

Erfassung von Parametern des Landschaftswasserhaushaltes

Felix Herzog und Jürgen Kunze

1 Einleitung

Landschaften mit ihrer jeweiligen natürlichen Leistungsfähigkeit werden wesentlich durch das Wasser und sein Verhalten über, auf und unter der Erdoberfläche geprägt (Wohlrab et al. 1992). Im Projekt „Nachhaltige Wasserbewirtschaftung und Landnutzung im Elbeeinzugsgebiet“ wird am Beispiel des Torgauer Raumes ein landnutzungsbezogener Ansatz verfolgt, indem die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Landschaftswasserhaushalt einerseits sowie auf ökonomische Größen andererseits untersucht werden (siehe Horsch und Ring in diesem Bericht). Dazu werden verschiedene Szenarien von Landnutzungsänderungen formuliert (Herzog et al. 1998; Klauer et al. in diesem Bericht), die einer multikriteriellen Bewertung unterzogen werden sollen (Geyler und Drechsler in diesem Bericht). Aufgabe des Teilthemas „Quantifizierung des Einflusses von Landnutzung und Landnutzungsänderungen auf das Grundwasser“ ist es, die wichtigsten Parameter des Landschaftswasserhaushaltes in Abhängigkeit von der Landnutzung zu quantifizieren und in die Bewertung einfließen zu lassen.

Eine zentrale Komponente des Landschaftswasserhaushaltes stellt die Grundwasserneubildung dar. Es handelt sich dabei um denjenigen Anteil des Niederschlages, der aus dem Wurzelraum in Richtung Grundwasser absickert. Er trägt, zusammen mit der Uferfiltration, zur Erneuerung des Grundwasserkörpers bei und ist daher für die Trinkwassergewinnung von eminenter Bedeutung. Gleichzeitig stellt die Versickerung den wichtigsten Eintragspfad für Schadstoffe aus diffusen Quellen ins Grundwasser dar.

Ziel dieses Aufsatzes ist es, die Methode, welche zur Bestimmung der Grundwasserneubildung gewählt wurde, vorzustellen und zu begründen. Anschließend an einige allgemeine Betrachtungen über Wasserhaushaltsmodelle wird das hier verwendete Abfluß-Bildungs-Modell vorgestellt. Es wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und der Einfluß verschiedener Modellversionen und Datenquellen auf das Ergebnis untersucht. Dieses wird insbesondere mit der Grundwasserangebotsprognose für den Regierungsbezirk Leipzig (Brinschwitz 1996) verglichen. Das Ergebnis bildet die Grundlage für die Abschätzung des Einflusses von Landnutzungsänderungen, wie sie in Szenarien formuliert werden. Des Weiteren sind Angaben zur Grundwasserneubildung eine der Voraussetzungen für Aussagen zur Sickerwasserqualität.

2 Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes

2.1 Wasserhaushaltsmodelle

Die ersten Wasserhaushaltsmodelle stammen aus den späten 40er Jahren und wurden seither, entsprechend der mannigfaltigen Anforderungen an Wasserhaushaltsuntersuchungen, in vielfältiger Weise weiterentwickelt (Dyck 1983; Xu et al. 1996). Dabei wurden sowohl determi-

stische als auch stochastische Vorgehensweisen gewählt, um von den landschaftlichen und klimatischen Gegebenheiten auf den Wasserhaushalt zu schließen (Abb. 1). Physikalische Modelle basieren auf den fundamentalen Gesetzen der Physik (v. a. Hydro- und Thermodynamik), der Chemie, Biologie, usw. In vereinfachter Form fließen diese Gesetze auch in konzeptionelle Modelle ein, diese verwenden jedoch gleichermaßen empirische Zusammenhänge. „Black-Box“ Modelle beruhen einzig auf den empirisch gemessenen Ursache-Wirkungs-Beziehungen von System-In- und -Outputs, ohne die zugrundeliegenden Gesetze nachvollziehen zu wollen. Im Gegensatz zu diesen deterministischen Modellen werden in stochastischen Ansätzen nicht Kausalitäten sondern Wahrscheinlichkeiten abgebildet. In Wahrscheinlichkeitsmodellen wird die Verteilung der Wahrscheinlichkeit hydrologischer Ereignisse (z. B. Extremereignisse) erfaßt. Zeitreihenmodelle dienen zur Extrapolation von gemessenen Zeitreihen einzelner Parameter in die Zukunft, unter Beibehaltung ihrer statistischen Eigenschaften.

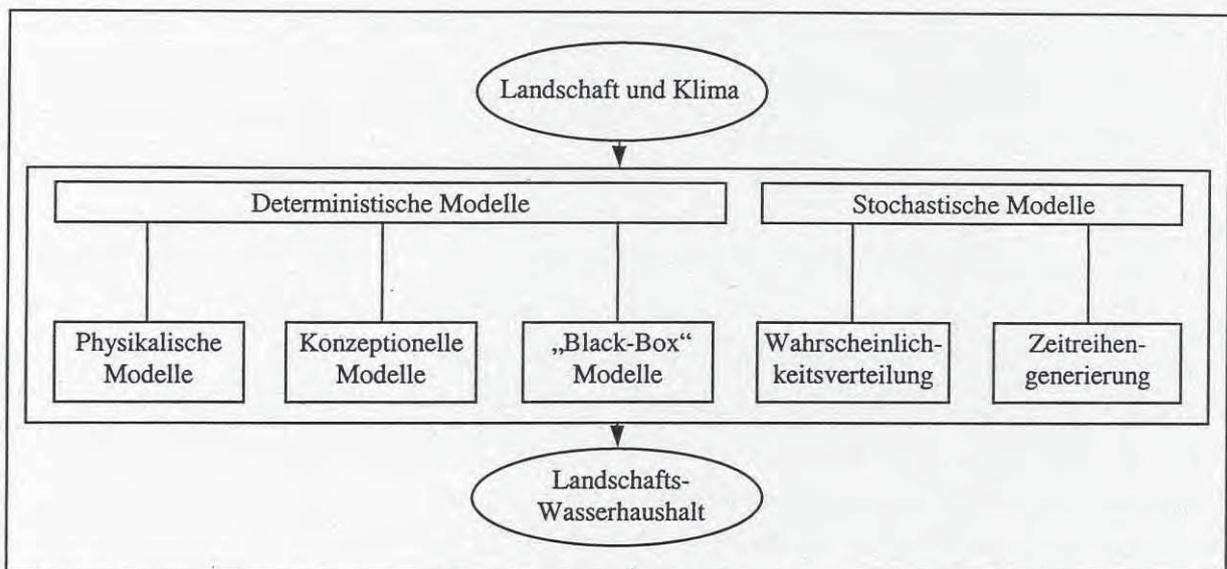


Abb. 1: Klassifikation hydrologischer Modelle nach Kausalitäten (nach Nemeč 1993; Singh 1995).

Die Übergänge zwischen den verschiedenen Modelltypen sind fließend. Hydrologische Prozesse weisen immer sowohl deterministische als auch stochastische Eigenschaften auf. Zumindest die Vorhersage von Ereignissen kommt ohne Annahmen über Wahrscheinlichkeiten nicht aus. Außerdem beinhalten alle deterministischen Modelle stochastische Komponenten, die in den unvermeidbaren Vereinfachungen der komplexen Realität und den auftretenden Fehlern bei der Erfassung der Eingangsdaten begründet sind (Nemeč 1993).

Je nach Modelltyp und Zweck der Modellierung wird in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung gearbeitet. Dabei müssen meist Kompromisse zwischen angestrebter Genauigkeit und Datenverfügbarkeit eingegangen werden. Sollen nicht-lineare Prozesse untersucht werden (z. B. Niederschlag – Abfluß), muß in Stunden- oder Tagesschritten gearbeitet werden, während für saisonale oder jahresbezogene Eigenschaften Monats- oder Jahres-

schritte ausreichend sind. Der mögliche Grad an räumlicher Auflösung reicht von stark aggregierenden Ansätzen, in denen das untersuchte Einzugsgebiet in einige wenige Untereinheiten aufgeteilt wird, die ähnliche geophysikalische Eigenschaften aufweisen („Lumped Models“) bis hin zu Modellen, welche die Variabilität räumlicher Strukturen möglichst differenziert berücksichtigen („Distributed Models“). Die Möglichkeit, mit stärkerer räumlicher Auflösung zu arbeiten, hat sich durch erhöhte Rechnerkapazitäten, die Entwicklung von geographischen Informationssystemen (GIS) und, v. a. in jüngster Zeit, durch die zunehmende Verfügbarkeit von in GIS gehaltenen Daten verbessert.

