

**Untersuchungen zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet
des Rio Guaribas, Focusgebiet Picos/Piauí,
mit dem Modellansatz
WARIG – Modeling of Water Availability and
Quality in Rio Guaribas Basin**

Gerold Heinrichs, Ulrich Voerkelius

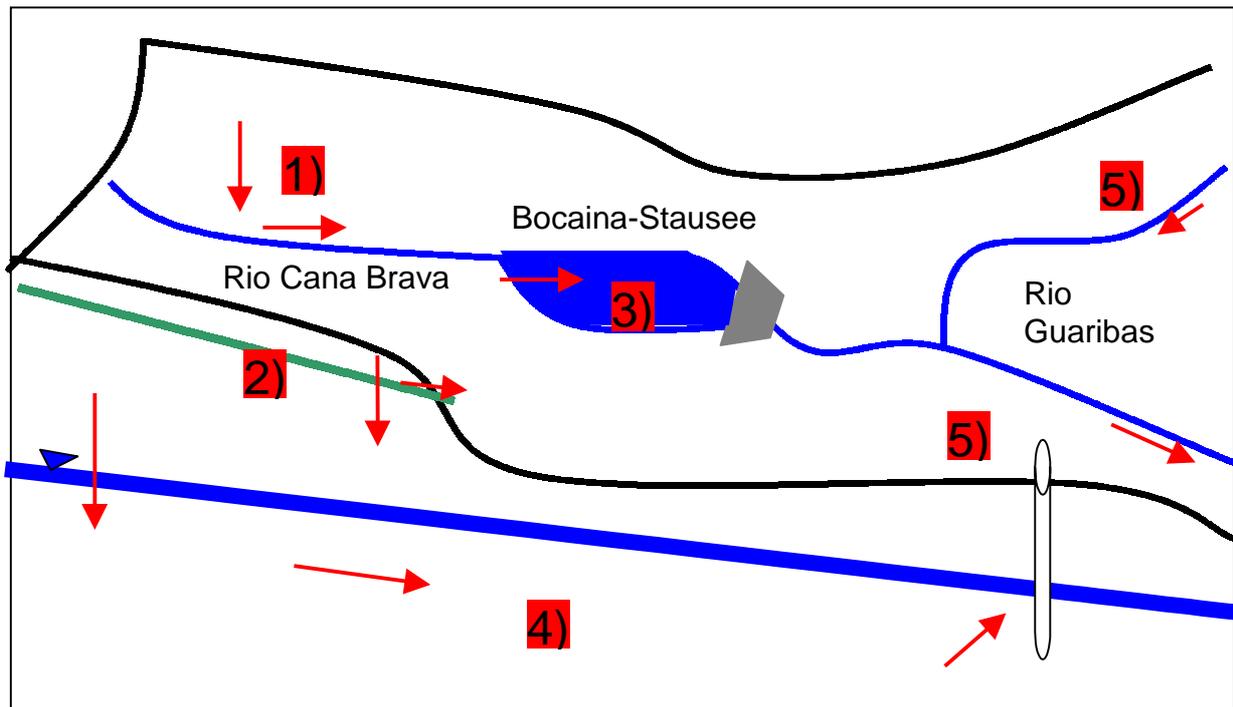
Das Wasserhaushaltsmodell WARIG-*Modeling of Water Availability and Quality in Rio Guaribas Basin* wird aus sich ergänzenden Modulen aufgebaut und hat folgende Ziele, Nutzungen und Verknüpfungspunkte:

- a) Das Wasserhaushaltsmodell WARIG ist die kleinskalige Überprüfung (Validierung von Oberflächenabfluß, Oberflächenwasserverfügbarkeit, Grundwasserverfügbarkeit) des großskaligen Wasserhaushaltsmodelles (HYMO/PIK)
- b) Auf der kleinen Skalenebene ist es im Gegensatz zur großskaligen Modellierung möglich, eine Grundwassermodellierung durchzuführen. In beiden untersuchten Bundesstaaten, aber vor allem in Piauí, ist die Grundwassernutzung von erheblicher Bedeutung.
- c) Der Aufbau von WARIG in einzelne Teilmodelle ermöglicht es, je nach Datengrundlage und Notwendigkeit unterschiedliche Auflösungen zu bearbeiten (z.B. 100*100 m Oberflächenabfluß, 1000*1000m Grundwasser). Die flächenbezogene Datenübergabe erfolgt auf der Ebene des GeoInformationSystems.
- d) Die mit WARIG berechnete Wasserverfügbarkeit ist eine wesentliche INPUT-Größe in das integrative Modell auf der kleinskaligen Ebene (MOSDEL/LÖK)
- e) Für ein regionales Wassermanagement beschreibt WARIG das Wasserdargebot, NoWUM (GhK) die Wassernutzung und MOSDEL verknüpft beide Teilaspekte.
- f) In einer Region wie Picos, deren große Prosperität im wesentlichen auf der Möglichkeit zur Grundwassernutzung beruht, können mit dem Modell Zukunftssimulationen zur Wasserverfügbarkeit in Abhängigkeit veränderter Klimabedingungen (Klimaszenarien, CLIMO/PIK), veränderter Wassernutzungsbedingungen (NoWUM/GhK) oder veränderter Bodennutzungsbedingungen (MOSDEL/LÖK) auf kleinskaliger Ebene durchgeführt werden. Damit können Veränderungen und deren Auswirkungen relativ genau beschrieben werden.
- g) Für die lokale und regionale Planung leistet die Modellierung einen wertvollen Beitrag. Die Ergebnisse werden gemeinsam mit den brasilianischen Partnern ermittelt und präsentiert. Hierbei ist im besonderen die optimale Visualisierbarkeit (z.B. Grundwasserabsenkung und -strömung) wichtig für die Übermittlung von den Ergebnissen.
- h) Das Modell WARIG bringt die lokalen Bodenwasserhaushaltsuntersuchungen der AG Standortkunde in die Fläche.
- i) Szenarien können im Detail bezüglich der Wasserverfügbarkeit validiert werden (Szenariengruppe).

Die WARIG-Arbeitsgruppe besteht aus folgenden Bearbeitern:

Gerold Heinrichs, Hydroisotop, Koordination / Ulrich Voerkelius, LÖK, Koordination / Sebastian Mörtel, LÖK / Ruth Lang, LÖK / Dietrich Halm, Uni. Hohenheim / Valdira Brito, DHME-Teresina / Margarita Maria López Gil, DHME-Teresina.

Die einzelnen Module des Wasserhaushaltsmodelles und deren Teilziele werden im folgenden vorgestellt:



Modul 1) Oberflächenabflussmodellierung mit SCS / AG LÖK & Uni Hohenheim

- die zeitlich und räumlich differenzierte Ermittlung des Anteiles Oberflächenabfluß am Niederschlag
- die zeitlich und räumlich differenzierte Ermittlung des Oberflächenwasserdargebotes (Anteil Oberflächenabfluß)

Modul 2) Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit SIMPEL / AG LÖK & Uni Hohenheim

- die zeitlich und räumlich differenzierte Ermittlung des Anteiles Verdunstung am Niederschlag
- die zeitlich und räumlich differenzierte Ermittlung des Anteiles Interflow /Grundwasserneubildung am Niederschlag
- die zeitlich und räumlich differenzierte Ermittlung des Oberflächenwasserdargebotes

Modul 3) Speicherhaushalt Bocaina-Stausee / AG Hydroisotop & DHME-Teresina

- Volumenberechnung des Stausees (GIS/LÖK)
- Messung und Berechnung der Volumenveränderung
- Verdunstungseinfluß
- Kalibrierung der Volumenänderung mit SCS- und Bodenwasserhaushalt
- Simulation von veränderten Input und Auslaßdaten

Modul 4) Grundwassermodellierung: MODFLOW / AG Hydroisotop

- die zeitlich, räumlich und tiefenabhängige Ermittlung des Grundwasserdargebotes

Modul 5) Monitoring GWspiegel und Oberflächenwasserabfluss / AG Hydroisotop & DHME

- Basisdaten für Modelle
- Kalibrierung der jeweiligen Modelle

Festlegung der Bearbeitungsfläche

Das Modell wurde im rasterorientierten Programmmodul ARC/INFO® GRID™ aufgebaut. Die räumlichen Datengrundlagen müssen daher als Raster („Grids“) vorliegen. Die Festlegung des WARIG-Untersuchungsgebietes erfolgt auf Basis der geologischen Karte und richtet sich nach dem schon festgelegten Untersuchungsgebiet des Modelles MOSDEL. Das WARIG-Gebiet ist das Einzugsgebiet des Rio Guaribas bis zur Meßstelle ANGICAL (DHME und Hydroisotop). Nicht vollständig betrachtet werden die Flußsysteme Rio Riachão und Riacho São João. Mit dem Untersuchungsgebiet werden alle geologischen Einheiten im Modellgebiet erfaßt. Das WARIG-Untersuchungsgebiet überdeckt das Gebiet indem MOSDEL realisiert wird.

