

Großskalige hydrologische Modellierung von Landnutzungsänderungen vor dem Hintergrund unsicherer Eingangsdaten

Werner Lahmer¹, Bernd Pfützner², Alfred Becker¹

Zusammenfassung: Die Erfassung der gegenwärtigen hydrologischen Verhältnisse eines Einzugsgebietes als Bezugsbasis für zu erwartende Änderungen aufgrund einer veränderten Landnutzung werden durch Unsicherheiten der zur Verfügung stehenden räumlichen und zeitlichen Eingangsdaten u.U. erheblich erschwert. Am Beispiel der im mesoskaligen Einzugsgebiet der Stepenitz durchgeführten Untersuchungen werden einige der Probleme näher erläutert, die sowohl durch solche Datenunsicherheiten als auch durch unangemessene Vereinfachungen bei der räumlichen Disaggregation des Untersuchungsgebietes hervorgerufen werden.

Abstract: Quantitative and qualitative deficits of generally available spatial and temporal data represent a major problem in assessing the actual hydrological situation of a river basin, which in turn represents the basis for the evaluation of changes due to various scenarios of land-use change. Some of the existing problems resulting both from such data deficits and from methods of spatial disaggregation are discussed for the case of the meso-scale Stepenitz river basin.

1 Einführung und Zielstellung

Die vorliegende Studie soll am Beispiel der im Einzugsgebiet der Stepenitz laufenden Arbeiten Probleme erläutern, die aus Unsicherheiten der zur Verfügung stehenden räumlichen und zeitlichen Eingangsdaten resultieren und eine möglichst realitätsnahe Erfassung des gegenwärtigen Zustandes des Gebietes erschweren. Die im Rahmen des Projektes "Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeeinzugsgebietes" (WaStor; Bork, 1997) durchgeführten Untersuchungen sind eingebettet in die Gesamtzielstellung des Teiles „Landnutzung im Einzugsgebiet“ des BMBF-Forschungsschwerpunktes „Elbe-Ökologie“, in dem Konzepte zur dauerhaft umweltgerechten Landnutzung in unterschiedlichen Natur- und Wirtschaftsräumen im Elbegebiet entwickelt und praktisch umgesetzt werden sollen.

¹Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK), Telegrafenberg, Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam. email: lahmer@pik-potsdam.de

²Büro für Angewandte Hydrologie (BAH), Wollankstr. 117, 13187 Berlin. email: Bernd.Pfuetzner@t-online.de

Für die Untersuchungen wurde das Einzugsgebiet der Stepenitz (Teileinzugsgebiet der Elbe im Land Brandenburg, ca. 575 km²) als Modellgebiet des pleistozänen Tieflandes ausgewählt, das durch Probleme gekennzeichnet ist, die maßgebend aus der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung sowie der dort durchgeführten Meliorationsmaßnahmen resultieren. Über die Durchführung von Szenarioanalysen mit vorgegebenen Landnutzungsalternativen sollen Vorschläge für Maßnahmen zur Rückhalterhöhung und zur Verbesserung der wasserwirtschaftlichen und landschaftsökologischen Situation abgeleitet werden.

2 Modellierungskonzept

Voraussetzung für das Studium des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt ist ein Modellierungskonzept, das der räumlichen Differenzierung des Untersuchungsgebietes gerecht wird und mit dessen Hilfe die Auswirkungen natürlicher und anthropogener Einflüsse abgebildet werden können. Besonders geeignet sind Modelle, die die räumlichen Variabilitäten detailliert erfassen und flächendetailliert Veränderungen prognostizieren können und deren Parameter physikalisch interpretierbar sind (direkte Kopplung an digitale Daten). Für die vorliegenden Untersuchungen wurde das Modellierungssystem ARC/EGMO verwendet, das durch eine variable Unterteilung des Gebietes in Elementarflächen, Hydrotope und Hydrotopklassen eine Modellierung auf der Basis von Raumeinheiten unterschiedlicher Größe und Heterogenität erlaubt (Pfützner et al., 1997; Lahmer et al., 1997). Grundlage der Modellierung mit ARC/EGMO ist die sog. "Elementarflächen (EFL)-Karte", die sich durch Verschneidung der räumlichen Basiskarten (Landnutzung, Boden, Topographie, Grundwasserflurabstand, Fließgewässersystem, Teileinzugsgebiete) ergibt und im Fall des Stepenitzgebietes zu insgesamt 30.176 homogenen Einzelflächen in 64 Teileinzugsgebieten führt.