2.2 Abfluß-Bildungs-Modell ABIMO

2.2.1 Geschichte und Ansatz

Das Abfluß-Bildungs-Modell ABIMO der Bundesanstalt für Gewässerkunde ist ein konzeptionelles Modell, mit dem langjährige Mittelwerte von Gesamtabfluß und Grundwasserneubildung größerer Räume des Lockergesteinsbereiches berechnet werden können. Es basiert auf dem „Rechnergestützten Arbeitsplatz ‘GW-Dargebot‘“ der ehemaligen Wasserwirtschaftsdirektion Berlin (Glugla et al. 1988; König 1988; Glugla und König 1989). Dieses sogenannte „Modell RASTER“ war in der DDR das Standardverfahren zur Prognose der Grundwasserneubildung in schwach reliefierten Gebieten des Lockergesteinsbereiches und findet nach wie vor Anwendung (z. B. Grundwasserdargebotsprognose für den Regierungsbezirk Leipzig, Krönert und Erfurth 1998). Ab 1994 wurde das Modell inhaltlich und rechentechnisch überarbeitet, es liegt jetzt als WINDOWS-Version ABIMO 2.1 vor (Glugla und Fürtig 1997).

Der Gesamtabfluß wird aus der Differenz der langjährigen Mittelwerte von Niederschlag und Evapotranspiration errechnet. Letztere wird mittels der BAGROV-Beziehung geschätzt, welche klimatische Gegebenheiten (Niederschlag, potentielle Verdunstung) und weitere Standorteinflüsse (Landnutzung, Boden) in physikalisch und empirisch begründeter Weise verknüpft (Abb. 2). Dabei beruht die empirische Komponente (Effektivitätsparameter n) in erster Linie auf einer umfangreichen Auswertung von Lysimetermessungen. Durch die Schätzung des lateralen Abflusses, wie er z. B. auf versiegelten Flächen auftritt, kann aus dem Gesamtabfluß auf die Grundwasserneubildung geschlossen werden.

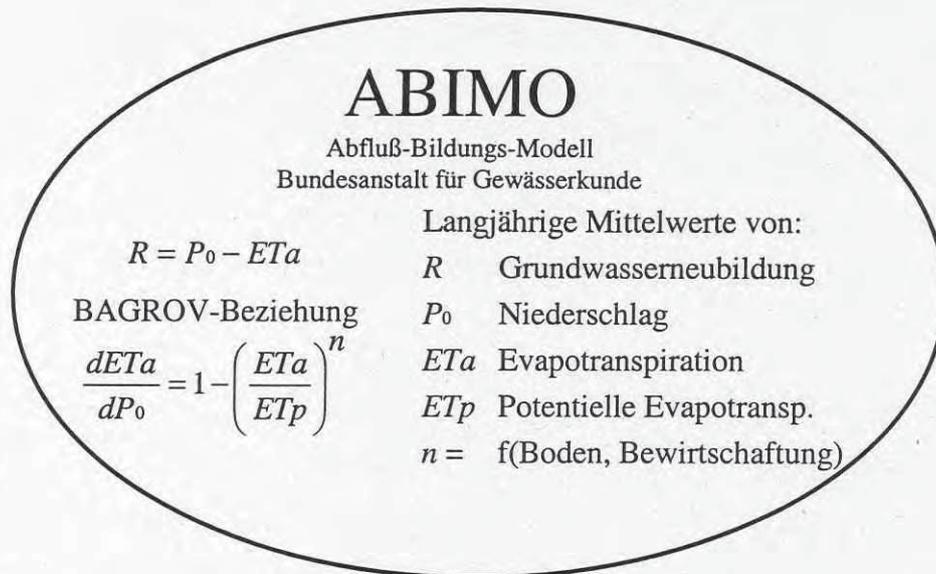


Abb. 2: Algorithmus des Abfluß-Bildungs-Modells ABIMO (Glugla und Fürtig 1997).

2.2.2 Sensitivitätsanalyse

In ABIMO wird der Abfluß aus sieben Grundparametern errechnet (Tab. 1). Ein Teil der obligatorisch notwendigen Daten kann durch zusätzliche Angaben stärker differenziert werden. Für diese optionalen Daten wird ansonsten programmintern ein Wert eingesetzt, der den mittleren Gegebenheiten in Mittel- und Ostdeutschland nahe kommt. Mittels einer Sensitivitätsanalyse wurde das Modellverhalten untersucht und der Einfluß der einzelnen Datenebenen auf das Gesamtergebnis analysiert (Kunze 1998). Dabei wurde von mittleren Werten ausgegangen, wie sie für den Raum Torgau typisch sind (Tab. 1). Jeweils ein Wert wurde variiert, während die anderen konstant gehalten wurden.

Tab. 1: Eingabedaten für ABIMO zur Berechnung der Grundwasserneubildung (in Klammer die Basisdaten, welche für die Sensitivitätsanalyse verwendet wurden).

Obligatorische Daten	Optionale Daten
Jahresniederschlag (600 mm/a)	Sommerniederschlag (320 mm/a)
Potentielle Jahresverdunstung (600 mm/a)	Potentielle Verdunstung im Sommer (470 mm/a)
Nutzbare Feldkapazität (17 Vol.%)	Bodenart (Lehm)
Landnutzung: - Landwirtschaft (L)	Ertragsklasse (ERT=35), Beregnungsmenge (50 mm/a)
- Wald	Baumart, Begründungsjahr (1942)
- Gewässer	
- Gärtnerische Nutzung	
- Vegetationslose Flächen	
Versiegelungsgrad (0%)	
Grundwasserflurabstand (1-2 m)	
Kanalisationsgrad (0%)	

Stellvertretend für die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden in Abbildung 3 der Einfluß von nutzbarer Feldkapazität (nFK) und Flächennutzung auf den Gesamtabfluß dargestellt. Für die nFK wurde eine Spannweite von 13-21 Vol.% berücksichtigt (Abb. 3a). Eine Änderung der nFK um 1 Vol.% führt zu Änderungen des Abflusses von 6 bis 16 mm/a, wobei sich ein Unterschied der nFK um 1 Vol.% bei höheren nFK-Werten stärker auswirkt als bei geringeren. Die Flächennutzung übt ebenfalls einen starken Einfluß auf den berechneten Abfluß aus (Abb. 3b). Wie erwartet ist letzterer auf vegetationslosen Flächen am höchsten, am geringsten hingegen unter Wald. Auf Gewässerflächen übersteigt die Evapotranspiration den Niederschlag.

Der mittlere jährliche Niederschlag und die mittlere potentielle jährliche Verdunstung sind die Grundgrößen der Wasserhaushaltsberechnung und beeinflussen das Ergebnis entscheidend. Die zusätzliche Angabe der Sommerwerte wirkt sich nur in Regionen, in denen die Jahrgänge des Niederschlages und der potentiellen Verdunstung von denen Nordostdeutschlands deutlich abweichen, auf das Ergebnis aus (Glugla und Fürtig 1997). Unter bebauten Flächen haben der Versiegelungs- und der Kanalisationsgrad eine große Auswirkung auf die Grundwasserneubildung. In den ersten beiden Jahrzehnten nach der Begründung von Waldbeständen nimmt der Abfluß unter diesen Flächen deutlich ab, deshalb sollten bei überwiegend jungen Beständen Baumart und -alter einbezogen werden. Die landwirtschaftliche Ertragsklasse bestimmt die Grundwasserneubildung aufgrund der höheren Evapotranspiration von intensiv geführten Beständen mit. Sie wird aus Angaben zu den Kulturarten, den landwirtschaftlichen Erträgen und der Bodenart abgeleitet.