Mit WARIG werden die Municipien Picos, Bocaina, São João do Cana Brava, Sto. Antônio do Lisboa erfaßt. Für den Vergleich mit den großskaligen hydrologischen Modellansätzen HYMO und NoWUM, die als Flächenbezug die Municipien bearbeiten, stehen somit vier verschieden strukturierte Municipien zur Verfügung.

Das Munizip Picos ist mit heute rund 800 Brunnen und eine mehrheitlich urbane Bevölkerung und Struktur geprägt. Es wird fast ausschließlich aus Grundwassers genutzt. Die Municipien Bocaina und Sto. Antônio do Lisboa sind ländlich strukturierte, jedoch stark städtisch orientierte Municipien. Die Anbindung an die Stadt Picos ist bei beiden sehr gut. Im Munizip Bocaina liegt der Bocaina Stausee. Zur Bewässerung von Feldern unterstromig des Stausees wird das Stauseewasser verwendet. Das Munizip São João do Cana Brava ist ländlich strukturiert. Die Wasserversorgung basiert fast ausschließlich auf Grundwasser.

Die Ursprungskarten zu Höhenlinien, Einzugsgebietsgrenzen, Oberflächengewässern und Brunnenstandorten werden auf der GIS-Ebene als Grundkarte festgelegt und sowohl mit einem 100m x 100m Raster als auch mit einem 1000m x 1000 m Raster versehen. Alle Rasterflächen auf beiden Auflösungsebenen werden mit verschiedenen z-Werten belegt.

Festlegung der Schnittstellen, Datenübergabe

Die Dynamische und flächige Modellierung des Oberflächenabflusses im Focusgebiet erfolgt mit Hilfe des Geographischen Informationssystems (Arc/Info) in Abhängigkeit von Boden (Bodenfeuchtegruppen, FB Standortkunde), Landbedeckung und Topographie. Der Modellierungszeitschritt ist ein Tag. Als Voraussetzung für das eingesetzte SCS-Verfahren wurde das vorhandene Digitale Geländemodell (DGM) aufbereitet (depression less grid) sowie die Eingabegeometrien für die Modellierung (flow accumulation, flow direction, streamline, aspect etc.) erzeugt. Für ein Teilgebiet liegen plausible Probeläufe vor. Als weitere Anpassung sollen die verwendeten CN-Werte durch solche, die auf semi-aride Gebiete besser passen ersetzt werden. Als letzter Optimierungsschritt ist eine Koppelung des Bodenwassermodells mit dem Oberflächenabflußmodell geplant.

Die Schnittstelle von SCS und SIMPEL zu MODFLOW, also die Übergabe der flächenbezogenen - und in einem zweiten Schritt der zeitbezogenen - Grundwasserneubildung erfolgt ebenfalls über die GIS-Ebene. Der erste Schritt, die Festlegung des Arbeitsgebietes mit der Übergabe der Rasterdaten und die Darstellung der Geländehöhe als Bezugshorizont für die Aquifermächtigkeiten sind erfolgt. Als nächstes wird die Übergaben von Rasterdaten der Grundwasserneubildung erfolgen.

WARIG- Modul SCS-Oberflächenabfluß (Verfahren des U.S. Soil Conservation Service)**FUNKTION**

Die auf einem empirischen Ansatz beruhende CN-Methode des U.S. Soil Conservation Service (USDA, 1972) wurde zur Berechnung der Abflussbildung in Einzugsgebieten ohne Messdaten entwickelt und beruht auf der Annahme, daß bei einem unendlich lang andauernden Regenereignis das Verhältnis von abflusswirksamen Niederschlag zu Gesamtniederschlag nach Abzug der auftretenden Anfangsverluste gleich der potentiellen zur tatsächlichen Infiltration (ohne Anfangsverluste) ist. Die Entwicklung dieses empirischen Verfahrens fand auf der Grundlage von gemessenen Niederschlags- und Abflußereignissen einer großen Anzahl kleiner Wassereinzugsgebiete in den USA statt und eignet sich besonders für Gebiete mit hohen Niederschlagshöhen und –intensitäten. Vorteil dieses Verfahrens ist die einfache Parametrisierung bei Berücksichtigung der für den Oberflächenabfluß als relevant betrachteten Standortfaktoren Bodenart und Landnutzung sowie der Vorfeuchte. Subsumiert werden diese Größen in einer sogenannten „Curve Number“ (CN), die Werte zwischen 0 (hohes Retentionsvermögen des Standortes) und 100 (geringes Retentionsvermögen des Standortes) annehmen können. Nach dem SCS-Verfahren bestimmt sich der oberflächige Abfluss eines Niederschlagsereignisses nach folgender Gleichung:

$$A_o = \frac{(N - 0,2 * s)^2}{N + 0,8 * s} \quad \text{mit} \quad s = 254 * \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Für $N \leq 0,2 * s$ gilt: $A_o = 0$

A_o = oberflächiger Abfluss des Niederschlagsereignisses [mm]

N = Niederschlagshöhe des Ereignisses [mm]

CN = standortspezifischer Abflussbeiwert (Runoff curve number) [-]

INPUT

Niederschlag	⇒	WAVES- Klimastationen
Landnutzung	⇒	Satellitenbildinterpretation, Szene Juli 1996, mit Hilfe von ERDAS-IMAGINE [®]
Boden	⇒	SOTER
Hydrologische Bodengruppen	⇒	LÖK, Uni Hohenheim

OUTPUT

1. Rasterkarten (Grids) Tages-, Dekaden-, Monats- bzw. Jahresbezogene Grids der Höhe des Oberflächenabflusses einer jeder Gridzelle = Abflusswirksamer Anteil eines Niederschlags (Direktabfluß)
2. Statistiken

ERGEBNIS

Der Oberflächenabfluß für 1996 aus dem Rio Cana Brava Einzugsgebiet liegt in erster Abschätzung bei < 10 mm von ca. 600 mm Niederschlag. Das entspricht in etwa 137 l/s/Gebiet oder 4.329.262 m³/a oder ca. 15 cm Wasserstand im abstromig gelegenen Bocaina Stausee.

Die Ergebnisse sind die Basis für Bodenwasserhaushalt und Input für Bocaina-Speicherhaushalt

WARIG- Modul Bodenwasserhaushalt**FUNKTION**

Das eingesetzte Speichermodell entspricht bis auf kleinere Anpassungen für den semi-ariden Bereich, dem Modell SIMPEL von G. HÖRMANN (1996). SIMPEL ist ein Speichermodell, welches in Tagesschritten abläuft. Es liegt als Excel-Programm vor. Da dieses Modell für alle vorkommenden Kombinationen aus Standort- und Nutzungseinheiten angewendet werden muß, erfolgte eine Umsetzung in ein dBASE-Programm. So können die einzelnen Datendurchläufe programmgesteuert erfolgen und eine problemlose Koppelung an das GIS ist möglich. Simpel läuft mit drei Wasserspeichern: Blattinterzeptions-, Auflagehorizont- und Bodenspeicher. Jeder Speicher gibt das Überschußwasser aus Wasserzufuhr und Verdunstung an den tiefer gelegen weiter. Die Versickerung aus dem Bodenspeicher erfolgt nicht erst bei „Überlauf“, sondern benutzt den Ansatz nach Glugla, der bei zunehmender Speicherfüllung zunehmend Versickerung zuläßt.

Eingangsgrößen für die Berechnung sind Niederschlag, Temperatur und rel. Luftfeuchte. Das eingesetzte Verfahren ist die Evapotranspirationsberechnung nach Haude. Sie liefert in der Tendenz zu niedrige Werte und soll durch die Berechnung nach Penman-Montheith ersetzt werden. Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Vegetationstypen erfolgt über die Durchwurzelungstiefe (Bodenspeicher), einen Reduktionsansatz für die Transpiration bei abnehmender Speicherfüllung und über die Pflanzenfaktoren bei der Evapotranspirationsberechnung. Vergleiche mit den Modellläufen (HILLFLOW) des FB Standortkunde (D. Halm) dienen der Validierung.