3 Sensitivitätsuntersuchungen

Um die Auswirkungen anthropogen verursachter Einflüsse auf den Wasserhaushalt abschätzen zu können, ist zunächst eine umfassende Analyse des „Ist-Zustands“ durchzuführen, d.h. eine möglichst realitätsnahe Erfassung der gegenwärtigen hydrologischen Verhältnisse des Einzugsgebietes als Bezugsbasis für die zu erwartenden Änderungen aufgrund einer veränderten Landnutzung. Darüber hinaus sind die durch Datenunsicherheiten und Ungenauigkeiten der eingesetzten Methoden hervorgerufenen Fehler zu analysieren, die das durch Landnutzungsänderungen her-

vorgerufene „Signal“ möglicherweise überdecken können. Im folgenden sollen einige Faktoren dieses „Modellrauschens“ näher beschrieben werden.

3.1 Auswirkungen der räumlichen Diskretisierung

Die Art des Präprocessing der für die Modellierung benötigten räumlichen Basis-karten hat bei der flächendifferenzierten Modellierung erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisqualität. Räumliche Aggregations- oder Regionalisierungsverfahren können zu erheblichen Fehlern und damit zu einer nicht realitätsgerechten Beschreibung hydrologischer Gebietseigenschaften führen, sofern sie unangemessene Vereinfachungen darstellen. Welches Ausmaß solche Fehler annehmen können, soll im folgenden am Beispiel der Hydrotopklassifizierung für das Stepenitzgebiet demonstriert werden.

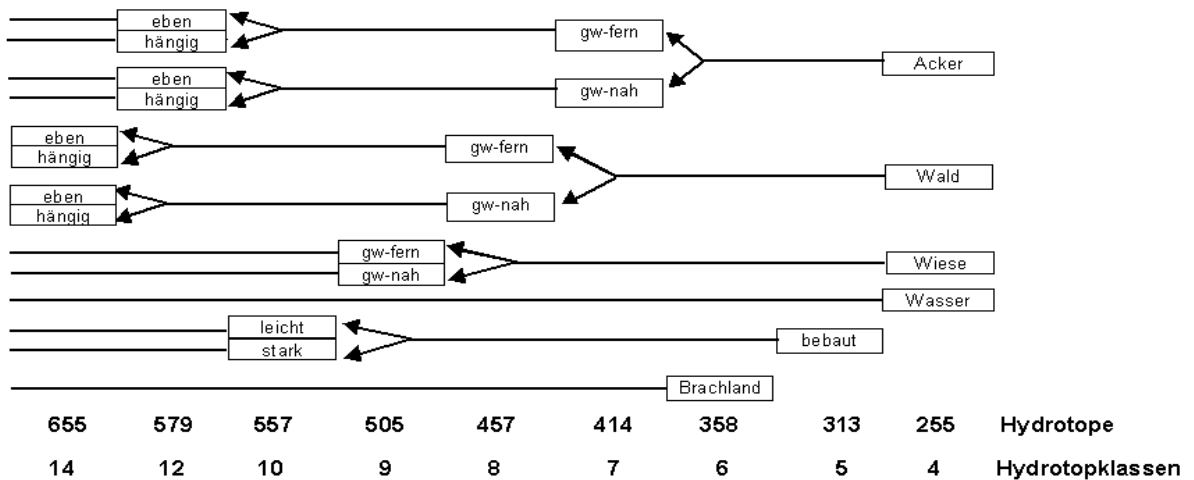


Abb. 1: Schema zur räumlichen Aggregation von Elementarflächen im Stepenitzgebiet in 4 bis 14 Hydrotopklassen.

Für großräumige Untersuchungen sind häufig räumliche Aggregationen zweckmäßig, um die Anzahl der Flächeneinheiten (und damit die Rechenzeiten) zu reduzieren. Die Aggregation zu Hydrotopklassen orientiert sich vornehmlich an hydrologischen Gesichtspunkten und grenzt solche Flächen voneinander ab, die sich bezüglich ihres Verdunstungs- und Abflußbildungspotentials charakteristisch unterscheiden. Im Fall der Stepenitz wurde für die Wasserhaushaltsrechnungen eine Unterteilung in insgesamt 10 Hydrotopklassen vorgenommen (siehe **Abb. 1**).

