

# Eine Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Jörg Grossmann, Frauke Lange

## Kurzfassung

Die Eingangsdaten zur Berechnung der Grundwasserneubildung weisen natürliche Variationen auf. Ihre Schätzung ist mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden. Der daraus für den Zielwert Grundwasserneubildung resultierende Fehler kann mittels einer Sensitivitätsanalyse geschätzt werden. Die mögliche maximale Variationsbreite der Eingangsdaten kann in vielen Fällen aus Literaturdaten abgeleitet werden. Die für das Verfahren mit Abstand sensitivsten Faktoren sind der Niederschlag sowie die Evapotranspiration und die Interzeption, wenn der Anteil von Wald an der Flächennutzung bedeutend ist.

## Abstract

Input data for the calculation of groundwater recharge show natural variations. Thus their estimation is coupled with appropriate uncertainties. The resulting error for the values of groundwater recharge can be estimated by sensitivity analysis. The possible maximum range of variation of input data in most cases can be derived from published data. The factors most sensitive for the procedure are precipitation, as well as evapotranspiration and interception, when the portion of wood at land use is significant.

## Einführung

Eine der zentralen Problemstellungen bei der Erschließung und Nutzung von Grundwasser ist die Ermittlung des Grundwasserdargebots. Eine Grundlage ist die quantitative Beschreibung des Wasserhaushalts für das bearbeitete Einzugsgebiet. Das wichtigste positive Bilanzglied ist dabei das langjährige Mittel der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. In der Literatur sind unterschiedliche Verfahren zur Berechnung von Jahreswerten oder langjährigen Mitteln der Grundwasserneubildung bzw. bestimmter Teilglieder des Wasserhaushalts in der Biosphäre und Pedosphäre beschrieben. Eine Literaturübersicht findet sich bei GROSSMANN (1996). Diese Verfahren wurden auf der Basis von Abflußmessungen und/oder Lysimetermessungen entwickelt. Teilweise wurden sie auch anhand von Abflußmessungen verifiziert.

Neben dem Verfahren selbst hat in erster Linie die korrekte Bestimmung der Eingabedaten einen Einfluß auf die Qualität der Berechnungsergebnisse. Diese werden in der Regel nicht gezielt bei einzelnen Untersuchungen gemessen, sondern es wird auf vorhandene Quellen zurückgegriffen. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist es wichtig zu wissen, wie das Berechnungsergebnis von Ungenauigkeiten bzw. Variationen der verschiedenen Eingangsdaten abhängig ist, um den möglichen Fehlerbereich abschätzen zu können. Eine mathematische Fehleranalyse ist aufgrund der Struktur des Algorithmus schwierig und nicht Gegenstand dieser Betrachtung. Statt dessen wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Sie liefert Hinweise, welche Eingangsdaten besonders sorgfältig zu bestimmen sind.

Es handelt sich um eine einfache Sensitivitätsanalyse, bei der die Änderung des Zielwertes bei Variation nur jeweils eines Parameters untersucht wird. Meist werden die verschiedenen Parameter in gleichen relativen Schritten variiert und die relativen Änderungen bzw. die daraus abgeleiteten Sensitivitätskoeffizienten verglichen. Bei der hier vorgestellten Untersuchung werden dagegen absolute Änderungen der Zielwerte verglichen, d. h. die Beträge der Differenzen zwischen den Ergebnissen aus den für ein Gebiet angesetzten Eingabedaten und den Ergebnissen verschiedener Varianten.

Aus Sicht der Praxis sind lediglich die Beträge der Abweichungen von Belang, da das Ziel wasserwirtschaftlicher Untersuchungen die Bestimmung von umgesetzten oder nutzbaren Wassermengen ist. Relative Fehler sind kaum vergleichbar, da ihnen je nach Höhe der Grundwasserneubildung sehr unterschiedliche absolute Abweichungen (bei kapillarem Aufstieg z. T. auch negative Werte) entsprechen.

Dipl.-Geol. Dr. J. Grossmann,  
Hamburger Wasserwerke GmbH,  
Billhorner Deich 2, 20539 Hamburg,  
Telefax: 040-7888-2683

Dipl.-Geol. F. Lange,  
Wittorfer Straße 43, 27374 Visselhövede

Eingang des Beitrages: 21.11.97

Eingang des überarbeiteten Beitrages: 27.10.98

**Tab. 1:** Arithmetisches Mittel der Jahressumme des Niederschlags P und der potentiellen Evapotranspiration  $ET_p$  für Grünland nach HAUDE (1955); <sup>1</sup> Alzey:  $ET_p$ , Wöllstein: P

	Wetteramtsbereich	Höhe [mNN]	P [mm]	$ET_p$ [mm]
Station 1 Alzey/Wöllstein <sup>1</sup>	Trier	215/224	539	687
Station 2 Neumünster	Schleswig	26	829	526
Station 3 Brilon	Essen	472	1113	447

Die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse durchgeführten Variationen orientieren sich an maximal möglichen Wertebandbreiten, die auf Literaturangaben oder Schätzungen beruhen. Die tatsächlich auftretenden Variationen sind in der Regel kleiner.

## Modell und Eingangsdaten

Basis für die dargestellte Sensitivitätsanalyse ist ein Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell, dessen Entwicklung anhand von Lysimeteruntersuchungen und der Anwendung in verschiedenen deutschen Einzugsgebieten vielfach beschrieben worden ist (u. a. DOMMERMUTH & TRAMPF 1995, GROSSMANN 1998). Mit solchen Modellen kann der Sickerwasserabfluß für verschiedene Bodenarten und Nutzungstypen berechnet werden. Neben der kulturabhängigen Evapotranspiration können auch Prozesse wie die Interzeption, der kapillare Aufstieg bei geringen Grundwasserflurabständen und die Reduktion der Evapotranspiration bei sinkenden Wassergehalten im Boden berücksichtigt werden. Das Modell berücksichtigt nicht die Auswirkung von Makroporen, über die ein Sickerwasserabfluß auch bei Wassergehalten kleiner als 100 % nutzbarer Feldkapazität erfolgt, und es enthält kein Schneemodell. Es wird außerdem davon ausgegangen, daß der verwendete Ansatz zur Berücksichtigung des Direktabflusses bei dem für die Berechnung gewählten Zeitintervall in Monatsschritten für Jahreswerte und langjährige Mittel hinreichend genaue Werte liefert (PENNING et al. 1989, SCHROEDER & HAMELS 1987, WEGEHENKEL 1995). Als Eingangsdaten werden beispielhaft die Werte von drei Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (Alzey/Wöllstein, Brilon, Neumünster) verwendet, welche die Bandbreite der Verhältnisse in der Bundesrepublik mit Ausnahme der Hochlagen der Mittelgebirge und der Alpen repräsentieren (Tab. 1). Es handelt sich um Monatssummen des gemessenen Niederschlags und Monatssummen der potentiellen Evapotranspiration über Grünland nach HAUDE (1955).

## Fehlerbereiche und Variationsbreiten der Eingangsdaten

Die Variation der Eingangsdaten bei der Sensitivitätsanalyse erfolgt im Rahmen der möglichen Fehlerbandbreiten. Sie ergeben sich aus der maximal möglichen Variationsbreite, die aus Literaturdaten abgeleitet oder, falls dies nicht möglich ist, geschätzt wird. Die Variationsbreite der einzelnen Eingangsdaten wird in diesem Abschnitt dargestellt.

## Niederschlag

Bei der Niederschlagsmessung treten durch windbedingte Strömungseinflüsse und durch Beschattung durch Vegetation oder Gebäude systematische Fehler in dem Sinne auf, daß die gemessenen Werte zu niedrig sind. Detaillierte Untersuchungsergebnisse für die Stationen des Deutschen Wetterdienstes wurden von RICHTER (1995) publiziert. Der Fehler hängt von der geographischen Lage, der abschirmenden Wirkung der Umgebung der Meßstation und der Jahreszeit ab. Er liegt zwischen 5,6 und 33,5 % (Mittel etwa 10 %). Die kulturspezifischen Faktoren für die HAUDE-Gleichung (HAUDE 1955) oder die Interzeption wurden i. d. R. mit unkorrigierten (sogenannten gemessenen) Niederschlagswerten ermittelt. Dabei ist nicht berücksichtigt, daß der Fehler zwischen gemessenem und tatsächlichem Niederschlag in Abhängigkeit von der Stationslage variiert. Diese Faktoren sind daher zwar für gemessene Niederschlagswerte gültig, wobei aber nur ein nicht näher bestimmter mittlerer Meßfehler berücksichtigt ist. Der tatsächliche Meßfehler kann von dem mittleren Meßfehler von Mai bis Oktober um maximal bis  $\pm 3$  % und von November bis Februar um maximal  $\pm 10$  % abweichen (Tab. 2).

Eine Ursache für eine Unterschätzung des Niederschlags liegt in dem Umstand, daß der in Form von Tau oder Reif abgesetzte Niederschlag nur zu einem geringen Anteil von den üblichen Niederschlagsmeßgeräten erfaßt wird. Er hat einen Anteil von 2 bis 5 % am gesamten Niederschlag (HÄCKEL 1990, WOHLRAB et al. 1992). In einzelnen Monaten kann der Anteil über 10 % liegen (z. B. RÖNSCH 1990).

## Potentielle Evapotranspiration

Die potentielle Evapotranspiration kann, bedingt durch unterschiedliche Exposition oder Einfluß lokaler Klimafaktoren (z. B. Flußniederung), kleinräumige Variationen aufweisen. Die mögliche Variation wird auf  $\pm 10$  % geschätzt. HAUDE-Faktoren für die Nutzungstypen Laubwald und Nadelwald und verschiedene landwirtschaftliche Kulturen (Grünland, diverse Winter- und Sommergetreide, Futterpflanzen und Hackfrüchte) bzw. Umrechnungsfaktoren von der Referenzverdunstung über Grünland sind bei DOMMERMUTH & TRAMPF (1991) und DVWK (1996) dokumentiert. Diese kulturspezifischen Evapotranspirationsfaktoren stellen für Deutschland repräsentative Mittelwerte dar. Auch sie können lokale Variationen aufweisen. Das Verhältnis der (Referenz-)Verdunstung über Grünland zu der über anderen Kulturen kann variieren. Die Variation der Evapotranspirationsfaktoren wirkt sich direkt auf die Höhe der Evapotranspiration aus. Die mögliche Schwankungsbreite wird aufgrund eines Vergleichs von Publikationen verschiedener Werte für verschiedene Nutzungen auf  $\pm 10$  % geschätzt (ELLING et al. 1990, ERNSTBERGER 1987, ERNSTBERGER & SOKOLLEK 1983, HEGER 1978, MEUSER 1989, SPONAGEL 1980, VAN EIMERN & HÄCKEL 1979). Hierin sind Auswirkungen durch die Einflußfaktoren Exposition, Lokalklima sowie Beginn und Dauer der Vegetationsperiode enthalten.

## Aktuelle Evapotranspiration

Die aktuelle Evapotranspiration nimmt mit dem Wassergehalt des Bodens ab. Bei Bodenwassergehalten unter 60 % der nutzbaren Feldkapazität erfolgt in dem hier gewählten Modell eine lineare Reduktion der Evapotranspiration (MEUSER 1989). In verschiedenen Untersuchungen ist dieser Zusammenhang in allgemeiner Form (zeit-, boden- und kulturunabhängig) be-

**Tab. 2:** Durch Meßfehler bedingte maximale Variation ( $\pm$  %) der Niederschlagshöhen (nach RICHTER 1995)

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
Variation	10	10	8	6	2	1
	Juli	August	Sept.	Oktober	Nov.	Dez.
Variation	1	1	2	3	6	8

schrieben worden. Gemeinsames Merkmal der gefundenen Zusammenhänge ist, daß ab einem bestimmten Grenzwassergehalt (50 % bei HEGER 1978, 60 % bei MEUSER 1989, 70 % bei VAN BAVEL 1967) die Evapotranspiration stetig abnimmt und bei einem Wassergehalt von 0 % die nutzbare Feldkapazität gegen Null geht (ausführliche Darstellung bei MEUSER 1989). Der Grenzwasservorrat wird bei der Sensitivitätsanalyse entsprechend um  $\pm 16$  % variiert.

#### Nutzbare Feldkapazität und effektiver Wurzelraum

Die Werte für die nutzbare Feldkapazität der verschiedenen Bodengruppen (Kies/Sand ohne relevanten Anteil an feinem Korn sowie Sand, Lehm, Ton, Schluff mit verschiedenen Beimengungen und Torf) und den effektiven Wurzelraum für verschiedene Vegetationsarten und Bodengruppen werden entsprechend der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODENKUNDE 1997) und den bei LEHNARDT & BRECHTEL (1980) publizierten Zahlen festgelegt. Diese für die Wasserspeicherkapazität eines Bodens relevanten Eigenschaften weisen innerhalb jeder bodenkundlichen Kartiereinheit eine natürliche Variabilität auf, z. B. aufgrund unterschiedlicher Lagerungsdichten. Entsprechend den in der Bodenkundlichen Kartieranleitung publizierten Tabellen liegt die mögliche maximale Variationsbreite bei Kiesen und Sanden mit vernachlässigbarem Feinkornanteil bei etwa  $\pm 30$  % und bei allen anderen Bodengruppen bei etwa  $\pm 20$  %. Häufig muß die Bodengruppe aus geologischen Karten abgeleitet werden. Geologischen Einheiten wie Schmelzwassersande (gS-fS), Moräne (l'S-uL) oder Beckensedimente (T-U) können dabei Bodenarten aus mehreren Bodengruppen zugeordnet werden. Die möglichen Fehler liegen im oben angegebenen Rahmen.

#### Interzeption

Für die Interzeption sind auf Literatursauswertungen basierende Mittelwerte verfügbar (GROSSMANN 1996). Dabei wird zwischen Laub- und Nadelwald differenziert, und es werden Sommer- und Wintersaison unterschieden. Die Höhe der Interzeption hängt von der Baumart, dem Baumalter, der Bestandesdichte bzw. dem Durchforstungsgrad und der Niederschlagsintensität ab. Die Mittelwerte der Literatursauswertung sind nur für große Gebiete gültig, in denen die genannten Einflußfaktoren alle möglichen Ausprägungen aufweisen. Als mögliche Extremwerte für einzelne Schläge wird bei der Sensitivitätsanalyse das bei der o. g. Auswertung bestimmte 10. oder 90. Perzentil verwendet (Tab. 3).

#### Kapillarer Aufstieg

Für Böden in Gebieten mit niedrigen Grundwasserflurabständen wird in Anlehnung an RENGIER & STREBEL (1982) angenommen, daß bei voll wirksamem kapillaren Aufstieg der Bodenwasser-

**Tab. 3:** Variation der Interzeption (% P) nach Literatursauswertung (GROSSMANN 1996)

	Laubwald		Nadelwald	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
10. Perzentil	13	12	28	27
Mittelwert	25	19	34	33
90. Perzentil	35	29	40	39

gehalt immer mindestens 50 % der nutzbaren Feldkapazität beträgt. Dieser Grenzwasservorrat wird bei der Sensitivitätsanalyse um  $\pm 20$  % variiert. Die Abgrenzung von Zonen mit (maximalem) kapillaren Aufstieg erfolgt in der Regel auf der Basis von geologischen und bodenkundlichen Karten und einer Analyse der hydrogeologischen Verhältnisse. Für diese Zonen werden die mit dem Verfahren für grundwassernahe Böden berechneten Neubildungswerte angesetzt.

#### Direktabfluß

Der Direktabfluß kann bei Berechnungen im regionalen Maßstab für lange Zeiträume nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) und beschränkt auf Gebiete mit mäßigem Relief nach SCHROEDER & WYRWICH (1990) geschätzt werden. Bei diesen Verfahren wird der Direktabfluß in Abhängigkeit von der Reliefenergie sowie von den Boden- und Nutzungsverhältnissen als Teil des langjährigen Mittels der Grundwasserneubildung bestimmt. Über die mögliche Variationsbreite des Direktabflusses liegen keine Untersuchungen vor. Sie kann daher nur geschätzt werden. Da die Höhe des Direktabflusses stark von den konkreten Verhältnissen in einem Untersuchungsgebiet abhängt, ist er nicht in die Sensitivitätsanalyse einbezogen worden.

#### Flächennutzungstypen

Parameter wie der effektive Wurzelraum oder der HAUDE-Faktor sind generell für vier Nutzungstypen (Ackerland, Grünland, Laubwald, Nadelwald) verfügbar. Dabei sind für Ackerland auch Differenzierungen für verschiedene Kulturen möglich. Andere als Mischnutzungen zu charakterisierende Nutzungstypen sind bisher nicht gezielt untersucht worden. Sie können aber meist aus den oben genannten vier Nutzungen abgeleitet werden. Mischwald ergibt sich aus unterschiedlichen Anteilen von Laub- und Nadelwald. Baumschulen, Heide, Moor, Schrebergärten und städtische Grünanlagen haben unterschiedliche Anteile von Ackerland, Grünland, Laubwald und Nadelwald. Die Flächenanteile der Grundnutzungstypen an den verschiedenen Mischnutzungen können in der Regel nur geschätzt werden. Der Einfluß der dabei möglichen Fehler wird bei der Sensitivitätsanalyse nicht untersucht, da dies ebenfalls für das jeweilige Untersuchungsgebiet erfolgen muß.

#### Effektive Versiegelung

Eine Bestimmung der effektiven Versiegelung kann entweder durch detaillierte Kartierungen der Bebauung oder auf der Basis von Daten zu Abflüssen im Kanalisationssystem erfolgen. Entsprechend auswertbare Daten sind aber häufig nicht verfügbar und Kartierungen im Rahmen großräumiger Untersuchungen zu aufwendig. Auf der Basis allgemeiner Planunterlagen können nur wenige Versiegelungsklassen unterschieden werden.

**Tab. 4:** Variationsbreiten der effektiven Versiegelung (%) für drei verschiedene Bebauungstypen

<sup>1</sup> SCHOSS (1977)

<sup>2</sup> BERLEKAMP & PRANZAS (1992)

Untersuchungs- gebiet	Essen <sup>1</sup>	Hamburg <sup>2</sup>	geschätzter Mittelwert	geschätzte Variations- breite
Stadtkern, dichte Blockbebauung	81–98	84–97	90	±10 %
städt. Wohngebiete, offene Blockbebauung	41–79	51–69	60	±30 %
Stadttrand, offene Bebauung	20–50	41–62	40	±50 %

In Tabelle 4 sind die bei detaillierten Untersuchungen ermittelten Versiegelungsgrade drei Bebauungstypen zugeordnet, die sich auch aus topographischen Karten ableiten lassen. Für jeden Bebauungstyp sind der Mittelwert und die jeweilige Variationsbreite aufgelistet. Der Einfluß der Versiegelung muß ebenfalls gebietsbezogen erfolgen und wurde in der hier dargestellten Sensitivitätsanalyse nicht berücksichtigt.

## Ergebnisse und Diskussion

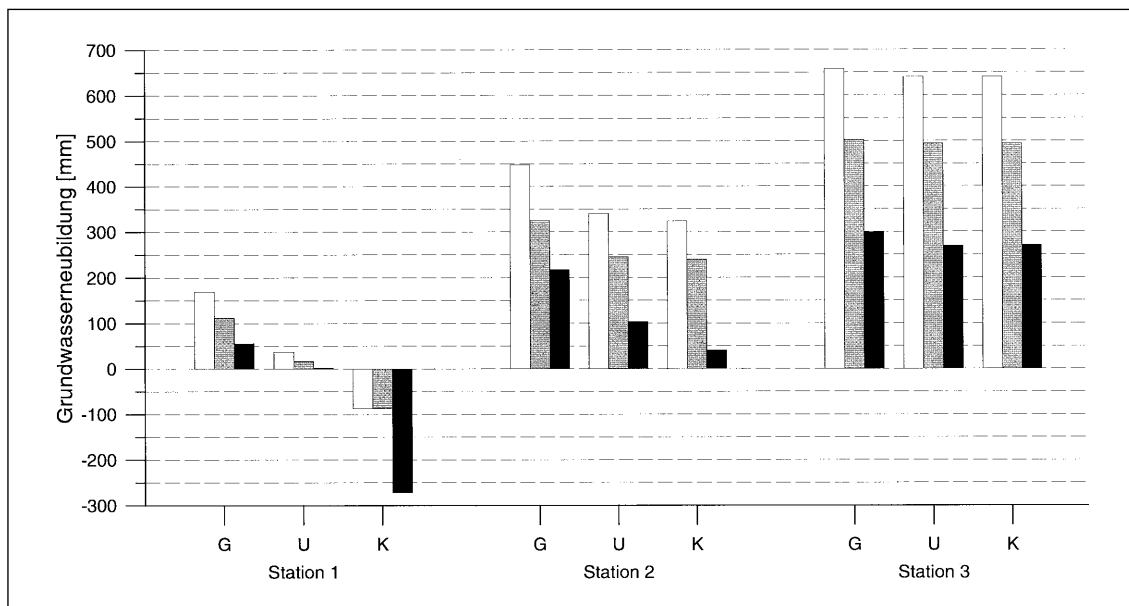
Die Sensitivitätsanalyse wird für drei Bodengruppen dargestellt: Kies bzw. Sand mit geringen Beimengungen, Schluff mit Beimengungen und Böden mit kapillarem Aufstieg, wobei die ersten beiden die Bandbreite der Böden ohne Grundwassereinfluß widerspiegeln. Jeder Bodengruppe entspricht ein bestimmter maximal nutzbarer Wasservorrat, welcher die Höhe der Grundwasserneubildung beeinflusst. Dabei sind die Werte für Sand mit Beimengungen (S) sowie für Ton (T), Lehm (L), Schluff (U) und Torf (H) relativ ähnlich und von den für Kies/Sand ohne Beimengungen (G) oder Böden mit Grundwassereinfluß (K) deutlich unterschiedlich:

$G \gg S > T > L > U = H \gg K$

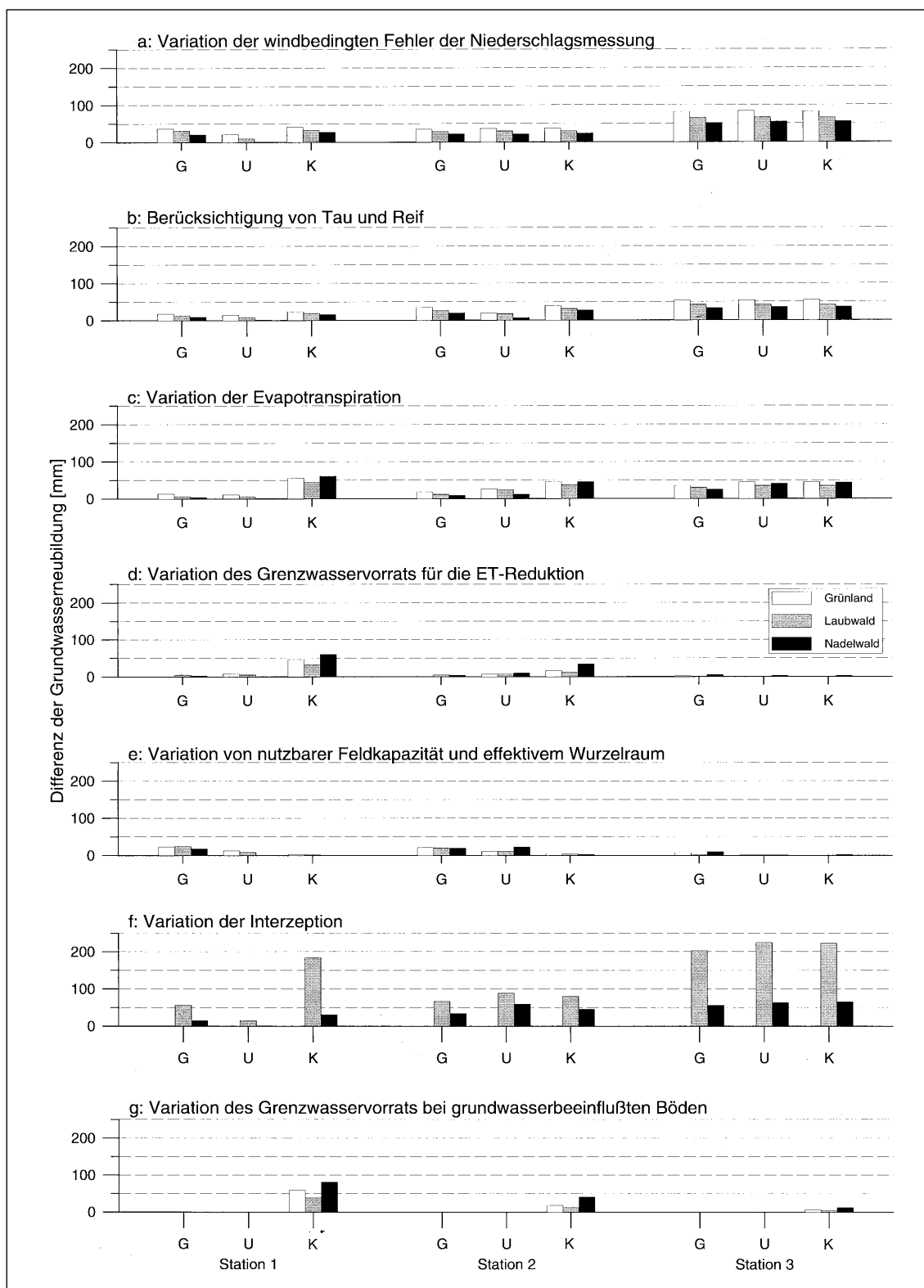
Mit steigender Grundwasserneubildung werden die Unterschiede kleiner. Bei Station 3 sind sie vernachlässigbar (Abb. 1). Hinsichtlich der Flächennutzung ist neben Laubwald und Nadelwald Grünland exemplarisch für die landwirtschaftlichen Kulturen dargestellt. Grünland nimmt hinsichtlich der Höhe der Grundwasserneubildung eine mittlere Stellung innerhalb der landwirtschaftlichen Kulturen ein. Die Ackerkulturen können bei Bedarf zu den Gruppen Winterkulturen (Wintergerste, Roggen, Winterweizen) und Sommerkulturen (Sommergerste, Hafer, Früh- und Spätkartoffeln, Raps, Zuckerrüben) zusammengefaßt werden (GROSSMANN 1998). Die Bandbreite der Werte innerhalb dieser Gruppen liegt zwischen 10 und 20 mm. Nur unter Mais ist die Grundwasserneubildung deutlich höher. Er paßt daher in keine der beiden Gruppen.

Deutliche Abweichungen (> 20 mm) zwischen dem mit Mittelwerten berechneten Grundwasserneubildungswert und der in einer Eingangsgröße veränderten Variante treten durchgängig beim Niederschlag (Abb. 2 a und 2 b), der Evapotranspiration (Abb. 2 c) und der Interzeption (Abb. 2 f) auf. Bei Laubwald liegen die Abweichungen mehrfach deutlich über 100 mm. Dabei nehmen die Abweichungen generell bei allen drei Faktoren bei höheren Niederschlägen zu. Faktoren, die die aktuelle Evapotranspiration beeinflussen (Wasserspeichervermögen, Beziehung zwischen Wassergehalt und Evapotranspiration), spielen mit Abweichungen meist unter 20 mm keine bedeutende Rolle (Abb. 2 d und 2 e). Die einzige Ausnahme bilden grundwasserbeeinflusste Böden bei sehr niedrigen Niederschlägen (Station 1 in Abb. 2 d). Deutliche Effekte (bis > 50 mm) hat ebenfalls bei niedrigen Niederschlägen die Bemessung der Höhe des kapillaren Aufstieges (Abb. 2 g).

Für eine Bewertung des Einflusses der von verschiedenen Faktoren verursachten Unsicherheit auf die berechnete Grundwasserneubildung muß neben dem Betrag der möglichen Abweichung für eine oder mehrere Boden-/Nutzungsvarianten auch die Relevanz dieses Faktors für ein ganzes Untersuchungsgebiet betrachtet werden. Variationen beim Niederschlag und etwas schwächer der potentiellen Evapotranspiration wirken immer auf die gesamte Fläche und haben somit den größten Einfluß. Andere Faktoren (z. B. Interzeption) wirken sich nur auf bestimmte Kulturen oder Teilflächen (kapillarer Aufstieg) eines



**Abb. 1:** Langjährige Mittel der Grundwasserneubildung (mm pro Jahr) für die Bodengruppen Kies/Sand (G), Schluff (U) und grundwassernahe Böden (K) sowie die Nutzungstypen Grünland (weiß), Laubwald (schraffiert) und Nadelwald (schwarz) für drei Klimastationen mit niedrigen, mittleren und hohen Jahresniederschlägen



**Abb. 2:** Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Beträge der Abweichungen (mm) der Ergebnisse von Wertevariationen von den mit Mittelwerten berechneten Grundwasserneubildungswerten für die Bodengruppen Kies/Sand (G), Schluff (U) und grundwassernahe Böden (K) sowie die Nutzungstypen Grünland, Laubwald und Nadelwald für drei Klimastationen mit niedrigen, mittleren und hohen Jahresniederschlägen; 2 a: Variation der windbedingten Fehler der Niederschlagsmessung zwischen  $\pm 1$  % im Sommer und  $\pm 10$  % im Winter;

2 b: Berücksichtigung von Tau und Reif  $+5$  %; 2 c: Variation der Evapotranspiration oder der kulturspezifischen ET-Faktoren  $\pm 10$  %; 2 d: Variation des Grenzwasservorrats für die Reduktion der Evapotranspiration  $\pm 16$  %; 2 e: Variation von nutzbarer Feldkapazität und effektivem Wurzelraum  $\pm 30$  %/ $\pm 20$  %; 2 f: Variation der Interzeption zwischen den 10 %- und 90 %-Perzentilwerten; 2 g: Variation des Grenzwasservorrats bei grundwasserbeeinflussten Böden  $\pm 20$  %

Untersuchungsgebiets aus. Die aus den Variationen resultierenden Abweichungen für einzelne Boden-/Nutzungsvarianten sind unter Berücksichtigung des Flächenanteils am gesamten Einzugsgebiet und der mittleren Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet zu bewerten.

Eine Sensitivitätsanalyse für weitere, im vorigen Abschnitt dargestellte Faktoren, wie den Direktabfluß, die Anteile einzelner Nutzungstypen an sogenannten Mischnutzungen oder die effektive Versiegelung ist hier nicht dargestellt, da die Höhe der Abweichung zwischen Mittelwert und Variante von der konkreten Ausprägung des Faktors im jeweiligen Untersuchungsgebiet abhängen. Da ihr Einfluß auf die gesamte Neubildung von der Verteilung der Nutzung und der Bodenverhältnisse abhängt, treten sie in ihrer Bedeutung hinter den Niederschlag und die Evapotranspiration zurück, obwohl Abweichungen über 100 mm möglich sind. Hier gilt wieder die Regel der Zunahme der Abweichung mit steigenden Niederschlägen bzw. steigender Grundwasserneubildung.

Die durchgeführte einfache Sensitivitätsanalyse erfaßt nur den Effekt der Variation einzelner Parameter. Für praktische Anwendungen ist jedoch die summarische Auswirkung aller tatsächlich wirksamen Unsicherheiten wichtig. Untersucht werden kann dies für konkrete Fälle mit einer stochastischen Modellierung. Problematisch dabei sind der Rechenaufwand und die Bereitstellung der erforderlichen statistischen Parameter. In der Regel werden daher alle Unsicherheiten durch eine konservative Schätzung der Parameter oder durch eine einfache Variationsrechnung unter der Annahme wahrscheinlicher ungünstigster Ausprägungen der Eingangsdaten berücksichtigt.

### Übertragung der Berechnung auf Flächen

Die Sensitivitätsanalyse befaßt sich in der vorliegenden Form mit „punktuellen“ Berechnungen für einzelne Boden-/Nutzungskombinationen. Untersucht wird der mögliche Fehler, der bei der Festlegung von Eingangsdaten für die Verhältnisse an einem bestimmten Standort entsteht. Die dargestellten Abweichungen stellen als Maximalwerte den möglichen Rahmen dar. Der tatsächlich zu erwartende Fehler ist kleiner. Im Hinblick auf die eingangs formulierte Aufgabenstellung der Berechnung von Jahreswerten oder langjährigen Mitteln der Grundwasserneubildung für ganze Einzugsgebiete müssen diese „Punkt“-Daten auf mehr oder weniger ausgedehnte Flächen übertragen werden. Für alle boden- und nutzungsbezogenen Faktoren dürften in der Fläche in der Regel die gleichen möglichen Fehlerbandbreiten anzusetzen sein. Durch die natürliche räumliche Variabilität von Boden- und Vegetationseigenschaften ist mit zunehmender Gebietsgröße zu erwarten, daß sich positive und negative Fehler bis zu einem gewissen Grad ausgleichen und damit der Fehler der Berechnung kleiner wird.

Anders sind die Verhältnisse bei den Klimadaten. Insbesondere Niederschlagsereignisse weisen eine hohe räumliche Variabilität auf. Die räumliche Verteilung der Tagesniederschläge kann daher mit dem Netz der Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes nicht korrekt erfaßt werden. Auch bei Monatssummen ist insbesondere bei Monaten mit lokalen Starkregen mit Ungenauigkeiten zu rechnen. Bei der Berechnung von Jahresmittelwerten und insbesondere langjährigen Mitteln kann aber davon ausgegangen werden, daß solche interpolationsbedingten Fehler bei Tages- oder Monatssummen durch Mittelung vernachlässigbar werden und eine räumliche Interpolation möglich ist.

In jedem Fall ist bei größeren Gebieten die Höhenabhängigkeit klimatischer Prozesse zu berücksichtigen. Eine Höhenabhängigkeit ist beim Niederschlag ab Höhen über 100 mNN festzustellen. Diese ist bedingt durch Steigungsregen und eine Zunahme des abgesetzten Niederschlages. Die Zunahme der jährlichen Niederschlagshöhe liegt zwischen 40 und 120 mm pro 100 m Höhenzunahme. Über 700 mNN kann die Zunahme bei Nadelwald, bedingt durch Auskämmung von Nebel, zwischen 100 und 200 mm liegen (FLEMMING 1991). Auch bei der Verdunstung ist ein Einfluß der Höhenlage wegen der Abnahme der mittleren Temperatur um 0,5 bis 1,0 °C pro 100 m festgestellt worden (BROCKHAUS 1995, DOMMERMUTH & TRAMPF 1991). Eine Verringerung der Interzeption wird indirekt durch mit der Höhe steigende Niederschlagshöhen und -intensitäten verursacht (DOMMERMUTH & TRAMPF 1991).

Ein gravierendes Problem bei der Bearbeitung größerer Gebiete kann auch die Abgrenzung von Bereichen, in denen der kapillare Aufstieg nicht zu jeder Zeit voll wirksam ist, darstellen. Für diese Zonen mit eingeschränktem Aufstieg kann als Grundwasserneubildung der Mittelwert aus der mit dem Verfahren berechneten Grundwasserneubildungsrate ohne und mit maximalem kapillaren Aufstieg angesetzt werden. Die möglichen Effekte von fehlerhaften Einstufungen von Böden hinsichtlich des Grundwassereinflusses können durch einen Vergleich der Neubildungswerte ohne oder mit kapillarem Aufstieg abgeschätzt werden (Tab. 1).

## Literaturverzeichnis

- ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE (1997): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl. - 331 S.; Stuttgart.
- BERLEKAMP, L.-R., PRANZAS, N. (1992): Erfassung und Bewertung von Bodenversiegelungen unter hydrologisch-stadtplanerischen Aspekten am Beispiel eines Teilraums von Hamburg - Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg. - 270 S.; Hamburg.
- BROCKHAUS, W. (1995): Temperaturunterschiede zwischen einer Berg- und einer Talstation im Schwarzwald auf Grund 10-jähriger Registrierung. - Meteorolog. Zeitschrift NF 4: 24-30.
- DÖRHÖFER, G., JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. - Geol. Jb. C27: 45-65.
- DOMMERMUTH, H., TRAMPF, W. (1991): Die Verdunstung in der Bundesrepublik 1951 bis 1980, Teil 1. - 10 S., 11 Karten, Teil 2. - 8 S., 11 Karten, Teil 3. - 10 S., 11 Karten; Offenbach.
- DOMMERMUTH, H., TRAMPF, W. (1995): Potentielle und tatsächliche Evapotranspiration, Bodenfeuchte und Wasserstreßindex - Band 1: Gras. Daten zum Bodenwasserhaushalt in Deutschland Zeitraum 1951 bis 1980. - 24 S.; Offenbach.
- DVWK (Hrsg.) (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen - DVWK-Merkblatt 238. - 177 S.; Hamburg, Berlin.
- ELLING, W., HÄCKEL, H., OHMAYER, G. (1990): Schätzung der aktuell nutzbaren Wasserspeicherung (ANWS) des Wurzelraums von Waldbeständen mit Hilfe eines Simulationsmodells. - Forstw. Cbl. 109: 210-219.
- ERNSTBERGER, H. (1987): Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Wasserbilanz - Dissertation, Universität Gießen. - 189 S.; Kirchzarten.
- ERNSTBERGER, H., SOKOLLEK, V. (1983): Der Einfluß land- und forstwirtschaftlicher Bodennutzung auf die Absickerung aus dem durchwurzelten Bodenraum. - Z. dt. geol. Ges. 134: 723-734.
- FLEMMING, G. (1991): Einführung in die angewandte Meteorologie. - 168 S.; Berlin.

- GROSSMANN, J. (1996): Eingangsdaten und Parameter zur Berechnung der Grundwasserneubildung mit einem Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell.- DGM 40: 204–211.
- GROSSMANN, J. (1998): Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für große Einzugsgebiete.- Gwf-Wasser-Abwasser 139: 4–23.
- HÄCKEL, H. (1990): Meteorologie, 2. Aufl.- 402 S.; Stuttgart.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise.- Mitt. Dt. Wetterdienst 11: 1–23.
- HEGER, K. (1978): Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration über unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen.- Mitt. Dt. Bodenkde. Ges. 26: 21–40.
- LEHNARDT, F., BRECHTEL, H.-M. (1980): Durchwurzelungs- und Schöptiefen von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen, Teil I: Erfahrungen aus Geländearbeiten und Ergebnisse veröffentlichter Untersuchungen.- Allg. Forst- und Jagd-Z. 6/7: 120–127.
- MEUSER, A. (1989): Einfluß von Brachlandvegetation auf das Abflußverhalten in Mittelgebirgslagen – Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen.- 160 S.; Kirchzarten.
- PENNING, F.W.T., JANSEN, D.M., TEN BERGE, H.F.M., BAKAMA, A. (1989): Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops.- 271 S.; Pudoc, Wageningen.
- RENGER, M., STREBEL, O. (1982): Beregnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen in Niedersachsen.- Geol. Jb. F13: 1–66.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers – Berichte Dt. Wetterdienst 194.- 93 S.; Offenbach.
- RÖNSCH, H. (1990): Tau und Reif in Harzingerode.- Zeitschrift für Meteorologie 40: 197–204.
- SCHÖSS, H.-D. (1977): Die Bestimmung des Versiegelungsfaktors nach Meßtischblatt-Signaturen.- Wasser und Boden 5: 138–140.
- SCHROEDER, M., HAMELS, B.P. (1987): Vergleich zweier Methoden zur Simulation der Prozesse des Bodenwasserhaushalts, vornehmlich der Grundwasserneubildung.- DGM 31: 73–76.
- SCHROEDER, M., WYRWICH, D. (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung.- DGM 34: 12–16.
- SPONAGEL, H. (1980): Zur Bestimmung der realen Evapotranspiration landwirtschaftlicher Kulturpflanzen.- Geol. Jb. F9: 3–87; Hannover.
- VAN BAVEL, C.H.M. (1967): Changes in canopy resistance to water loss from alfalfa induced by soil water depletion.- Agric. Meteorol. 4: 165–176.
- VAN EIMERN, J., HÄCKEL, H. (1979): Wetter- und Klimakunde.- 391 S.; Stuttgart.
- WEGEHENKEL, M. (1995): Modellierung des Wasserhaushaltes von landwirtschaftlichen Nutzflächen mit unterschiedlich komplexen Modellansätzen.- DGM 39: 58–68.
- WOHLRAB, B., ERNSTBERGER, H., MEUSER, A., SOKOLLEK, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt.- 352 S.; Hamburg, Berlin.