INPUT

Niederschlag, Relative		
Luftfeuchtigkeit, Temperatur	⇒	Uni Hohenheim und PIK-Projektklimastation
Landnutzung/-vegetation	⇒	Satellitenbildinterpretation, Szene Juli 1996, mit Hilfe von ERDAS-IMAGINE
Boden: Feldkapazität, Permanenter		
Welkepunkt, Durchwurzelungstiefe	⇒	SOTER, Uni Hohenheim

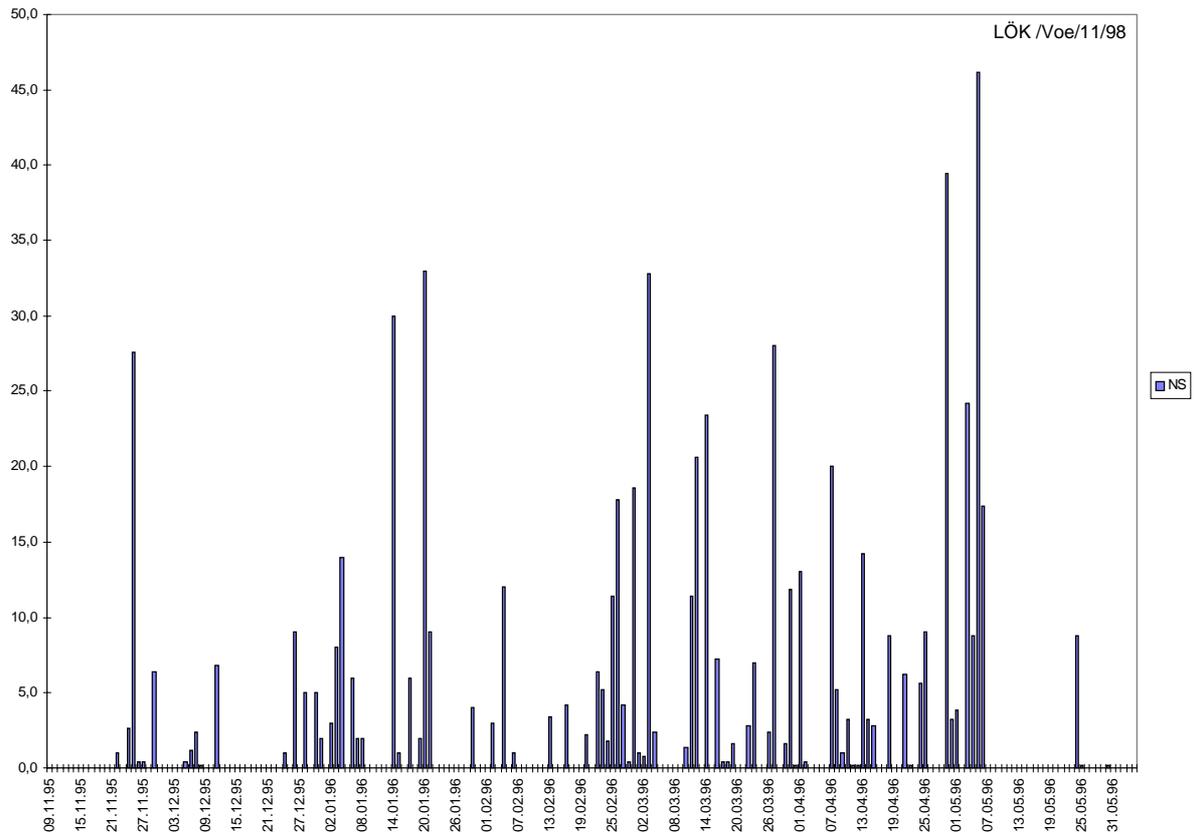
OUTPUT

aktuelle Evapotranspiration
Bodenfeuchte
Abfluß (Interflow, Grundwasserneubildung)