Ob der Grad der vorgenommenen räumlichen Aggregation eine realitätsnahe Beschreibung des Einzugsgebietes ermöglicht, läßt sich anhand der am Gebietsauslaß gemessenen Durchflüsse beurteilen, die zur Anpassung und Validierung des Modells herangezogen werden. Die Güte der Abflußsimulation wurde anhand verschiedener, in der hydrologischen Modellierung verbreitet angewendeter

Gütekriterien abgeschätzt, die auch Aussagen darüber erlauben, welche Hydrotopklassifizierung für das untersuchte Einzugsgebiet notwendig und ausreichend ist. **Abb. 2** zeigt den Verlauf von zwei Gütekriterien, die sich als besonders aussagekräftig herausgestellt haben, und zwar für vier Teilperioden des Untersuchungszeitraums

1981-1994 in Abhängigkeit vom gewählten räumlichen Aggregationsgrad bei der Zusammenfassung von Elementarflächen in 4 bis 14 Hydrotopklassen entsprechend Abb. 1. Sowohl der mittlere quadratische relative Fehler (GK1) als auch der mittlere Volumenfehler (DV) zeigen eine drastische Verschlechterung der Modellanpassung beim Übergang von 7

auf 6 Hydrotopklassen, d.h. für den Fall, daß bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht mehr zwischen grundwassernahen und grundwasserfernen Teilflächen unterschieden wird. Ein weiterer merklicher Qualitätsverlust ergibt sich beim Übergang von 5 auf 4 Klassen, d.h. bei der nicht mehr gesonderten Modellierung versiegelter (bebauter) Flächen im Einzugsgebiet. Oberhalb von etwa 7 Hydrotopklassen ändert sich die Anpassungsgüte nur noch geringfügig. Dies bedeutet u.a., daß eine Unterscheidung von ebenen und hängigen Teilflächen im Stepenitzgebiet (wegen der gering ausgeprägten Topographie) zu keiner merkbaren Verbesserung des Simulationsergebnisses mehr führt. Insgesamt bestätigen diese Analysen die den Simulationsrechnungen zugrundegelegte räumliche Aggregation in 10 Hydrotopklassen, die den Eigenschaften des untersuchten Einzugsgebietes gerecht wird, ohne die räumliche Untergliederung unnötig zu detailliert zu gestalten.