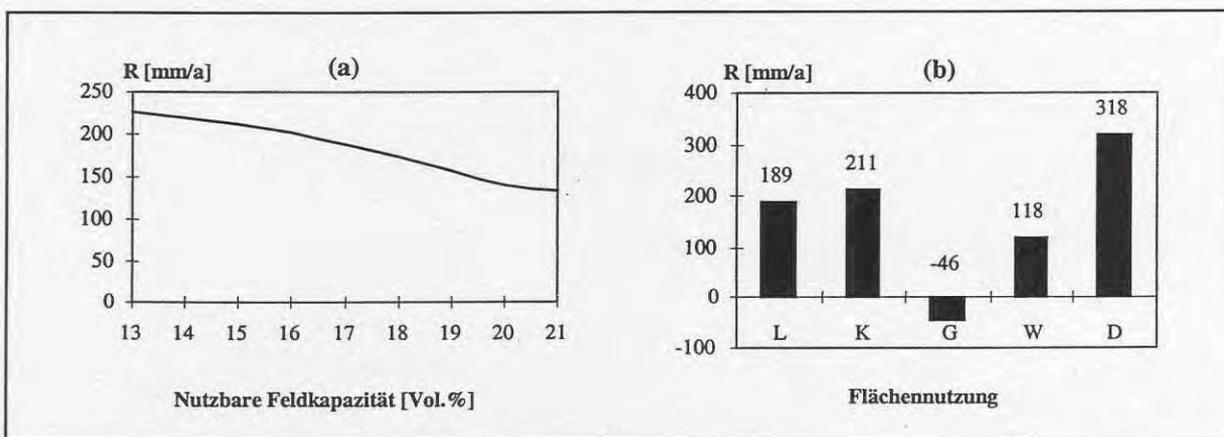


Abb. 3: Gesamtabfluß (R) in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität (a) und von der Flächennutzung (b), alle anderen Werte konstant (L: Landwirtschaftliche Nutzfläche, K: Gärtnerische Nutzung, G: Gewässer, W: Wald, D: Vegetationslose Flächen).

3 ABIMO im Torgauer Raum

Für den Raum Torgau liegt mit der Grundwasserangebotsprognose für den Regierungsbezirk Leipzig eine aktuelle Abflußberechnung vor. Sie wurde mit dem „Modell RASTER“ berechnet, welches in Sachsen als Standardverfahren für den Lockergesteinsbereich bestimmt wurde

(SLUG 1995). Ausgangsdaten und Ergebnisse wurden vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie und vom Staatlichen Umweltfachamt Leipzig zugänglich gemacht. Da seither eine neue Modellversion und für Teilbereiche aktuellere Daten zur Verfügung stehen (Tab. 2), haben wir die Berechnung erneut durchgeführt und den Einfluß von Modellversion, unterschiedlichen Datenquellen und der Berechnung auf der Basis von kleinsten gemeinsamen Geometrien anstelle der bisher verwendeten Rastereinheiten untersucht.

3.1 Räumlicher Bezug

Wasser- und stoffhaushaltliche Untersuchungen beziehen sich in der Regel auf Flußeinzugsgebiete. Deshalb wurde die administrative Einheit „Altkreis Torgau“ in die Bilanzgebiete (BG) „Elbe“ und „Schwarzer Graben“ aufgeteilt, die oberirdischen Einzugsgebieten entsprechen (siehe auch Geyler in diesem Bericht).

3.2 Datenaufbereitung

Aufgabe der Grundwasserdargebotsprognose war es, für den Regierungsbezirk Leipzig eine Neueinschätzung der Grundwasserneubildung vorzunehmen. Dazu waren die Daten der ehemaligen Wasserwirtschaftsdirektion Saale/Werra zu nutzen, aufzubereiten und auf ihre Plausibilität zu prüfen (Brinschwitz, persönliche Mitteilung). Die Parameter Niederschlag, Hauptnutzungsform, Bodenart, Grundwasserflurabstand und Versiegelungsgrad wurden überprüft und unverändert übernommen. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die in der Grundwasserdargebotsprognose verwendeten Daten und über die Datenquellen, die zur Aktualisierung genutzt wurden.

Tab. 2: Datenquellen für die Abflußberechnung.

	Grundwasserdargebotsprognose	Aktualisierte Daten
Obligatorische Daten		
Niederschlag	500 m Raster, 1931-1960	1 km Raster, 1961-1990
Potentielle Verdunstung	500 m Raster, 1931-1960	1 km Raster, 1961-1990
Landnutzung	500 m Raster	Biotoptypenkartierung, 1992
Versiegelung	500 m Raster	Biotoptypenkartierung
Grundwasserflurabstand	250 m Raster	–
Bodenkundliche Daten zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität	500 m Raster Bodenschätzung, Forstliche Standorterkundung (FSK)	Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standorterkundung (MMK), Forstliche Standorterkundung (FSK)
Optionale Daten		
Sommerniederschlag	–	1 km Raster, 1961-1990
Sommerversdunstung	–	1 km Raster, 1961-1990
Begründungsjahr der Forstbestände	–	Biotoptypenkartierung, Walddatenbank
Baumart	–	Biotoptypenkartierung
Ertragsklasse	–	–

Klimadaten

Die in der Grundwasserdargebotsprognose verwendeten mittleren Jahresniederschläge (1901-1950 bzw. 1931-1960) wurden aus Isohyeten interpoliert (Weiland, persönliche Mitteilung). Als potentielle Evapotranspiration wurde die um den Faktor 1,1 erhöhte Verdunstung nach Turc zugrundegelegt (Glugla et al. 1977; Glugla et al. 1988; Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik 1996). Die Gewässerverdunstung wurde mit 750 mm/a eingesetzt. Für die Neuberechnung steht mit der Meßreihe 1961-1990 des Deutschen Wetterdienstes ein aktuellerer Datensatz zur Verfügung. Die Niederschlagshöhe wurde aus den Angaben der Niederschlagsmeßstationen unter Berücksichtigung der Topographie errechnet (Wendland und Kunkel 1997). Als potentielle Evapotranspiration wurde die Gras-Referenzverdunstung mit der FAO-Penman-Monteith-Beziehung berechnet (Wendling 1995) und ohne Korrekturfaktor eingesetzt (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik 1996). Die Gewässerverdunstung wurde mit 700 mm/a angenommen.

Landnutzung und Versiegelung

Die in der Grundwasserdargebotsprognose verwendeten Hauptnutzungsformen Landwirtschaft, Wald, Gärtnerische Nutzung, Gewässer und Vegetationslose Flächen ebenso wie der Versiegelungsgrad wurden aus topographischen Karten abgegriffen. Alternativ dazu steht heute die Biotoptypenkartierung des Freistaates Sachsen zur Verfügung, die vom Landesamt für Umwelt und Geologie digital bereitgestellt wurde. Die Biotoptypen wurden den für ABIMO relevanten Kategorien zugeordnet. Für den brandenburgischen Teil des BG Elbe lag keine Biotoptypenkartierung vor, so daß die Landnutzung aus MMK und topographischen Karten erfaßt wurde. Mittlere Versiegelungsgrade der Siedlungsflächen wurden aus Literaturangaben (Münchow et al. 1996; Glugla et al. 1988) abgeleitet; der Grad der Regenwasserkanalisation wurde analog zur Grundwasserdargebotsprognose mit 90% angenommen.

Grundwasserflurabstand

Das Grundwasserflurabstandsmodell der Grundwasserdargebotsprognose gibt den Grundwasserflurabstand in Klassen an (< 1 m, 1 - 2 m, > 2 m). Die Angaben stammen aus Grundwasserflurabstandskarten, die auf Pegelmessungen beruhen und für den überwiegenden Teil des bearbeiteten Gebietes vorlagen (Weiland, persönliche Mitteilung). Neuere Angaben stehen nicht zur Verfügung.