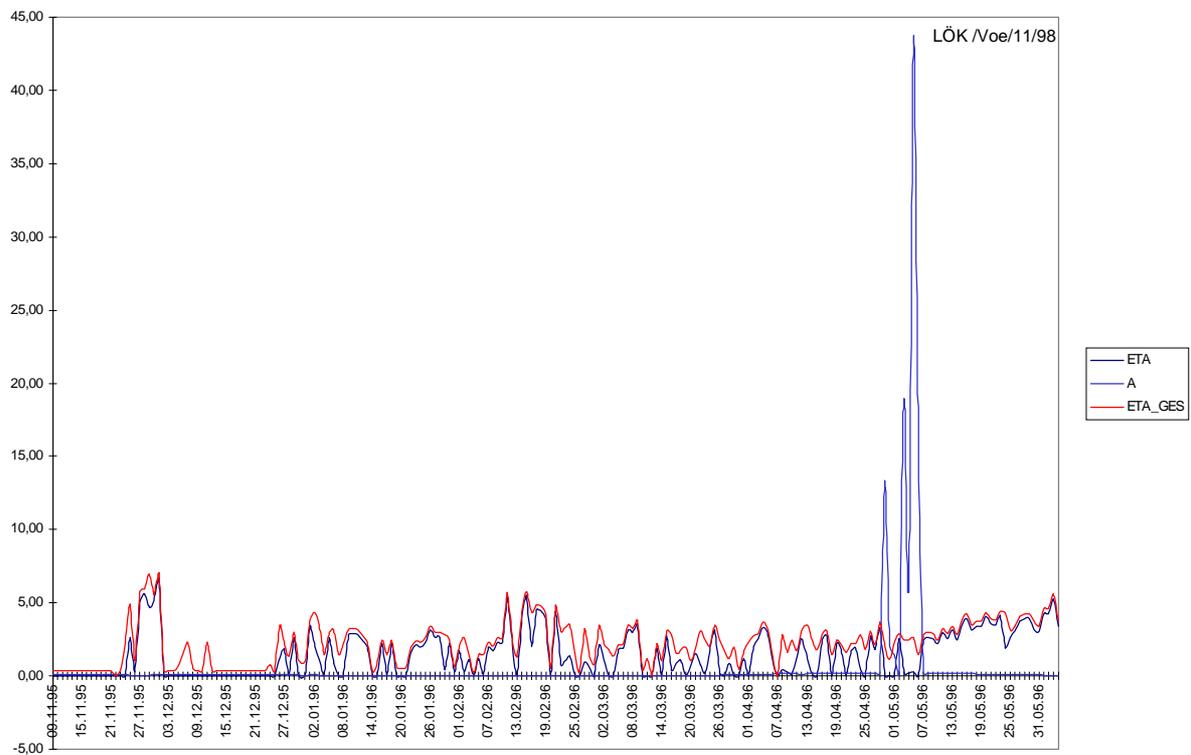
ERGEBNIS**ERGEBNIS**

Erste Abschätzung des Bodenwasserhaushaltes im Rio Cana Brava Einzugsgebiet
Grundwasserneubildung 45 mm im Mai 1996 im Gegensatz zu 10 mm (bisherige Abschätzung)

Bodenwasserhaushalt Picos - Niederschläge (9.11.95 - 4.6.96)



Bodenwasserhaushalt Picos - Abfluß und aktuelle Evapotranspiration (9.11.95 - 4.6.96)



WARIG- Modul Speicherhaushalt Bocaina

FUNKTION

Der Bocaina-Stausee stellt mit einer Fläche von 11 km² und einem Volumen von 106.000.000 m³ Wasser einen Zwischenspeicher für ein Einzugsgebiet von 960 km² dar. Mit der kontinuierlichen Wasserstands- und Volumenmessung und -berechnung lassen sich die Oberflächenabflüsse der oberstromigen Niederschläge feststellen und damit die Module Oberflächenabfluß und Bodenwasserhaushalt kalibrieren.

Der Verdunstungseinfluß ist feststellbar. Mit veränderten Input- und Auslaßdaten sind Zukunftssimulationen zur Wasserverfügbarkeit möglich.

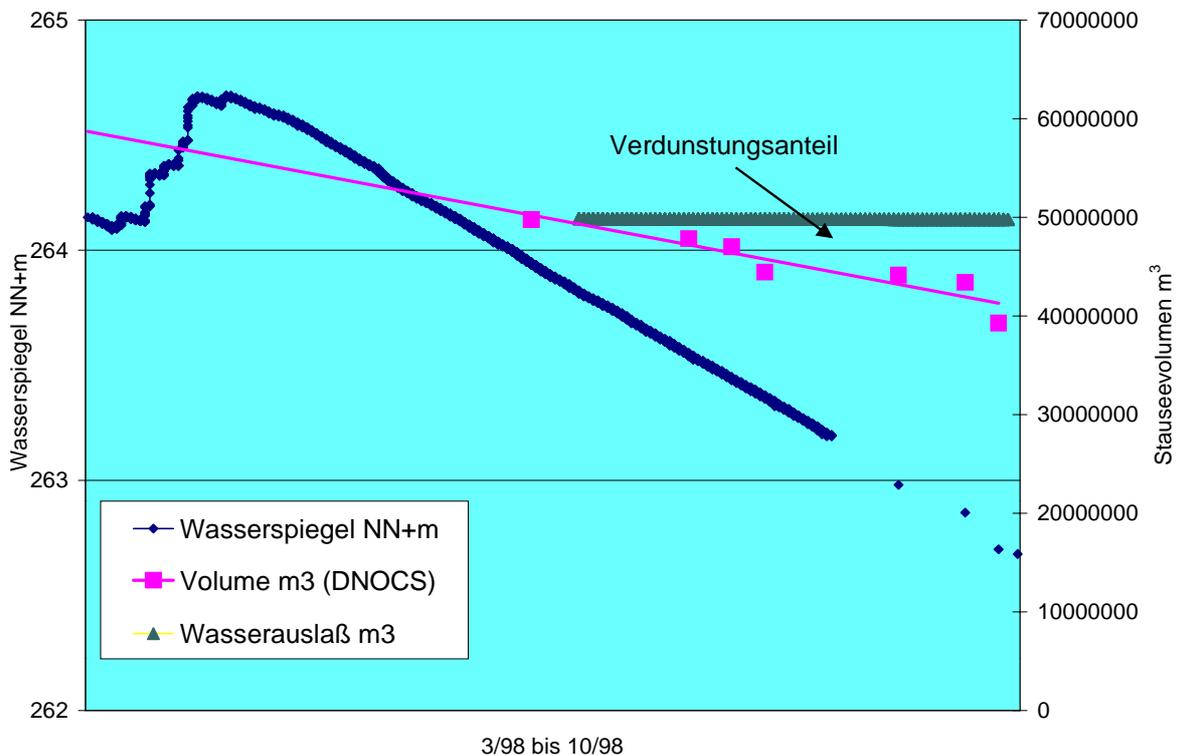
INPUT

Niederschlag	⇒	Klimadaten Hohenheim, LÖK, PIK, eigene Messungen
Verdunstungsberechnung	⇒	eigene Berechnungen, DHME, DNOCS Messungen
Zufluß	⇒	SCS-Modul, Bodenwasserhaushalts-Modul,
Abfluß	⇒	DNOCS, DHME, eigene Messungen

ERGEBNIS

Mit dem Modul Speicherhaushalt Bocaina Stausee läßt sich der für den Betrachtungsraum wichtige Oberflächenspeicher beschreiben: Auffüll- und Speicherverhalten, Verdunstungsmengen und technischer Auslauf. Die ersten Ergebnisse aus dem Frühjahr 1998 zeigen den geringen Einfluß des technischen Auslaufes gegenüber der Verdunstung. Sie zeigen auch, daß selbst kleinere Niederschlagsereignisse im Seewasserspiegel bemerkbar sind.

WARIG- Modul Speicherhaushalt Bocaina



WARIG- Modul Grundwasserhaushalt

FUNKTION

Die für wasserwirtschaftliche Fragestellungen im allgemeinen wichtigen Größen wie Fließgeschwindigkeit oder Abfluß sind nicht direkt meßbar. Sie werden indirekt aus meßbaren Größen wie Grundwasserspiegellagen bestimmt. Ein numerisches Modell vermittelt zwischen meßbaren und benötigten Größen und läßt, einmal am Ist-Zustand kalibriert, die Berechnung von Zukunftsszenarien zu. Die ohne Zweifel bedeutenste wasserwirtschaftliche Frage im Untersuchungsgebiet bei Picos ist: wieviel Grundwasser kann unter der Voraussetzung der nachhaltigen Bewirtschaftung entnommen werden? Das hierfür eingesetzte Grundwassermodell MODFLOW ist ein weltweit eingesetztes 3-dimensionales Finite Differenzen Programm zur numerischen Grundwassermodellierung des USGS. Es wird genutzt zur Strömungsmodellierung.

Die theoretischen Grundlagen der Strömungsmodellierung sind die Kontinuitätsgleichung und das Darcy-Gesetz. Aus beiden Grundprinzipien folgt die Strömungsgleichung, die analytisch (z.B. Pumpversuchsauswertung) oder numerisch gelöst werden kann. Eine numerische Lösung ist erforderlich, wenn eine räumlich und zeitlich diskretisierte Wasserbilanz für ein Gebiet erstellt werden soll. Die Elemente dieser Bilanz sind unter INPUT aufgelistet. Da das Untersuchungsgebiet durch drei übereinander liegende, nach Südwesten einfallende geologische Einheiten geprägt ist, deren vertikale Erstrecken bis zu 400 m reicht, wird ein 3-dimensionales Strömungsmodell entwickelt. Das zur Anwendung kommende Differenzenmodell teilt den Aquifer in Rechtecke ein, deren vertikale Ausdehnung durch die Aquifermächtigkeit gegeben ist. Für jedes Rechteck wird eine Wasserbilanz aufgestellt. Jede Zelle steht im Austausch mit ihren vier Nachbarzellen. Die Summe der horizontalen Zuflüsse aus den Nachbarzellen und der vertikalen Zugaben oder Entnahmen (Grundwasserneubildung, Brunnen) innerhalb eines Zeitintervalls steht mit dem im Zeitintervall gespeicherten Volumen im Gleichgewicht (Kontinuitätsgleichung). Die horizontalen Zuflüsse werden mit dem Darcy-Gesetz berechnet.

INPUT

Netzgenerierung	⇒	Einbezug von GIS, LÖK
Grenzen des Modellgebietes	⇒	Oberirdisches Einzugsgebiet, GIS
Hydraulische Parameter	⇒	DHME, Präfektur, CPRM, Hydroisotop
Grundwasserneubildung	⇒	SCS-Modul, Bodenwasserhaushalts-Modul, Bocaina-Speichermodul
Entnahme Parameter	⇒	CPRM, DHME, Präfektur, Hydroisotop
Randzuflüsse	⇒	Abschätzungen, Ergebnis der Modellanpassung
Ex- und Infiltration von Gewässern	⇒	Abschätzungen, Ergebnis der Modellanpassung

OUTPUT

GW-Gleichenpläne	⇒	Einbezug in GIS-Daten
GW-Strömungslinien	⇒	Einbezug in GIS-Daten
GW-Bilanzen	⇒	Validierung der großskaligen Modelle
Simulationen	⇒	Szenarienüberprüfung, Regionalplanung

ERGEBNIS

Mit dem Grundwasserströmungsmodell ist eine Abschätzung des Grundwasserhaushaltes von Picos und Umgebung möglich. Es werden die lokalen Möglichkeiten zur Grundwasserentnahmen dargestellt. Die Wasserbilanz zeigt die Grenzen des Aquifersystems auf und damit die **Grundwassernutzungsmöglichkeiten**.

WARIG- Modul Monitoring

FUNKTION

Es ist bekannt, daß eines der Hauptprobleme im WAVES-Programm Verfügbarkeit von Daten ist. So liegen auch aus dem WARIG-Untersuchungsgebiet nur wenige konsistente Meßwerte zum Niederschlag, zum Oberflächenabfluß und zu den Wasserständen im Bocaina-Stausee vor. Zur Kalibrierung der Modell-Module innerhalb von WARIG sind aber gerade solche Daten unbedingt notwendig. Die bisher vorliegenden Datenauswertungen und Messungen der DHME-Teresina stellen eine wesentliche Basis für die zur Zeit laufende Modellerstellung dar. Im Frühjahr 1999 werden darüberhinaus Messungen an den Flüssen, am Grundwasser und am Bocaina-Stausee durchgeführt, die dann als Kalibrierdatensatz eingesetzt werden. An 11 Stellen werden Abflußmessungen an Flüssen durchgeführt. Im Bocainastausee ist eine Drucksonde installiert. Zwei Regenschauer wurden im Untersuchungsgebiet installiert. Eine Drucksonde wurde in Flußnähe in einen Flachbrunnen eingebaut.

METHODEN

Abflußmessungen	⇒	DHME
Wasserstandmessungen in Flüssen	⇒	DHME
Wasserspiegelmessungen im GW	⇒	Präfektur, DHME, Hydroisotop
Wasserstandsmessungen im Bocaina-Stausee	⇒	Hydroisotop, DNOCS
Niederschlagsmessungen	⇒	Hydroisotop, LÖK, PIK

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse des Monitorings geben uns neben den Meßdaten auch ein Gefühl für den Wasserhaushalt im Untersuchungsgebiet. Die Möglichkeit der Modellkalibrierung mit kontinuierlichen und relativ genauen Meßdaten sind der entscheidende Unterschied zu den großskaligen Modellen, die nicht über solche Daten verfügen. Damit kommt diesem WARIG-Modul eine besondere Bedeutung zu.

Die Ergebnisse des Monitorings fließen auch als zusätzliche Information in die Zukunftsplanung des Bocaina-Stausees ein sowie in die Planung der optimierten Oberflächenwassernutzung.