflüssen: (a) Tageswerte am Pegel Iguatú 1955-57 (neg. Werte markieren Fehlzeiten) (b) mittlere Monatswerte 1920-80 (— gemessen, --- berechnet)

5 Schlußfolgerungen

Im momentanem Zwischenstadium der Entwicklung des integrierten Modells können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Als Teil des integrierten Modells repräsentiert das großskalige hydrologische Modul bisher die charakteristischen Bedingungen der Wasserverfügbarkeit in Ceará und Piauí.
- Die Anpassung an gemeinsame Skalen, interne Randbedingungen und spezifische Fragestellungen des integrierten Modells (Schnittstellen mit den anderen Modulen) erfordert einen hohen, zielorientierten und GIS-basierten Parametrisierungsaufwand.

- Die Wasserbilanz, dabei insbesondere die Abflußbildung in verschiedenen Skalen, ist bei der hier diskutierten Fragestellung eine entscheidende Komponente des integrierten Modells. Unter Beachtung der Datensituation, der vorgegebenen Skale und der spezifischen semi-ariden Bedingungen ist daher die Entwicklung verbesserter Prozeßformulierungen erforderlich.
- Erste Sensitivitätsuntersuchungen haben gezeigt, daß folgende Schnittstellen zu anderen Modulen des integrierten Modells entscheidend für die Berechnung der Wasserverfügbarkeit sind: Niederschlag, Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte (Klima-Schnittstelle), durchwurzelte Bodentiefe, Wasserhaltekapazität des Bodens (Agroökologie-Schnittstelle), Wasserentnahme aus Stauseen und Flüssen (Wassermanagement-Schnittstelle).
- Die Relevanz von Skalierungsfragen muß für jeden modellierten Prozeß im Einzelnen geklärt werden.

Danksagung: Die Arbeiten wurden innerhalb des WAVES-Projektes („Water availability, vulnerability of ecosystems and society in the Northeast of Brazil“) des BMBF in den Teilprojekten „Klimaanalyse/-modellierung und großskalige hydrologische Modellierung“ (FKZ: 01 LK 97121) und „Integrierte Modellierung“ (FKZ: 01 LK 9713) durchgeführt.

Literatur

- Allen, P. M., Arnold J.G. & Byars B.W. (1994): Downstream channel geometry for use in planning level models, in *Water Resources Bulletin*, Vol. 30, No.4, 663-671
- ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc.) (1993): *Understanding GIS. The ARC/INFO Method, Rev. 6 for workstations*, New York
- Leopold, L.B., Wolman, W.G. & Miller, J.P. (1964): *Fluvial Processes in Geomorphology*, W.H. Freeman, San Francisco, 522 pp.
- Maidment, David R. (1996): *GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress. Proceedings of the 3rd Int. Conference on GIS and Environmental Modeling. Santa Fe, New Mexico, Jan 20-25, 1996. (CD-ROM)*
- Molle, F. & Cadier, E. (1992): *Manual do Pequeno Açude. SUDENE, Recife*
- Tomlin, D.C. (1990): *Geographic Information Systems and Cartographic modeling. School of Natural Resources. The Ohio University. Prentice Hall, Englewood Cliffs. New Jersey, 303 pp.*
- USGS (1996): *GTOPO30 Documentation.*
(<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/README.html>)
- von Werner, Michael (1995): *GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation an der Freien Universität Berlin* (http://mercator.geog.fu-berlin.de/~erosion/diss_pdf.html)