Nutzbare Feldkapazität

Die Einschätzung der nFK für die Grundwasserdargebotsprognose basiert auf der Grundkarte der Bodenschätzung und der Bodengeologischen Karte sowie - für die Waldstandorte - auf der Forstlichen Standorterkundung (FSK). Dabei wurde eine inhaltliche Generalisierung in der Form durchgeführt, daß die in der Bodenschätzung und der Bodengeologischen Karte angegebenen Bodenarten auf die von RASTER bzw. ABIMO unterstützten Bodenarten reduziert

wurden (Weiland, persönliche Mitteilung). Alternativ dazu wurde eine Kombination aus Mittelmaßstäbiger Landwirtschaftlicher Standorterkundung (MMK) und FSK genutzt. Die Arbeitskarten der MMK 1 : 25.000 und der FSK 1 : 10.000 wurden vom Landesamt für Umwelt und Geologie Freiberg in digitaler Form bereitgestellt. Wo die FSK aufgrund unterschiedlicher Zuständigkeitsbereiche nicht flächendeckend vorlag, wurden analoge Karten der FSK durch Digitalisierung integriert. Bei denjenigen FSK-Sachdaten, bei denen mehrere Bezeichnungen auf heterogene Standorte hinwiesen, erfolgte eine Generalisierung, indem nur die zuerst genannte Bezeichnung verwendet wurde. Bei der Verschneidung von MMK und FSK wurde in den Überlagerungsbereichen die MMK bevorzugt. Für die verbleibenden Gebiete ohne Bodendaten (Siedlungen, militärische Standorte, insgesamt ca. 15% des Untersuchungsraumes) wurde eine Interpolation anhand angrenzender Gebiete und durch Nutzung der Übersichtskarte der MMK 1 : 100.000 sowie der Bodenübersichtskarte von Sachsen 1 : 400.000 durchgeführt. Aus den Legenden von MMK und FSK wurde die nFK abgeleitet. Geschichtete Bodenarten, bei denen Unterschiede in der Berechnung der nFK bezogen auf 1 m und 2 m (angenommene Durchwurzelungstiefe bei Landwirtschaftsflächen bzw. unter Wald) auftraten, spielten eine untergeordnete Rolle, so daß die nFK einheitlich für eine Tiefe von 1 m berechnet wurde. Den in der MMK ausgewiesenen Bodenartengruppen liegt laut Landesamt für Umwelt und Geologie Freiberg keine Flächengewichtung zugrunde, deshalb wurde die nFK durch arithmetische Mittelwertbildung und unter Annahme einer mittleren Lagerungsdichte errechnet. Da sich die FSK auf Bodenarten bezieht, konnte die nFK aus Tabellen (AG Bodenkunde 1994) zugewiesen bzw. berechnet werden. Bei Bodenarten mit Kiesanteil erfolgte eine entsprechende Reduzierung der nFK.

Optionale Daten

In der Grundwasserdargebotsprognose wurden für die optionalen Daten die im Programm voreingestellten, für die Bedingungen Mittel- und Ostdeutschlands repräsentativen Werte übernommen. Seit kurzem sind beim Deutschen Wetterdienst auch langjährige Mittelwerte von Niederschlag und Referenzverdunstung für das Sommerhalbjahr erhältlich, so daß diese Angaben zur zusätzlichen Verfeinerung genutzt werden können. Um im Hinblick auf die Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen die räumliche und inhaltliche Auflösung der Modellierung zu vergrößern, wurden außerdem Baumart- und -alter miteinbezogen. Angaben über die Baumart (Nadel-, Laub- oder Mischwald) wurden der Biotoptypenkartierung entnommen. Das mittlere Alter der Bestände (bzw. das Begründungsjahr) wurde aus der Biotoptypenkartierung und der Walddatenbank der Sächsischen Landesanstalt für Forsten Graupa abgeleitet. Anhand der Oberhöhe der Bestände (Walddatenbank) wurden drei Kategorien gebildet (< 10 m, 10 - 20 m, > 20 m), die sich mit den Angaben der Biotoptypenkartierung parallelisieren lassen. Anschließend wurden Klassen mit ungefähr 5% Anteil an der Waldfläche gebildet und für diese ein mittleres Begründungsjahr ermittelt. Dieses wurde über ein statistisches Verfahren in die Fläche gebracht (Zufallsverteilung innerhalb der durch die Biotoptypenkartierung vorgegebenen Kategorien).

3.3 Datenverarbeitung und Modellierung

Alle Daten wurden im GIS (Arc/Info 7.03) aufgearbeitet. Die Rasterdaten (Klimadaten, Grundwasserflurabstand, Bodenschätzung) wurden in Vektordaten konvertiert und Polygone mit derselben Zuweisung wurden zusammengefaßt.

ABIMO ist, ebenso wie die Vorgängerversion, für die Verarbeitung von Rasterdaten eingerichtet, welche über ein WINDOWS-Dialogfenster eingegeben werden. Die Daten werden im dBase-Format gehalten. Um die digital vorliegenden Daten direkt nutzen und die manuelle Eingabe umgehen zu können, wurden die Datenschichten im GIS so verschnitten, daß die entstehende Info-Datei in das dBase-Format exportiert werden konnte. Die Datei wurde in ABIMO eingelesen und der Algorithmus mithin nicht auf Rasterelemente sondern auf die, durch die Verschneidung entstandenen, kleinsten gemeinsamen Geometrien (k.g.G.) angewendet. Die Ergebnis-Datei wurde ins GIS rückimportiert und als Polygonlayer ausgewertet. Dabei wurden für die Auswertungsgebiete flächengewichtete arithmetische Mittelwerte berechnet. Es wurden unterschiedliche Varianten gerechnet, in denen die Modellversion und einzelne Datensätze variiert wurden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Folgende Varianten wurden verglichen:

- (a) Grundwasserdargebotsprognose für den Regierungsbezirk Leipzig. Diese Prognose wurde mit der Vorläuferversion von ABIMO erstellt („RASTER“). Daten und Ergebnisse wurden vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie und vom Staatlichen Umweltafamt Leipzig zur Verfügung gestellt.
- (b) Einfluß der Modellumstellung von RASTER auf ABIMO. Die in (a) verwendeten Daten wurden mit ABIMO verarbeitet.
- (c) Aktualisierung von Flächennutzungs- und Klimadaten. Wie (b), aber mit den in Tabelle 2 genannten aktualisierten Daten mit Ausnahme der nFK.
- (d) Einfluß der Bodendaten. Wie (c), mit Ausnahme der nFK, die aus MMK und FSK abgeleitet wurde.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Eingangsparameter und als Ergebnis der Gesamtabfluß der Berechnungsvarianten (a) bis (d) dargestellt. Die nicht aufgetragenen Parameter sind in allen Varianten gleich (z. B. Grundwasserflurabstand, Ertragsklasse) oder beeinflussen – wie die Sensitivitätsanalyse gezeigt hat – das Ergebnis nur unwesentlich, wenn Mittelwerte über gesamte Einzugsgebiete gebildet werden (z. B. Sommerniederschlag und -verdunstung, Baumart, Begründungsjahr der Forstflächen).

Tab. 3: Eingangparameter und Ergebnisse der Modellierung der Grundwasserneubildung in zwei Bilanzgebieten des Torgauer Raumes.

Bilanzgebiete	Varianten				
	(a)	(b)	(c)	(d)	
Eingangparameter					
Modell	RASTER	ABIMO	ABIMO	ABIMO	
Räumliche Auflösung	500 m Raster	500 m Raster	k.g.G.	k.g.G.	
Klimameßreihen	1931-1960	1931-1960	1961-1990	1961-1990	
Landnutzung	GWD	GWD	BTK 1993	BTK 1993	
Bodendaten	BS	BS	BS	MMK, FSK	
Ergebnisse					
Gesamtabfluß [mm/a]	• Elbe	103	109	132	162
	• Schwarzer Graben	132	133	144	159

Legende

- k.g.G.: kleinste gemeinsame Geometrien
 GWD: Grundwasserdargebotsprognose
 BTK: Biotoptypenkartierung
 BS: Bodenschätzung
 MMK: Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standorterkundung
 FSK: Forstliche Standorterkundung

4.1 RASTER vs. ABIMO

Der Vergleich der Varianten (a) und (b) erlaubt Rückschlüsse auf den Einfluß der Umstellung von RASTER auf ABIMO. Der zentrale Unterschied zwischen den beiden Modellversionen liegt darin, daß bei RASTER die Wasserhaltefähigkeit des Bodens über den Anteil an abschlämmbaren Teilchen (Korndurchmesser < 0,02 mm) erfaßt wird, während ABIMO mit der nFK rechnet. Dies führte bei RASTER zu einer leichten Überbewertung der Wasserhaltung insbesondere von tonhaltigen Böden (Glugla, persönliche Mitteilung). Die Ergebnisse zeigen denn auch für das BG Elbe, das zu 6,1% aus lehmigen Böden besteht, einen leichten Anstieg des Gesamtabflusses. Beim BG Schwarzer Graben hingegen, das im wesentlichen in der Dahleener-Dübener Heide mit entsprechend leichteren Böden liegt (Anteil Lehm Böden: 0,5%), unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen den Berechnungen mit RASTER und ABIMO kaum.