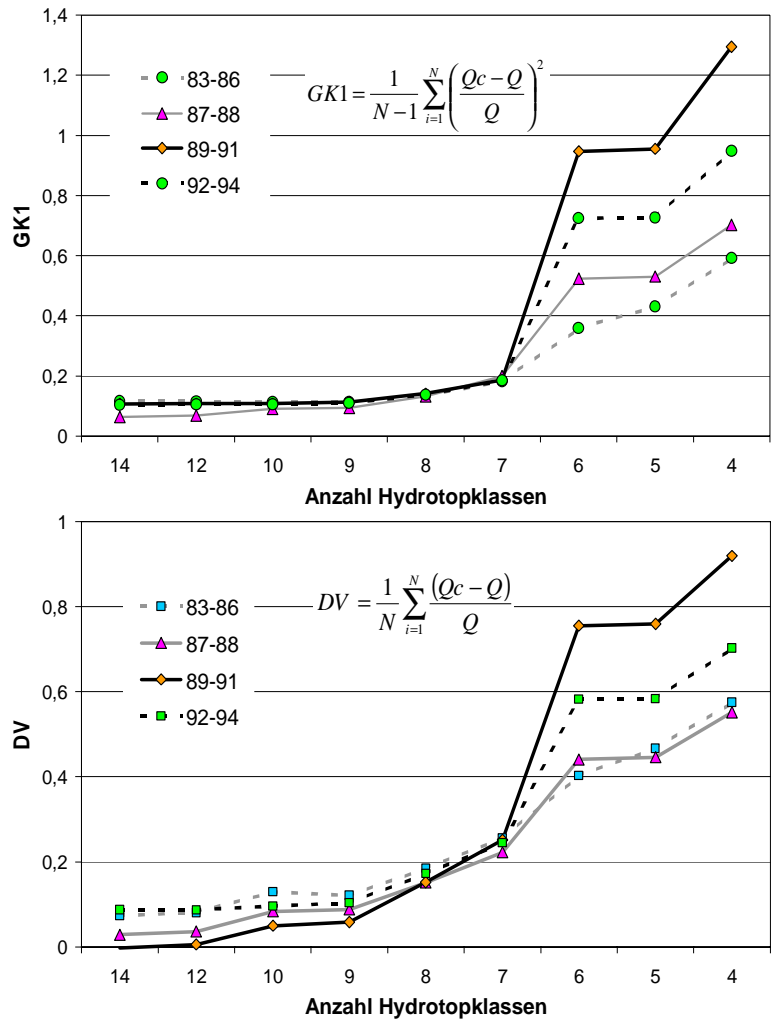


Abb. 2: Gütekriterien für simulierte Abflußzeitreihen (Stepenitz, Pegel Wolfshagen) im Zeitbereich 1981-1994 bei Aggregation des Einzugsgebietes in 4 bis 14 Hydrotopklassen. Dargestellt sind jeweils die für die Teilperioden 1983-86, 1987-88, 1989-91 und 1992-94 ermittelten Werte.

3.2 Einfluß der meteorologischen Informationsdichte

Die räumliche Verteilung der meteorologischen Eingangsgrößen hat besonders bei größerskaligen Untersuchungen erheblichen Einfluß auf die Simulationsergebnisse (Lahmer, 1997). Die Dichte der Stationen und die zeitliche Auflösung der Daten ist entscheidend dafür, ob die Systembelastung in ausreichender Genauigkeit erfaßt wird und die berechneten Wasserhaushaltsgrößen in ihrer räumlichen Verteilung angemessen wiedergegeben werden. Für die Rechnungen im Stepenitzgebiet wurden deshalb alle vorhandenen meteorologischen Informationen (Zeitreihen von 9 Klimahaupt- sowie 24 Niederschlagsstationen innerhalb und außerhalb des Gebietes) genutzt, um eine hohe räumliche Differenzierung bei der Flächenübertragung sicherzustellen. Für die Interpolation wurde standardmäßig ein „erweitertes Quadrantenverfahren“ verwendet, bei dem für jede betrachtete Teilfläche aus den vier Quadranten die jeweils nächstliegende Station ausgewählt wird, und die an den vier Stationen gemessenen meteorologischen Größen entfernungsgewichtet auf die jeweilige Teilfläche übertragen werden.

Das Problem der meteorologischen Informationsdichte soll am Beispiel eines extremen Niederschlagsereignisses dargestellt werden, das am 12. Juni 1993 im Stepenitzgebiet auftrat und mit 255 mm etwa 38 % des für das Gesamtgebiet im Zeitraum 1981-1994 gemessenen mittleren Jahresniederschlags von 680 mm erbrachte. Die in **Abb. 3** dargestellte räumliche Verteilung dieses Ereignisses beruht auf der Flächenübertragung der an den oben erwähnten 33 Stationen gemessenen Punktdaten auf 557 Hydrotöpfe in 64 Teileinzugsgebieten.