4.2 Aktualisierte Datenbasis

Von Variante (b) zu Variante (c) findet ein deutlicher Anstieg des modellierten Gesamtabflusses statt. Der Unterschied zwischen (b) und (c) besteht in der Aktualisierung der Datenbasis (Klima, Landnutzung) und der Veränderung des Raumbezuges von Rastern zu kleinsten gemeinsamen Geometrien. Die wichtigsten Datenebenen und der Gesamtabfluß sind in Abbildung 4 im Vergleich wiedergegeben; in Tabelle 4 sind die Durchschnittswerte für das gesamte Untersuchungsgebiet sowie für die beiden Bilanzgebiete aufgeführt.

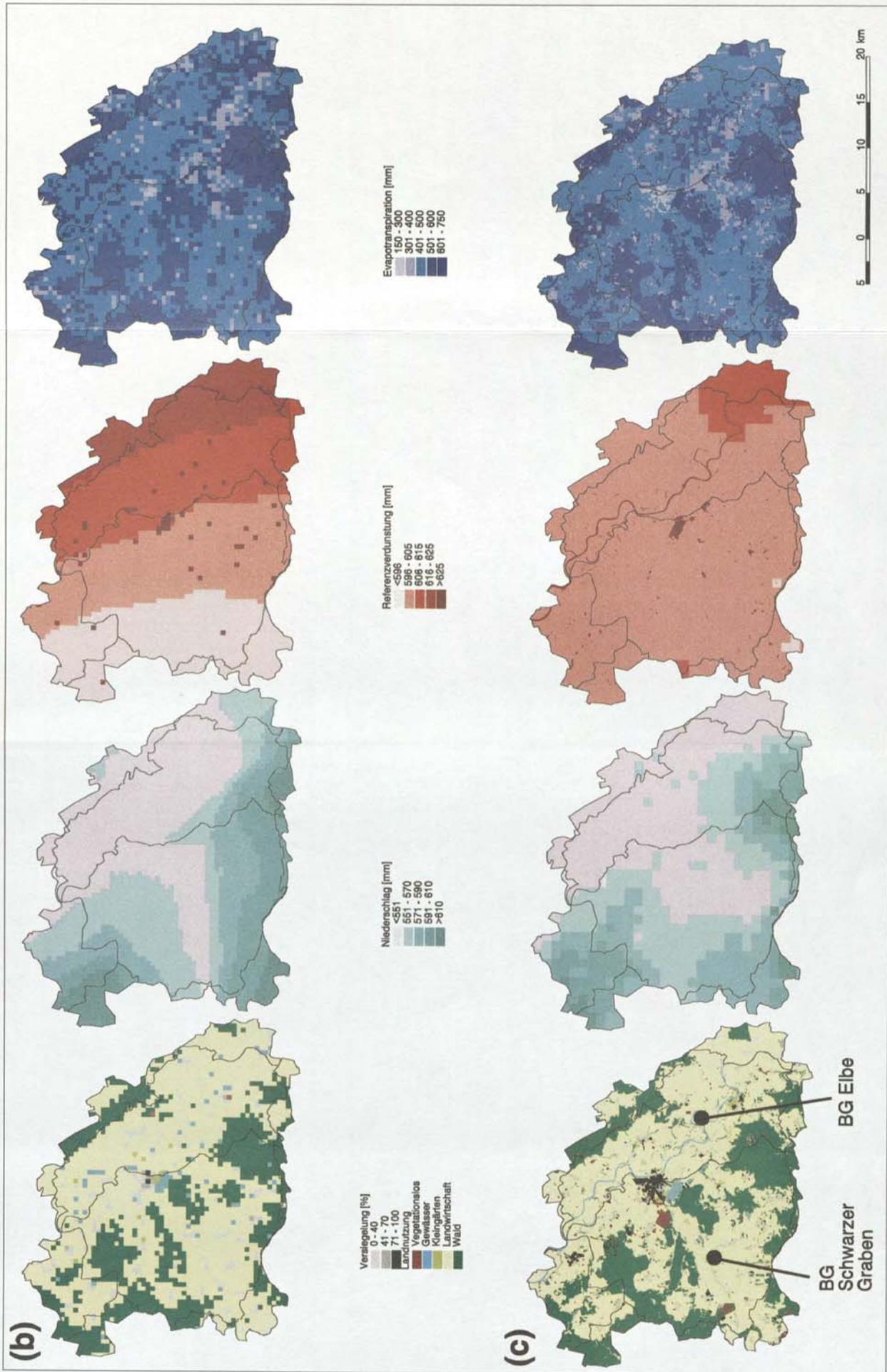


Abb. 4: Hauptformen der Landnutzung, 30-jährige Mittelwerte von Niederschlag und Referenzverdunstung sowie reale Evapotranspiration aus der Grundwasserangebotsprognose für den Regierungsbezirk Leipzig (Variante (b)) bzw. aktualisierte Datensätze und Ergebnisse (Variante (c)).

Tab. 4: Landnutzung, Klimadaten, reale Evapotranspiration und Modellierungsergebnisse für das gesamte Untersuchungsgebiet und differenziert nach Bilanzgebieten (BG) für die Berechnungsvarianten (b) und (c) nach Tabelle 3.

Varianten	Gesamtes Untersuchungsgebiet		BG Elbe		BG Schwarzer Graben	
	(b)	(c)	(b)	(c)	(b)	(c)
Landnutzung [%]						
– Vegetationslos	0,1	0,7	0,2	0,6	0,0	0,9
– Gewässer	2,0	1,6	2,9	2,3	1,9	1,3
– Gärten	0,4	1,6	0,5	1,7	0,3	1,7
– Landwirtschaft	68,9	66,8	83,4	81,2	63,3	61,6
– Wald	28,7	29,3	13,0	14,2	34,4	34,5
Versiegelungsgrad [%]	0,76	1,55	0,64	1,52	0,96	1,76
Klimadaten [mm/a]						
– Niederschlag	567	563	553	551	571	565
– Referenzverdunstung (ET_p)	606	605	616	607	601	603
Verdunstung und Abfluß [mm/a]						
– Reale Evapotranspiration	492	478	494	471	489	478
– Gesamtabfluß	126	136	109	132	133	140
– Grundwasserneubildung	123	130	106	126	129	132

Bodeneigenschaften und Grundwasserflurabstand können als Verursacher der berechneten Unterschiede ausgeschlossen werden, da in beiden Fällen dieselben Daten verwendet wurden. Auf den ersten Blick unterscheiden sich auch die über das gesamte Untersuchungsgebiet gemittelten Landnutzungs- und Klimadaten nur wenig. Betrachtet man jedoch die Karten (Abb. 4), so fallen Differenzen bei Niederschlag und potentieller Evapotranspiration (ET_p) auf, die auf unterschiedlichen Datengrundlagen beruhen. Obwohl sich die Mittelwerte der beiden Zeitreihen (Variante (b) 1931-1960; Variante (c) 1961-1990) kaum unterscheiden, sind Niederschläge und ET_p räumlich anders verteilt. Insbesondere bei der Referenzverdunstung zeigt die ältere Zeitreihe einen deutlichen Anstieg von West nach Ost, während die neuere Zeitreihe räumlich nur noch wenig differenziert ist.

Für das BG Elbe sind die Niederschlagswerte in (b) und (c) fast identisch, während ET_p in der Variante (c) geringer ist. Daraus resultieren eine verminderte reale Verdunstung und dementsprechend ein höherer Abfluß. Im BG Schwarzer Graben sind die Unterschiede weniger stark. Der Niederschlag vermindert sich bei fast konstanter Referenzverdunstung von (b) zu (c) leicht, dadurch liegt auch die reale Evapotranspiration etwas niedriger. Der Gesamtabfluß beträgt entsprechend etwas mehr. Der höhere berechnete Abfluß in (c) wird in beiden Bilanzgebieten auch durch eine leichte Zunahme von Landnutzungstypen bewirkt, unter denen der Abfluß generell hoch ist. So ist der Anteil an Vegetationslosen Flächen und Kleingärten in Variante (c) höher, während Landwirtschaftliche Flächen und Gewässer mit geringerer Abflußbildung etwas reduziert sind. Offenbar sind kleine Flächen, wie sie etwa Gärten und vegetationslose Flächen darstellen, in der rasterbasierten Landnutzungserhebung (b) etwas untervertreten.