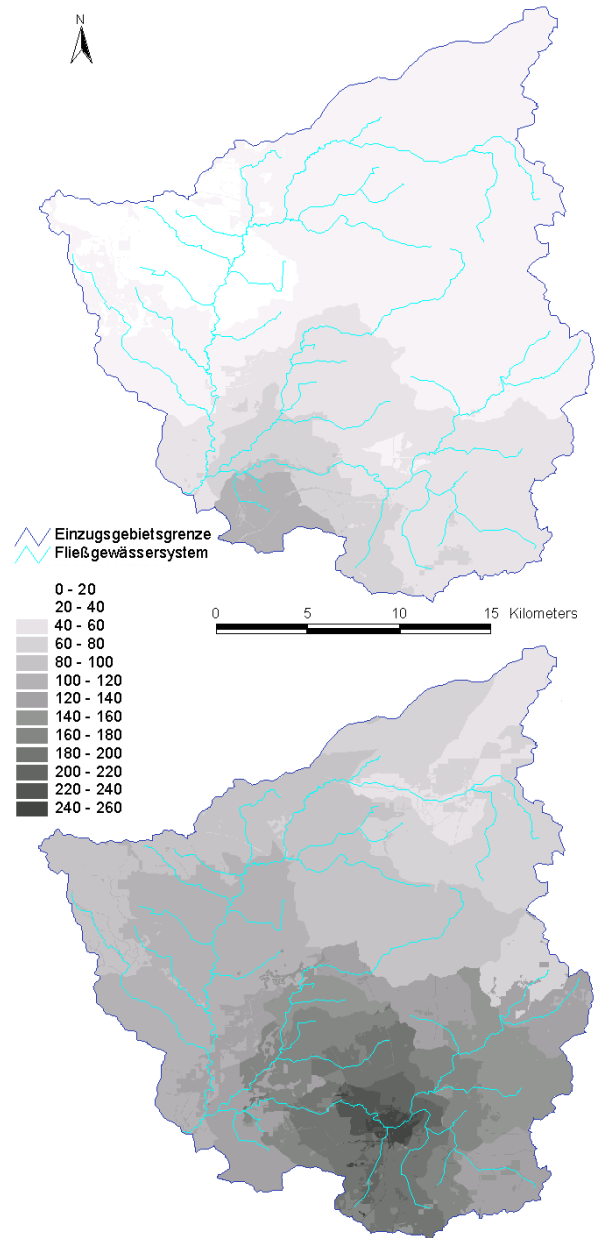


Abb. 3: Räumliche Verteilung des Niederschlages im Einzugsgebiet der Stepenitz für das extreme Niederschlagsereignis am 12. Juni 1993 sowie für den Vortag.

Die geringe - und im vorliegenden Fall auf den Süden des Einzugsgebietes beschränkte - Ausdehnung des Ereignisses ist typisch für *konvektive* Niederschläge, die als sommerliche Starkniederschläge für das Hochwassergeschehen kleiner, schnell reagierender Einzugsgebiete verantwortlich sind. Eine modellmäßige Erfassung solcher Ereignisse (und damit eine Simulation von Hochwasserabflüssen) stößt bei unzureichender Stationsdichte auf erhebliche Probleme, insbesondere unter Beachtung der Tatsache, daß weitere Charakteristika des Niederschlags wie Intensitätsverlauf,

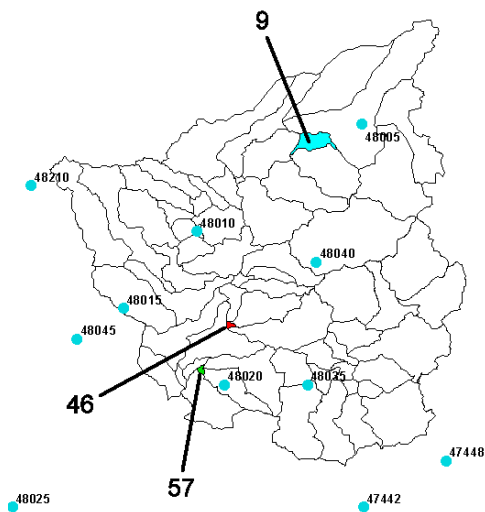
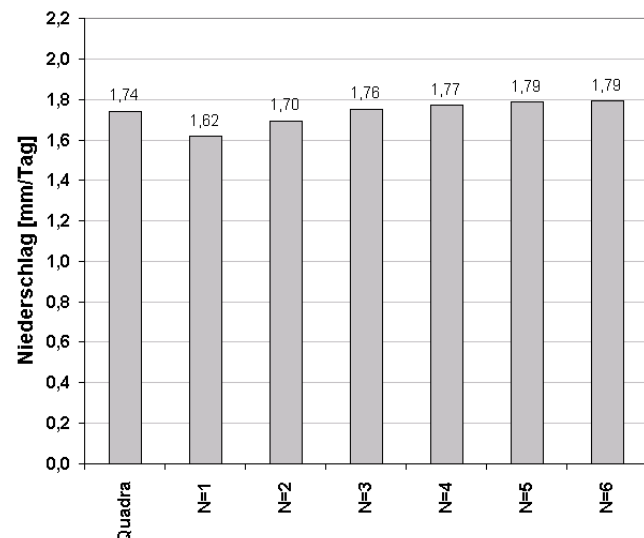
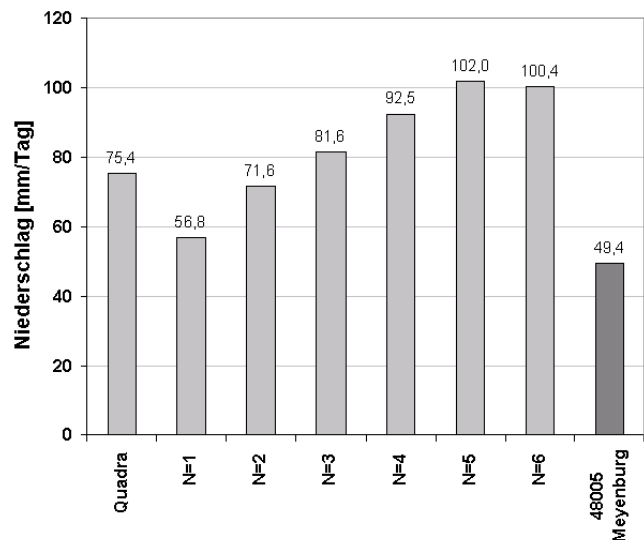


Abb. 4: Nach verschiedenen Verfahren für das Teileinzugsgebiet 9 interpolierte Tagesniederschläge für das Extremereignis am 12.06.1993 (oben) sowie den Gesamtzeitraum 1981-1994 (unten).



räumliche Ausdehnung, Wanderungsrichtung und -geschwindigkeit, die den Hochwasserabfluß entscheidend mitprägen, i.a. datenmäßig überhaupt nicht erfaßt werden.

Dies wird deutlich in **Abb. 4**, in der die für das im Norden liegende Teileinzugsgebiet 9 nach verschiedenen Verfahren interpolierten Tagesniederschläge für das Extremereignis am 12.06.1993 und für den Gesamtzeitraum 1981-1994 dargestellt sind. Neben dem Quadrantenverfahren wurden Interpolationen unter Berücksichtigung der N=1-6 nächsten Stationen durchgeführt. Mit zunehmender Anzahl von Stationen werden bei diesem Verfahren im Fall des Extremereignisses zu hohe Niederschlagswerte aus dem regenreichen Süden in den Norden des Gebietes

(der eine geringere Stationsdichte aufweist) übertragen. Auch das Quadrantenverfahren liefert hier keine genauen Werte, da ebenfalls nicht-relevante Stationen verwendet werden. Die Berücksichtigung nur der nächsten Station ($N=1$) kommt deshalb dem an der nächsten Station Meyenburg gemessenen Wert am nächsten.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren werden mit abnehmender Entfernung zur Niederschlagszelle (also z.B. für die Teilgebiete 46 und 57) oder bei Betrachtung längerer Zeiträume (Abb. 4 unten) erwartungsgemäß erheblich geringer. Das Quadrantenverfahren liefert dann gewöhnlich das beste Ergebnis, da bei Fehlen einer Station in einem der Quadranten keine alternativen Stationen in größerer Entfernung zur Interpolation herangezogen werden. Stehen allerdings keine Stationen außerhalb der Gebietsgrenzen zur Verfügung, so kann das $N=x$ -Verfahren besser als das Quadrantenverfahren sein, da für Randgebiete auf jeden Fall mehrere Stationen herangezogen werden. Die Größe räumlich begrenzter Starkregenereignisse dürfte aber mit allen Verfahren aus zwei Gründen überschätzt werden: Zum einen führen die verwendeten Tageswerte des Niederschlages, zum anderen die Interpolation selbst zu einer räumlichen „Verschmierung“ des Ereignisses. Für eine realitätsnahe Modellierung solcher Ereignisse sind deshalb sowohl zeitlich als auch räumlich höher aufgelöste Daten erforderlich.

3.3 Einfluß von Parameterunsicherheiten auf die Modellierungsergebnisse

Unsicherheiten der zur Verfügung stehenden räumlichen Eingangsdaten können die hydrologische Beschreibung des Untersuchungsgebietes zusätzlich erschweren. Um die Größenordnung dieses zum „Modellrauschen“ beitragenden Fehlers abzuschätzen, wurden die Eingangsparameter der Landnutzungskarte (Versiegelungsgrad, Wurzeltiefe, Interzeptionsspeicherkapazität und Bedeckungsgrad) bei der Berechnung der Jahreswerte verschiedener Wasserhaushaltsgrößen variiert, und zwar zwischen dem in der entsprechenden Relate-Tabelle abgelegten jeweiligen Minimal- und Maximalwert jeder Nutzungsart. Für die über den Zeitraum 1983-1993 gemittelten Jahressummen ergaben sich gegenüber dem Mittelwert dieser Parameter Änderungen von +0.2% bis -0.2% (Verdunstung), +1.5% bis -3.2% (Sickerwasserbildung), -2.1% bis +3.6% (Oberflächenabflußbildung) und -0.4% bis +0.7% (Gebietsabfluß). Diese Änderungen sind vergleichsweise gering und liegen erheblich unter den Fehlern, die sich z.B. aus einer unzureichenden Erfassung der meteorologischen Eingangsgrößen ergeben. Im Hinblick auf die Beschreibung von Landnutzungsänderungen von Bedeutung ist allerdings, daß das Signal dieser Änderungen selbst für Szenarien, die nur einen geringen Flächenanteil der Gebietsfläche betreffen, oberhalb dieses Rauschpegels liegt (Lahmer und Becker, 1998).

4 Schlußfolgerungen

Voraussetzung für Untersuchungen des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt ist eine möglichst realitätsnahe Erfassung der hydrologischen Verhältnisse eines Einzugsgebietes. Diese schließt sowohl eine angemessene Disaggregation des Gebietes als auch die Untersuchung unterschiedlichster potentieller Fehlerquellen ein. Besondere Bedeutung kommt dabei der Informationsdichte der meteorologischen Eingangsgrößen zu, die für eine flächendeckende Ableitung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen oft zu gering ist. Während sich Monats- und Jahreswerte dieser Größen noch mit hinreichender Genauigkeit angeben lassen, ist z.B. eine Berücksichtigung lokal begrenzter Starkregenereignisse nur näherungsweise möglich. Verschiedene Interpolationsverfahren können dabei zu ebenso großen Fehlern führen wie unangemessen vereinfachende räumliche Aggregations- oder Regionalisierungsverfahren, die bei großskaligen hydrologischen Modellierungen andererseits oft erst Voraussetzung für eine effektive Beschreibung hydrologischer Gebietseigenschaften sind. Ziel der großskaligen Modellierung muß es deshalb sein, einen Kompromiß zwischen hinreichend begründbaren Modellvereinfachungen, ausreichend hoher räumlicher und zeitlicher Informationsdichte und nicht zuletzt einer geeigneten Berücksichtigung von Datenunsicherheiten zu finden. Nur dann sind langjährige Szenarienrechnungen unter der Annahme eines geänderten Klimas und/oder einer geänderten Landnutzung möglich und sinnvoll.

Literatur

- Bork, H.-R. (1997): Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeeinzugsgebietes" (WaStor). Antrag an das BMBF.
- Lahmer, W. (1997): Flächendeckende Modellierung des Wasserhaushalts im deutschen Teil des Elbegebietes unter Anwendung großflächiger Aggregierungsprinzipien. Bericht an das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, unveröffentlicht.
- Lahmer, W., Müller-Wohlfeil, D.-I., Pfützner, B., Becker, A. (1997): GIS-based Hydrological Modelling with the Integrated Modelling System ARC/EGMO. International Conference on Regionalization in Hydrology, Braunschweig, FRG, March 10-14, 1997. Accepted for IAHS publication.
- Lahmer, W. und Becker, A (1998): Statusbericht 10/98 zum Forschungsvorhaben „Dynamische skalenübergreifende Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Gebieten des pleistozänen Tieflandes, Modellgebiet Stepenitz“. PIK, Oktober 1998.
- Pfützner, B., Lahmer, W. und Becker, A. (1997): ARC/EGMO - Programmsystem zur GIS-gestützten hydrologischen Modellierung. Überarbeitete Kurzdokumentation zur Version 2.0, unveröffentlicht.