Aus dem Gesamtabfluß wird durch die Subtraktion des auf versiegelten Flächen mit der Kanalisation abgeführten Wassers die Grundwasserneubildung errechnet. Während in Variante (b) die Grundwasserneubildung nur um 3 - 4 mm geringer ausfällt als der Gesamtabfluß, beträgt dieser Unterschied in Variante (c) 6 - 8 mm. Dort wurde der Versiegelungsgrad aus der Biotoptypenkartierung (Stand 1992) abgeleitet und liegt um rund zwei Drittel höher als in Variante (b).

Offenbar sind die unterschiedlichen Ergebnisse der Varianten (b) und (c) auf die Verbesserung und Aktualisierung der Datenbasis, insbesondere der Klima- und Landnutzungsdaten, zurückzuführen.

4.3 Bodenschätzung versus MMK

Die Varianten (c) und (d) unterscheiden sich lediglich durch die Datengrundlage zur Ableitung der nFK. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden zur Ableitung der nFK gegenübergestellt. Die aus der Bodenschätzung abgeleitete nFK (Variante (c)) liegt im Mittel um etwa drei Punkte höher als bei der Verwendung der MMK (Variante (d)); dabei ist der Unterschied im BG Elbe etwas stärker als im BG Schwarzer Graben (Tab. 5). Dies führt zu einem deutlich erhöhten Abfluß, insbesondere im BG Elbe, so daß sich die Verhältnisse sogar umkehren und der Abfluß im BG Elbe denjenigen im BG Schwarzer Graben übersteigt (Tab. 3).

Tab. 5: Nutzbare Feldkapazität (nFK) differenziert nach Bilanzgebieten für die Berechnungsvarianten (c) und (d) nach Tabelle 3.

Varianten	Gesamtes Untersuchungsgebiet		BG Elbe		BG Schwarzer Graben	
	(c)	(d)	(c)	(d)	(c)	(d)
nFK	16,4	13,4	17,5	14,3	15,9	13,0

Bei Verwendung der Bodenschätzung erhält man für lehmige und tonige Böden um ca. 10% bzw. 15% höhere nFK-Werte, für sandige Substrate leicht niedrigere als mit der MMK (Petry et al. in Vorbereitung). Aus dem Vergleich mit benachbarten, ähnlich strukturierten Untersuchungsgebieten (Steinhardt 1998a, 1998b; Bannholzer und Volk in Vorbereitung; Petry et al. in Vorbereitung) muß geschlossen werden, daß aus der MMK abgeleitete nFK-Werte zu tief liegen.

Die Erwartungen an die Genauigkeit der Abflußmodellierung und die Interpretation von Unterschieden dürfen jedoch nicht überstrapaziert werden. Das läßt sich am Beispiel der Niederschlagsdaten illustrieren. Für die Interpolation auf das vom Deutschen Wetterdienst verwendete 1 km Raster wird ein mittlerer Fehler von 7% angegeben (Wendland und Kunkel 1997). Bei 600 mm/a entspricht das 42 mm/a. Aufgrund der Sensitivitätsanalyse von ABIMO wirkt sich dies mit ca. 30 mm/a auf den berechneten Gesamtabfluß aus.

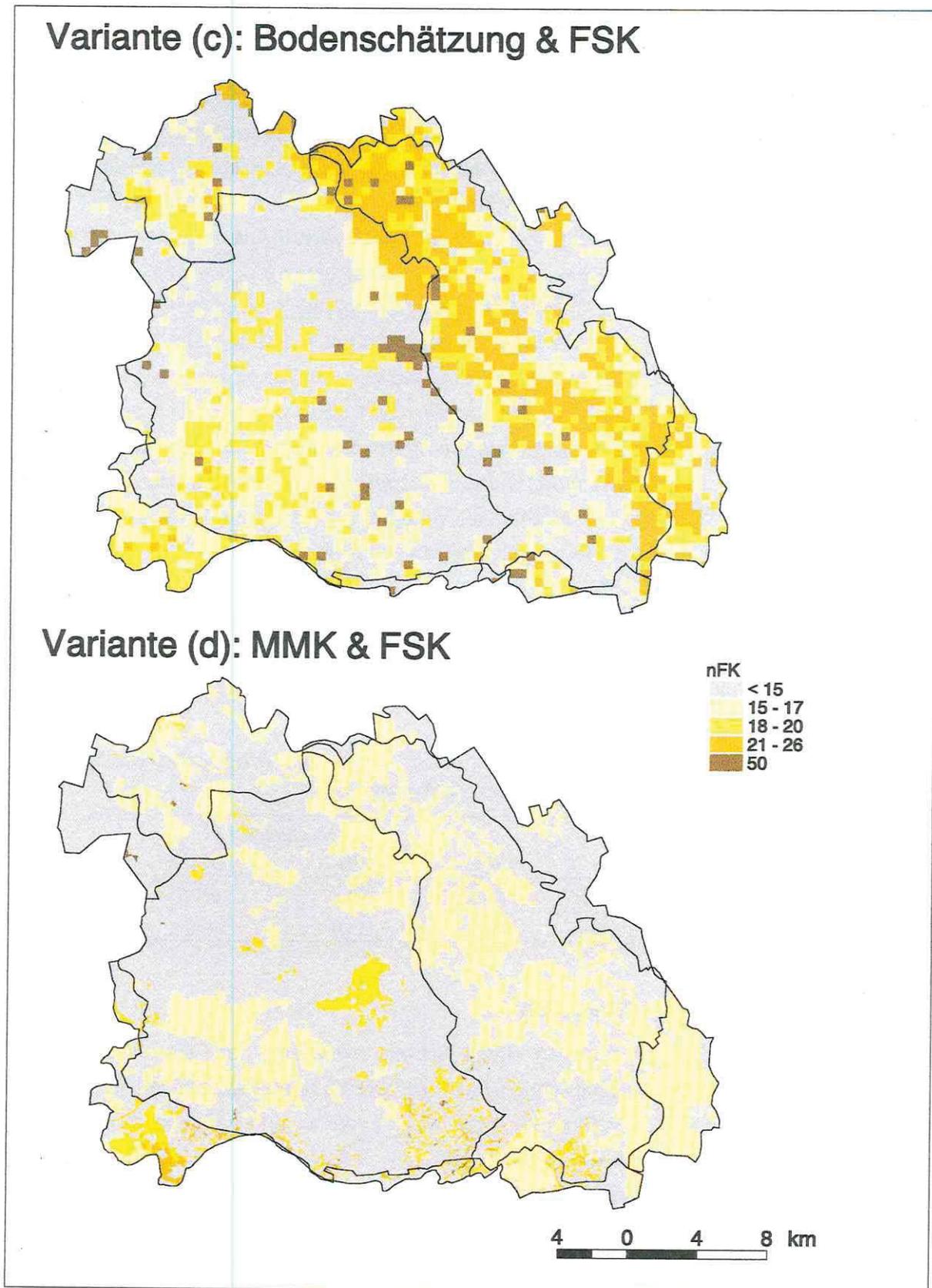


Abb. 5: Nutzbare Feldkapazität (nFK), abgeleitet aus Bodenschätzung und Forstlicher Standorterkundung (FSK) (Variante (c)) bzw. aus Mittelmaßstäbiger Landwirtschaftlicher Kartierung (MMK) und FSK (Variante (d)).

4.4 Validierung

Die Ergebnisse von ABIMO-Berechnungen können unter Heranziehung von langjährigen Mittelwerten von Pegelmessungen an Flüssen, welche die BG entwässern, validiert werden. Dabei müssen unter- und oberirdische Zu- und Abflüsse in die Betrachtungen einbezogen werden. Die Genauigkeit der Berechnung wird aus dem Verhältnis zwischen gemessenem und errechnetem mittleren Abfluß abgeschätzt. Wird dieses Verhältnis um weniger als 25% über- oder unterschritten, so wird die Berechnung i. d. R. als hinreichend genau angesehen. Die Validierung der Modellierungsergebnisse der Grundwasserdargebotsprognose für den Regierungsbezirk Leipzig ergab für 10 der 15 BG eine dieser Bedingung genügende Genauigkeit.

Das Gütekriterium wurde für das BG Elbe bei allen Varianten erfüllt, nicht jedoch für das BG Schwarzer Graben (Tab. 6). Leider sind die Gütekriterien für diese beiden Bilanzgebiete nur wenig aussagekräftig. Im BG Elbe ist der oberirdische Zufluß um einen Faktor 250 höher als der berechnete Abfluß, so daß letzterer um ein Vielfaches variieren kann, ohne daß das Gütekriterium wesentlich beeinflusst wird. Dieselbe Einschränkung trifft auf vier weitere BG des Regierungsbezirkes Leipzig zu, welche von vergleichsweise großen Flüssen dominiert werden (Mulde, Elster). Umgekehrt liegen für drei BG des Regierungsbezirkes, darunter auch für das BG Schwarzer Graben, lediglich Pegeldata aus einer Meßreihe von 1912-1944 vor, die keinen Rückschluß auf die gegenwärtigen Verhältnisse erlauben. Die starke Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Abfluß bedeutet in diesem Fall nicht, daß die Modellierung mangelhaft wäre.

Tab. 6: Berechnungsgenauigkeit der Abflußmodellierung in den Bilanzgebieten Elbe und Schwarzer Graben (Analog zur Grundwasserdargebotsprognose).

		Varianten			
		(a)	(b)	(c)	(d)
Genauigkeit [%]	• Elbe	99,5	99,5	99,6	99,6
	• Schwarzer Graben	130,8	132,0	147,6	163,3

5 Schlußfolgerungen und Ausblick

Das Verfahren nach BAGROV/GLUGLA eignet sich zur Abbildung des Landschaftswasserhaushaltes auf einer mittleren Maßstabsebene und wird dafür in Mitteldeutschland seit langem eingesetzt. Seit wenigen Jahren stehen eine neue Modellversion und aktualisierte Daten zu Klima und Landnutzung in digitaler Form zur Verfügung. Der Vergleich der Modellversionen zeigt, daß die Umstellung von RASTER auf ABIMO einen nur geringfügigen Einfluß auf das Ergebnis hat, der sich zudem auf die Gebiete mit schwereren Böden beschränkt. Dagegen bewirkt die Verwendung der aktualisierten Klima- und Landnutzungsdaten einen Anstieg des errechneten Abflusses, der den tatsächlichen Verhältnissen eher entsprechen dürfte als die bisher verfügbaren Werte. Der weiterführende Versuch, auch die Bodendaten zu aktualisieren und die nFK aus den ebenfalls digital vorliegenden Karten der MMK und FSK abzuleiten, hat dagegen keine Verbesserung des Modellierungsergebnisses gebracht. Die errechneten nFK-

Werte liegen, insbesondere im Auenbereich mit schweren Böden, tendenziell zu niedrig. In tiefergehenden methodischen Arbeiten in einem kleinen, gut dokumentierten Einzugsgebiet (Schaugraben) wird der Einfluß von unterschiedlichen Datenquellen weiter untersucht.

In Abbildung 6 ist das Modellierungsergebnis Grundwasserneubildung dargestellt (Berechnungsvariante (c)). Auf offenen Wasserflächen (gut zu erkennen sind die Elbe sowie der Große Teich bei Torgau) und in Gebieten, in denen die Vegetation infolge eines geringen Grundwasserflurabstandes Anschluß ans Grundwasser hat, übersteigt die Verdunstung die Niederschläge. Eine geringe Grundwasserneubildung (0 - 100 mm/a) findet in den Waldgebieten der Dübener-Dahlener Heide und unter den Böden mit hoher nFK (insbesondere im Elbtal) statt. Mittlere bis vergleichsweise hohe Sickerwassermengen (100 - 300 mm/a) bilden sich unter den leichteren, landwirtschaftlich genutzten Böden. Am stärksten ist die Grundwasserneubildung unter vegetationslosen Flächen (u. a. Teile von militärisch genutzten Gebieten). Die Siedlungen zeichnen sich im allgemeinen durch eine geringere Grundwasserneubildung aus, da das Regenwasser mit der Kanalisation abgeführt wird. Dieser Effekt wird bei der in Abbildung 6 gewählten Skala jedoch nur in einzelnen Fällen deutlich.

Dieses Ergebnis stellt die Basis für die Berechnung von Szenarien dar, in denen der Einfluß von Landnutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung untersucht werden kann (siehe Klauer et al. und Geyley in diesem Bericht).

Die direkte Verarbeitung von digital vorliegenden Daten in einem GIS verringert den Bearbeitungsaufwand beträchtlich. Indem die Biotoptypenkartierung genutzt wird und ihre räumliche Struktur durch die Berechnung auf der Basis von kleinsten gemeinsamen Geometrien beibehalten wird, kann eine höhere räumliche Auflösung erreicht werden als bei der Berechnung auf Rasterbasis. So kann grundsätzlich auch der Einfluß von vergleichsweise kleinräumigen Landnutzungsänderungen untersucht werden. Allerdings ist das Spektrum der Landnutzungen auf die Hauptkategorien Wald, Landwirtschaftsflächen, Kleingärten, Gewässer, vegetationslose Flächen und Siedlungen beschränkt. Auch muß darauf hingewiesen werden, daß die anderen Datenschichten einen kleineren Maßstab aufweisen, wodurch der räumlichen Auflösung Grenzen gesetzt sind.

Neben der rein quantitativen Seite der Grundwasserneubildung interessiert im Zusammenhang mit dem Trinkwasserschutz in erster Linie die Qualität des Sickerwassers und ihre Beeinflussung durch die landwirtschaftliche Praxis. Dazu sind mit ABIMO vorerst keine Aussagen möglich. Allerdings stellt die Grundwasserneubildung eine wichtige Steuergröße für die Auswaschung von Nährstoffen dar. In einem nächsten Schritt wird deshalb versucht, aufgrund der Versickerung den Stickstoffaustrag abzuschätzen. Dazu werden von ausgewählten Landwirtschaftsbetrieben schlagbezogene Bewirtschaftungsinformationen (Zeitreihen) erfragt. Daraus können für die wichtigsten Naturräume (Elbtalwanne, Heidegebiete) und Bodenarten Bewirtschaftungstypen abgeleitet werden. Mit dem Modell REPRO (Hülsbergen 1997) werden Stickstoff-Flächenbilanzen erstellt und daraus potentielle Nitratkonzentrationen im Sickerwasser abgeschätzt. Zusätzlich werden langjährige Meßreihen von Lysimetermessungen (Meissner et al. 1998a, 1998b) hinzugezogen. Die Ergebnisse fließen in die Bewertung von Szenarien ein (Klauer et al. und Geyley in diesem Bericht).

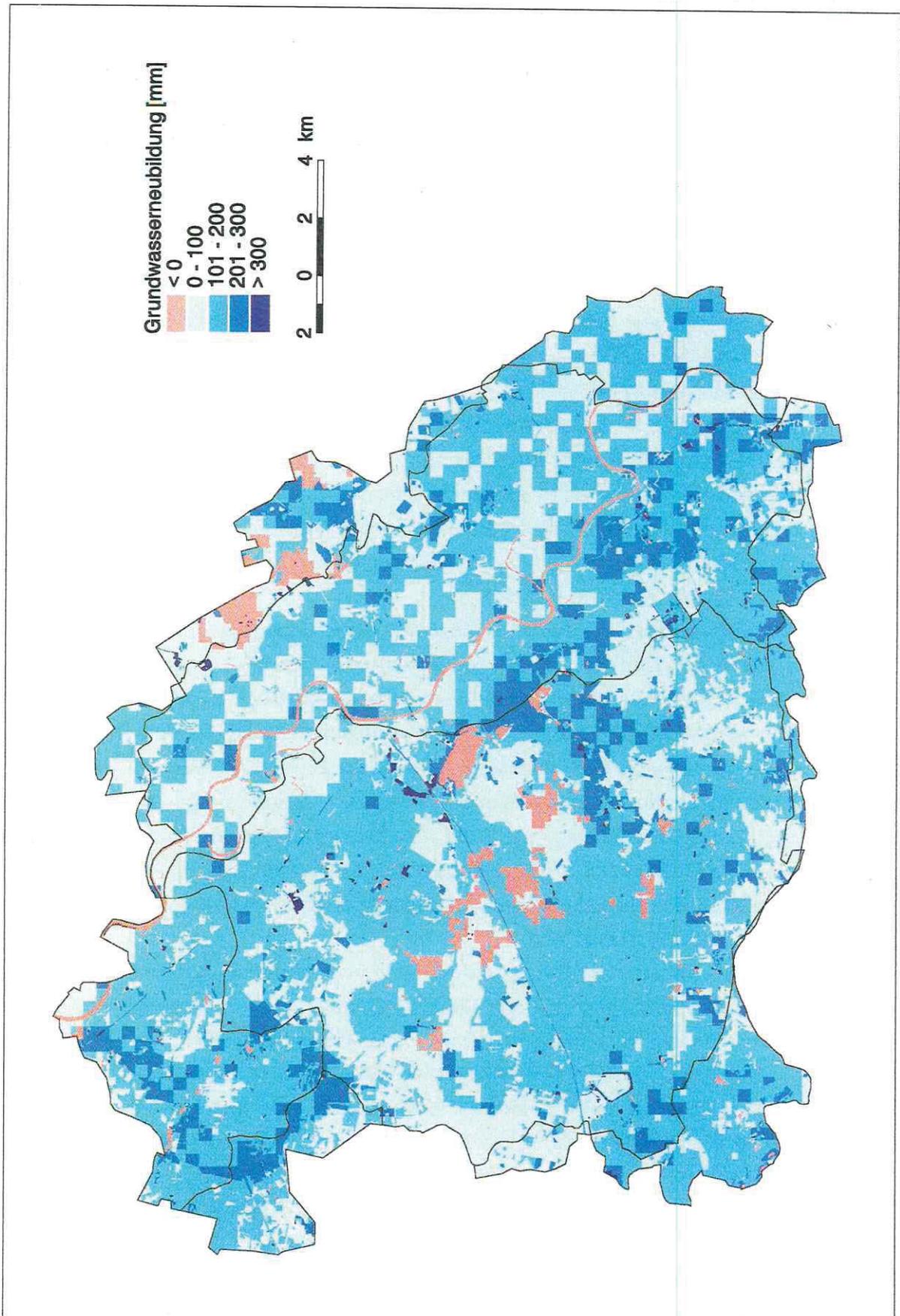


Abb. 6: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Torgauer Raum. 30-jähriges Mittel mit Bezugsjahr 1992.

Literatur

- AG Bodenkunde (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 4. Auflage. Hannover
- Brinschwitz, D. (1996): Grundwasserdargebotsprognose für den Regierungsbezirk Leipzig 1996, Prognosezeitschritte 1994 und 2010. Abschlußbericht. HGN Hydrogeologie, NL Torgau. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Freiberg. IBGW Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH Leipzig
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (Hrsg.) (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter 238/96
- Dyck, S. (1983): Overview on the present status of the concepts of water balance models. In: Van der Beken, A., Herrmann, A. (Hrsg.): *New Approaches in Water Balance Computations*. IAHS Publication 148, pp. 3-19
- Glugla, G., Enderlein, R., Eyrich, A. (1977): Anwenderinstruktion für das Rechenprogramm RASTER zur Berechnung langjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildung und des Wasserhaushaltes für den Lockergesteinsbereich der DDR. Berlin. Institut für Wasserwirtschaft und Kammer der Technik
- Glugla, G., Eyrich, A., König, B., Sur, S., Fürtig, A. (1988): Methodik und CAD-Arbeitsplatz für die GW-Dargebotsermittlung nach Menge und Beschaffenheit (Nitrat) für den Lockergesteinsbereich. Wasserwirtschaftsdirektion Berlin
- Glugla, G., Fürtig, G. (1997): Dokumentation zur Anwendung des Rechenprogrammes ABIMO Bundesanstalt für Gewässerkunde. Außenstelle Berlin
- Glugla, G., König, B. (1989): Der mikrorechnergestützte Arbeitsplatz Grundwasserdargebot. *Wasserwirtschaft - Wassertechnik* 39(8), S. 178-181
- Herzog, F., Wätzold, F., Messner, F., Klauer, B., Kindler, A., Horsch, H., Geyler, S. (1998): Landnutzung, Ressourcenschutz und wirtschaftliche Entwicklung im ländlichen Raum: Fallstudie aus einer Region mit großräumigen Trinkwasserschutzgebieten. Tagungsband zur Fachtagung Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung - Methoden, Indikatoren, Fallbeispiele. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 21, S. 134-139
- Hülsbergen K-J. (1997): Analyse und Bewertung von Stoff- und Energieflüssen auf betrieblicher Ebene mit dem Computermodell REPRO. In: Federal Environment Agency Austria (Hrsg.): *Stoffbilanzierung in der Landwirtschaft. Ein Instrument für den Umweltschutz?* Tagungsband 20, S. 13-39
- König, B. (1988): Anwenderdokumentation zum rechnergestützten Arbeitsplatz "GW-Dargebot", Version 3. Berlin. Wasserwirtschaftsdirektion. Institut für Wasserwirtschaft (unveröffentlicht)
- Krönert, R., Erfurth, S. (1998): Ökologische Folgen von Landnutzungsänderungen - Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Gebietswasserhaushalt. In: Kasperidus, H., Banzhaf, E. (Hrsg.): *Der Raum Leipzig-Halle-Bitterfeld - Erfassung und Auswertung der Landnutzung und ihrer Veränderungen mit Methoden der Fernerkundung und Geographischen Informationssystemen*. UFZ-Bericht 2/98, S. 75-82
- Kunze, J. (1998): Landnutzung und Trinkwasserneubildung im Torgauer Raum. Universität Rostock. Agrarwissenschaftliche Fakultät. Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz. Institut für Geodäsie und Geoinformatik (Diplomarbeit, unveröffentlicht)
- Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H. (1998a): Lysimeter studies in East Germany concerning the influence of set aside of intensively farmed land on the seepage water quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 67, pp. 161-173
- Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H. (1998b): Measuring environmental impacts of land use changes on water quality with lysimeters. In: Führ, F., Hance, R. J., Plimmer, J. R., Nelson, J. O. (Hrsg.) *The Lysimeter Concept*. American Chemical Society Symposium Series 699, pp. 163-176
- Münchow, B. (1996): Literaturübersicht. In: Breuste, J., Keider, T., Meinel, G., Münschow, B., Netzband, M., Schramm, M.: *Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen*. UFZ-Bericht Nr. 12/1996, S. II-1-II-40
- Nemec, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. Lelystad. Commission Internationale de l'Hydrologie du Bassin du Rhin. Report II-7
- Petry, D., Herzog, F., Erfurth, S., Steinhardt, U., Volk, M. (in Vorbereitung): Möglichkeiten und Grenzen mesoskaliger Wasserhaushaltsmodellierungen unter Verwendung unterschiedlicher Datengrundlagen: Beispiele aus dem mitteldeutschen Raum. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* (eingereicht)
- Singh, V.P. (1995): Watershed modeling. In: Singh, V.P. (Hrsg.): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch. Water Resources Publications, pp. 1-22
- SLUG (1995): Bericht zur Grundwassersituation 1993-1994. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. *Materialien zur Wasserwirtschaft* 3/1995
- Steinhardt, U. (1998a): Methodological approaches for the investigation of landscape water balance on the landscape scale. In: *Key Concepts in Landscape Ecology*. Proceedings of the 1998 European Congress of the International Association for Landscape Ecology, pp. 93-101

- Steinhardt, U. (1998b): Investigation of the landscape water balance on the landscape scale. In: Proceedings of the VII International Congress of Ecology (INTECOL). Florence, pp. 405
- Volk, M., Bannholzer, M. (in Vorbereitung): Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Gebietswasserhaushalt: Anwendungsmöglichkeiten des Modells „ABIMO“ für regionale Szenarien. Geoökodynamik (eingereicht)
- Wendland, F., Kunkel, R. (1997): Gebietsumfassende Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassergüte zur naturräumlichen Klassifizierung und Leitbildentwicklung im Elbeinzugsgebiet. Forschungszentrum Jülich GmbH. Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung
- Wendling, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. Wasserwirtschaft 85(12), S. 602-604
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A., Sokollek, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt. Hamburg & Berlin
- Xu, C.-Y., Seibert, J., Halldin, S. (1996): Regional water balance modelling in the NOPEX area: development and application of monthly water balance models. Journal of Hydrology 180, pp. 211-236

Naturressourcenschutz und wirtschaftliche Entwicklung

**Nachhaltige Wasserbewirtschaftung und Landnutzung
im Elbeeinzugsgebiet**

Helga Horsch und Irene Ring (Hrsg.)

GIS und Kartographie: Annegret Kindler

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH