

GIS-gestützte Modellierung der regionalen Grundwasserneubildung in Hessen

MARIO HERGESELL

Problemstellung und Veranlassung

Unter Grundwasserneubildung wird der Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser zum Grundwasser verstanden. Dieser hydrologische Prozess ist Teil des terrestrischen Wasserkreislaufs (Abb. 1). Im Hinblick auf die fortschreitende Nutzung von Grundwasserressourcen stellt die Grundwasserneubildung ein

besonders wichtiges Bilanzglied des Wasserhaushalts dar. Die Grundwasserneubildung ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig, wie z. B. Niederschlag, Verdunstung, Landnutzung, Bodenart, geologischer Aufbau des Untergrundes und Topographie. Sie ist daher ein sehr komplexer Prozess.

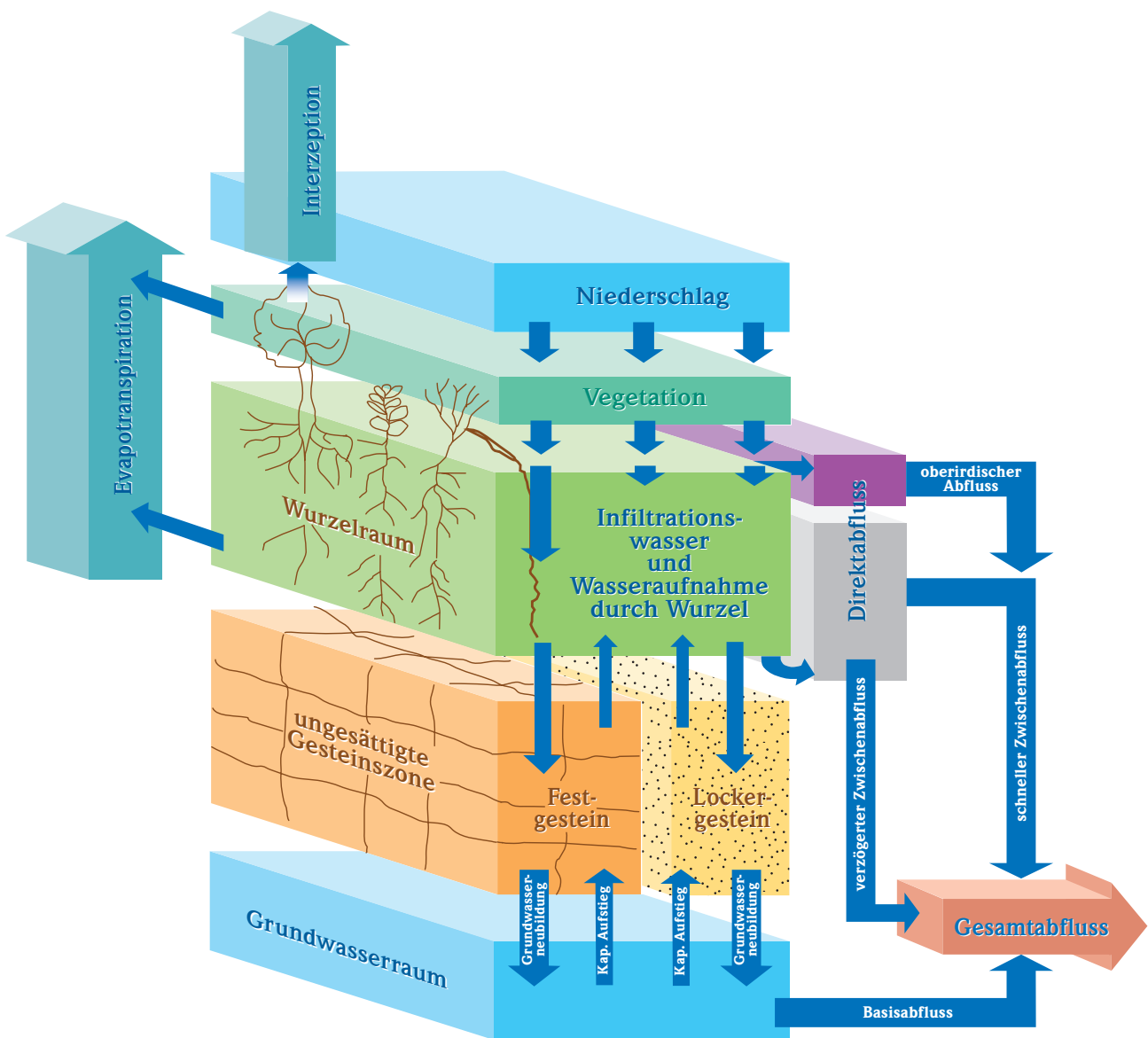


Abb. 1: Der terrestrische Wasserhaushalt (nach DÖRHÖFER et al., 2001).

Stellt man die erweiterte terrestrische Wasserhaushaltsgleichung um, lässt sich die Grundwasserneubildung vereinfacht durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$\text{GWN} = \text{N} - \text{ET} - \text{I} - \text{A}_d - \Delta\text{S}$$

mit

GWN	Grundwasserneubildung
N	Niederschlag
ET	Evapotranspiration
I	Interzeption
A_d	Direktabfluss
ΔS	Speicheränderung

Auf Grund des jahreszeitlichen Verlaufs der klimatischen Einflussgrößen, der daraus resultierenden Wachstumsperioden und der regional verschiedenen Gebietseigenschaften weist die Grundwasserneubildung eine sowohl zeitliche als auch räumliche Variabilität auf. In heterogenen Landschaftsräumen, wie z. B. in Hessen, kann es auf Grund einer differenzierten Topographie, unterschiedlicher Landnutzungsarten und einer Vielzahl verschiedener Bodenarten zu deutlichen regionalen Unterschieden in der Grundwasserneubildung kommen.

Die regionale Untersuchung der Grundwasserneubildung ist eine der zentralen Aufgaben in der Hydro(geo)logie. Sie dient vor allem zur Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen. Die Ermittlung von regional differenzierten Schätzwerten für die Grundwasserneubildung ist eine Voraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen, wie sie von der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) verlangt wird. So schreibt Artikel 4 der EU-WRRL vor, dass Grundwasservorkommen nicht übernutzt werden dürfen. Wird einem Grundwasserkörper mehr Wasser entnommen, als neu gebildet wird, kann es zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels kommen, was eine Schädigung grundwasserabhängiger Biotope und Feuchtgebiete, land- und forstwirtschaftliche Ertragsminderungen sowie Gebäudeschäden infolge ungleichmäßiger Setzung des Untergrundes nach sich ziehen kann.

Flächendetaillierte Kenntnisse über die Grundwasserneubildung werden auch für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials des Grundwassers durch den Eintrag von Schadstoffen, wie z. B. durch die Nitratauswaschung, benötigt.

Direkte Messungen der Grundwasserneubildung sind nur mit Lysimetern möglich, die für großräumige Untersuchungen nicht in Frage kommen. Gegenwärtig betreibt das HLUG 12 Lysimeterstationen in Hessen. Diese geringe Anzahl von Messpunkten kann nicht ohne weiteres auf die Gesamtfläche Hessens übertragen werden.

In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche hydrologische Methoden und Modelle entwickelt, durch die Schätzwerte der Grundwasserneubildung indirekt berechnet werden können (Arbeitskreis Grundwasserneubildung, 1977; WYCISK et al., 1999; SANFORD, 2002; SCANLON et al., 2002). Die Eingangsparameter dieser Modelle, deren gemeinsame Basis die Wasserhaushaltsgleichung ist, liegen im Gegensatz zu den punktuellen Lysimeterdaten häufig flächenhaft vor. Die zahlreichen Modelle unterscheiden sich hinsichtlich der Differenzierung der einzelnen berücksichtigten Prozesse und der zeitlichen und räumlichen Auflösung. Für großräumige Untersuchungen kommen häufig nur einfache Modelle in Frage, die auf einem aus Feldbeobachtungen abgeleiteten empirischen Zusammenhang beruhen und nur wenige Eingangsparameter benötigen. Komplexe physikalische Modelle, die die für die Grundwasserneubildung relevanten Teilprozesse mathematisch beschreiben, erfordern eine Vielzahl von Eingangsdaten, die für große Einzugsgebiete in der Regel nicht flächendeckend vorhanden sind.

Für die räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserneubildung werden hydro(geo)logische Modelle zunehmend mit Geographischen Informationssystemen (GIS) gekoppelt. Erst durch die Funktionalitäten von GIS ist eine effektive räumliche Diskretisierung und die Integration verschiedener raumbezogener Daten möglich.

Der Inhalt dieses Beitrags basiert auf der Abschlussarbeit eines Master-Projektes an der Manchester Metropolitan University (HERGESELL, 2002). Die Ergebnisse dieses Projektes dienen als Grundlage für eine im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) geplante Weiterentwicklung des Verfahrens. Das HLUG unterstützte freundlicherweise die Realisierung des Projektes durch die Bereitstellung der benötigten Daten und eines GIS-Arbeitsplatzes sowie durch fachliche Diskussionen und Anregungen.

Modellkonzept

Das zur Berechnung der Grundwasserneubildung (eigentlich streng genommen der Sickerwasserbildung) in Hessen angewendete Modell basiert auf einem von GROSSMANN (1995, 1997, 1998, 2001) beschriebenen empirischen Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. Das Verfahren wurde in exemplarisch untersuchten Einzugsgebieten auf der Basis von Abfluss- und Lysimetermessungen entwickelt und berechnet die Grundwasserneubildung aus Niederschlag durch die Bilanzierung des Wasserhaushalts in der Biosphäre und der Pedosphäre.

Für die Durchführung des Projektes wurde das Modell an die vorhandene Datenbasis angepasst und um einige Berechnungsschritte erweitert. Das Modell rechnet in Monatsschritten (t) und berücksichtigt acht Landnutzungsclassen, pflanzenspezifische Evapotranspiration ($ET_{pfl(t)}$), Interzeption ($I_{(t)}$), Direktabfluss ($A_{d(t)}$), kapillaren Aufstieg ($A_{k(t)}$) und durch Bebauung bedingte Versiegelung (V) (Abb. 2).

Die Eingangsdaten für das Modell sind in Tab. 1 aufgeführt. Als klimatische Eingangsparameter gehen Niederschlag ($N_{(t)}$) und potenzielle Evapotranspiration nach Haude ($ET_{pot(t)}$) als Monatssummen in das Modell ein. Im Rahmen dieses Projekts wurden langjährig gemittelte Monatswerte der Referenzperiode 1971–2000 verwendet. Als bodenkundliche Eingangsgröße wird der maximal pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (nW_{max}) benötigt. Für die Berechnung des Direktabflusses wird die Reliefenergie (RE) gebraucht, die von einem digitalen Höhenmodell (DHM) abgeleitet werden kann.

Tab. 1: Modell-Eingangsdaten

Kategorie	Parameter
Klimadaten	Niederschlag (Monatssummen) potenzielle Evapotranspiration (Monatssummen)
Bodendaten	Bodeneinheiten, hydromorphe Böden, maximal pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt
Landnutzung	8 Nutzungsklassen: Siedlung, Ackerland, Grünland, Laubwald, Nadelwald, Mischwald, Seen, Flüsse
Topographische Daten	Reliefenergie

Zu Beginn der Modellrechnung wird davon ausgegangen, dass der aktuell nutzbare Bodenwasserspeicher

($nW_{a(t)}$) im Winter vollständig aufgefüllt ist und somit dem maximal pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt (nW_{max}) entspricht. Im Folgenden wird für jeden Monat die Bodenwasserbilanz ($BIL_{(t)}$) unter Berücksichtigung des Füllstandes des Bodenwasserspeichers des Vormonats ($nW_{a(t-1)}$) berechnet. Grundwasserneubildung tritt im Modell nur bei einem Wasserüberschuss ($\dot{U}W_{(t)}$) ein, wenn die aktuell für Pflanzen verfügbare Wassermenge den maximal nutzbaren Bodenwassergehalt überschreitet.

In Abhängigkeit von der Landnutzungsclassen bzw. der Vegetation wird mittels Haude-Faktoren ($ET_{fakt(t)}$) für jeden Monat die pflanzenspezifische Evapotranspiration ($ET_{pfl(t)}$) berechnet, wodurch den pflanzenspezifischen Wachstumsphasen Rechnung getragen wird. Unterschreitet der Bodenwassergehalt einen bestimmten Schwellenwassergehalt, wird die pflanzenspezifische Evapotranspiration ($ET_{pfl(t)}$) reduziert, wodurch man die tatsächliche Evapotranspiration ($ET_{a(t)}$) erhält. Wird der Schwellenwert nicht unterschritten, entspricht die pflanzenspezifische Evapotranspiration der tatsächlichen Evapotranspiration.

Die Interzeptionsverdunstung wird im Modell für drei Waldkategorien unter Verwendung von monatsbezogenen Faktoren ($I_{fakt(t)}$) als prozentualer Anteil am Niederschlag berechnet.

Für die Berechnung des kapillaren Aufstiegs wird ein vereinfachter Ansatz gewählt. Da hessenweit keine Daten für Grundwasserflurabstände vorliegen, wird zur Abgrenzung der Zonen mit kapillarem Aufstieg zwischen grundwassernahen (hydromorphen) und grundwasserfernen (terrestrischen) Böden unterschieden. Kommt es in den Sommermonaten zu einem Defizit im Bodenwasserspeicher, wird im Modell für alle hydromorphen Böden vollwirksamer kapillarer Aufstieg berechnet, wodurch das Defizit vollständig ausgeglichen wird. Da durch kapillaren Aufstieg dem Untergrund Grundwasser entzogen wird, entspricht dies im Modell negativen Werten für die Grundwasserneubildung.

Der Direktabfluss wird als Funktion der Reliefenergie berechnet. Die Grundwasserneubildung ergibt sich dann aus der Differenz zwischen Überschusswasser ($\dot{U}W_{(t)}$) und Direktabfluss. Für hydromorphe

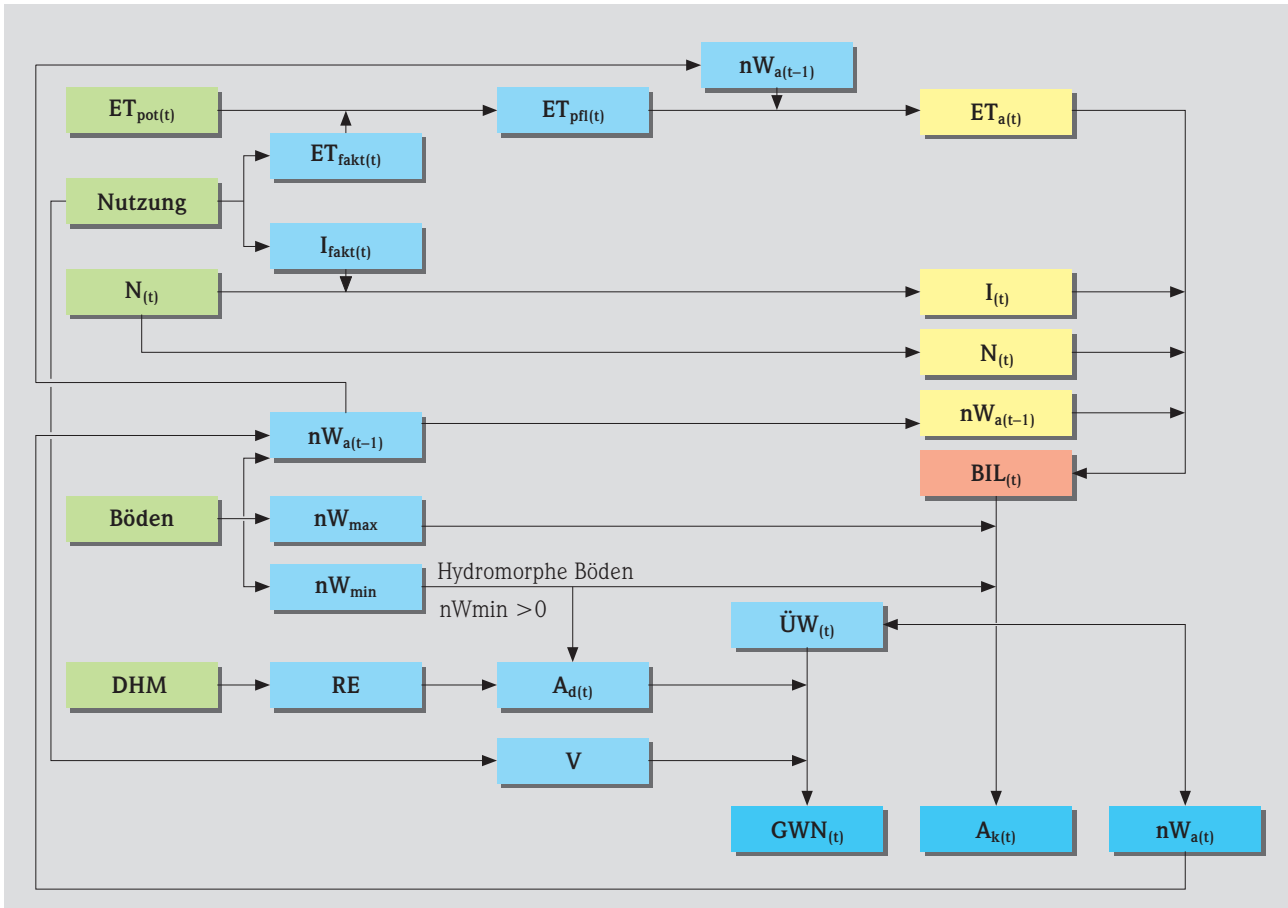


Abb. 2: Flussdiagramm des Modells.

Böden wird generell ein Direktabflussanteil in Höhe von 60 % des Überschusswassers angesetzt. In Abb. 2 ist der schematische Ablauf des beschriebenen Modells illustriert. Aus den Monatswerten der Grundwasserneubildung ($GWN_{(t)}$) wird schließlich die Jahressumme der Grundwasserneubildung berechnet.

Um das Modell räumlich differenziert auf die Gesamtfläche Hessens anzuwenden, wurde es mit dem GIS ArcInfo gekoppelt. Unter Verwendung des GRID-Moduls von ArcInfo und der Skriptsprache Arc Macro Language (AML) wurde ein Raster-

basierter Modellansatz realisiert. Bei einem Rasterbasierten Modell werden alle Berechnungsschritte für jede einzelne Rasterzelle separat durchgeführt. Um das Modell anwenden zu können, müssen alle erforderlichen Eingangsdaten in Form von Rasterdaten (Grids) mit einer einheitlichen Auflösung und gleicher Ausdehnung zur Verfügung stehen. Für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Modellierung wurden insgesamt 29 Grids als Eingabedaten verwendet. Als gemeinsame Rasterweite wurde 100 m gewählt. Das Grundraster von Hessen wird aus 2 518 Zeilen und 1 744 Reihen gebildet und beinhaltet somit fast 4,4 Mio. Rasterzellen.

Ergebnisse

In Abb. 3 sind die vom Modell für Hessen berechneten mittleren Monatssummen der Grundwasserneubildung und anderer Wasserhaushaltskompo-

nenten dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass Grundwasserneubildung überwiegend in den Wintermonaten (Oktober bis März) stattfindet. Die

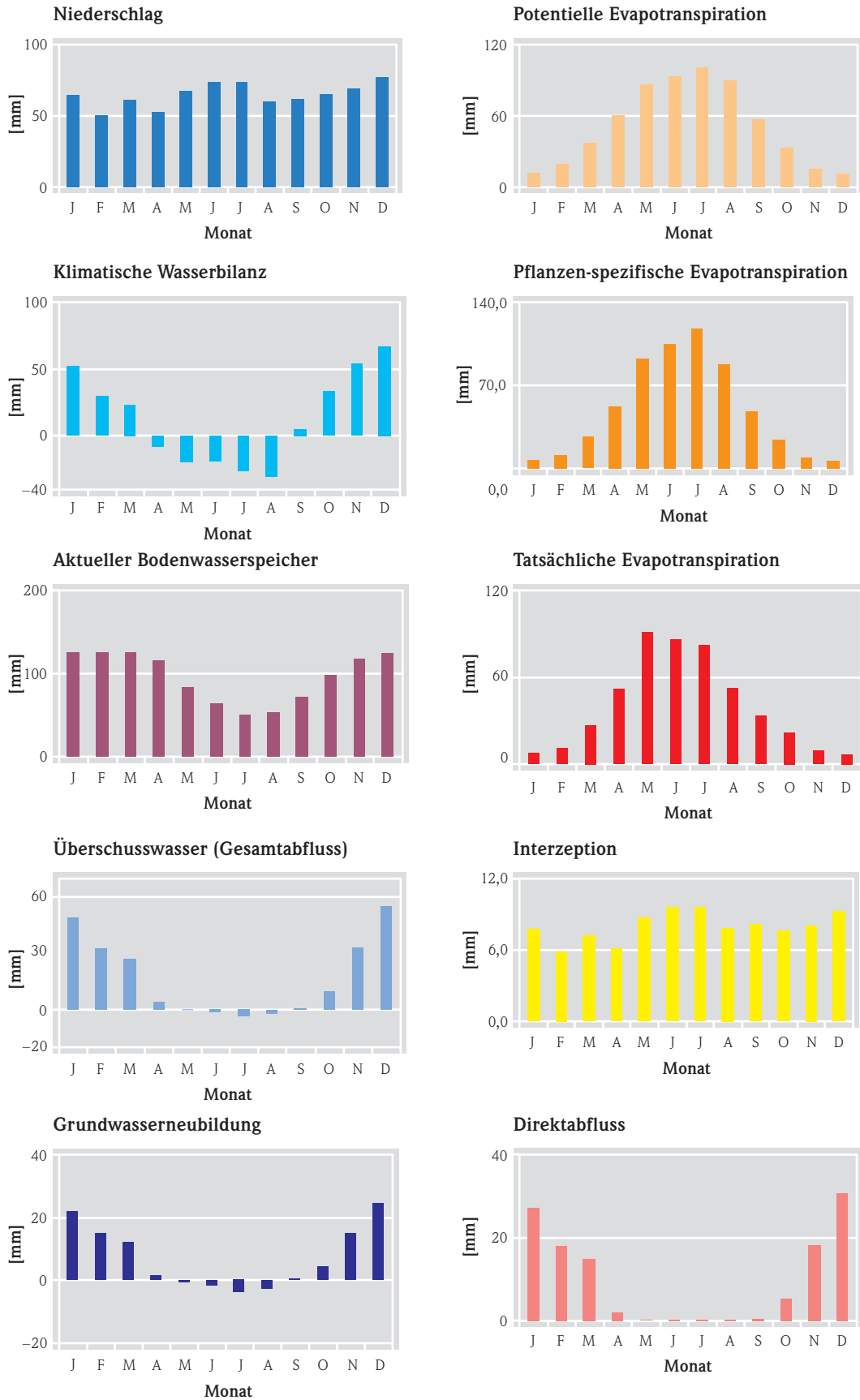


Abb. 3: Jahresgang der Grundwasserneubildung und anderer Wasserhaushaltsgrößen.

negativen Werte für Grundwasserneubildung in den Sommermonaten werden durch kapillaren Aufstieg hervorgerufen bzw. durch eine Verdunstung, die höher ist als der Niederschlag.

Die Ergebnisse in Abb. 3 stellen monatliche Durchschnittswerte für die gesamte Fläche Hessens dar. Die räumlich differenzierten Werte können jedoch lokal sehr unterschiedlich ausfallen, wie in Abb. 4 für die Grundwasserneubildung deutlich zu sehen ist. Nur in den Hochlagen der Mittelgebirge findet

fast über das ganze Jahr hinweg Grundwasserneubildung statt. In den Monaten Mai bis August wird ansonsten nahezu kein Grundwasser neu gebildet. Gut erkennbar ist das zeitlich auf die Sommermonate beschränkte Auftreten einer negativen Grundwasserneubildung, die durch die roten Flächen repräsentiert wird.

Die durch das Modell berechneten durchschnittlichen Jahressummen der verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen sind in Abb. 5 dargestellt. Die mittlere

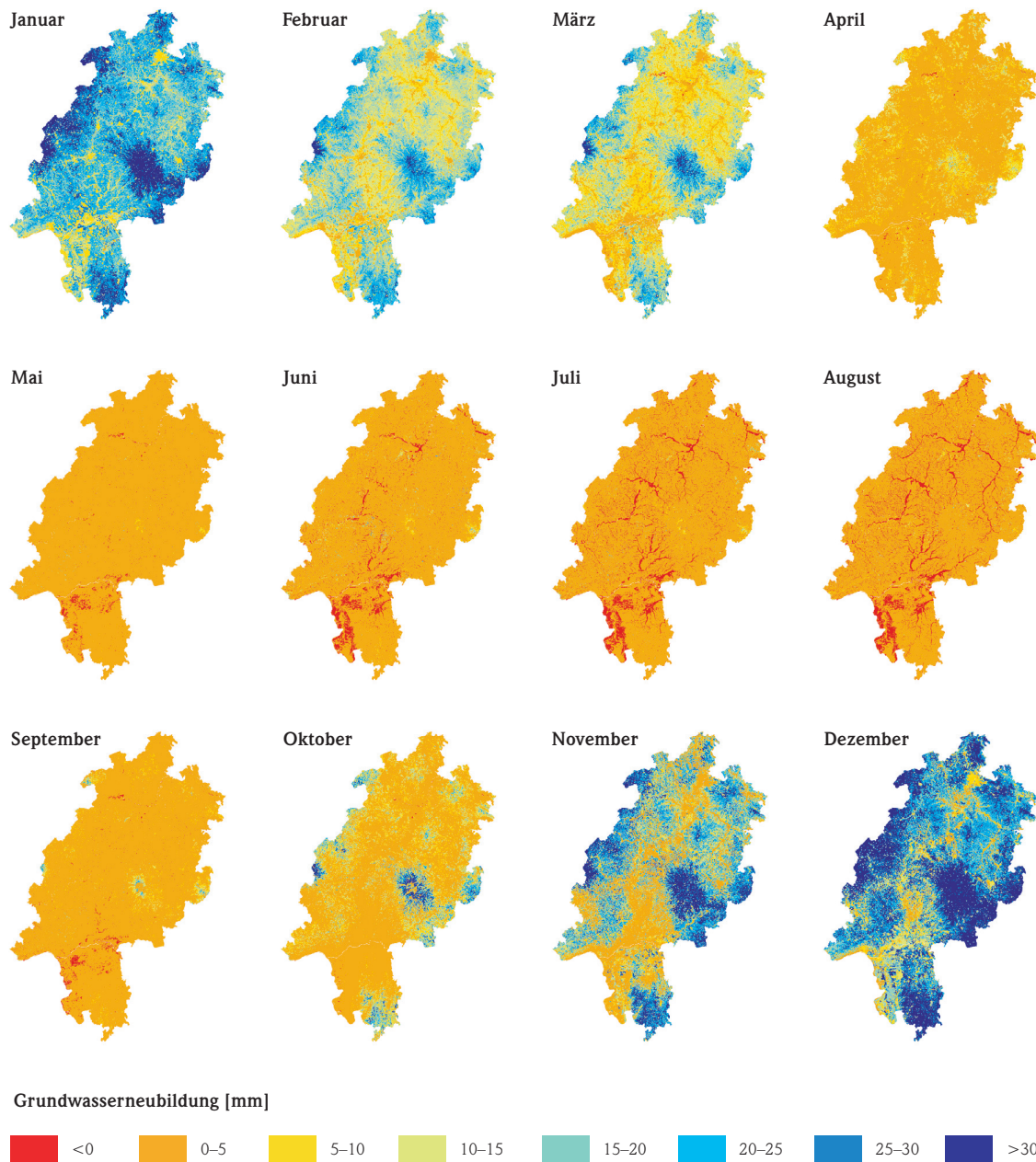
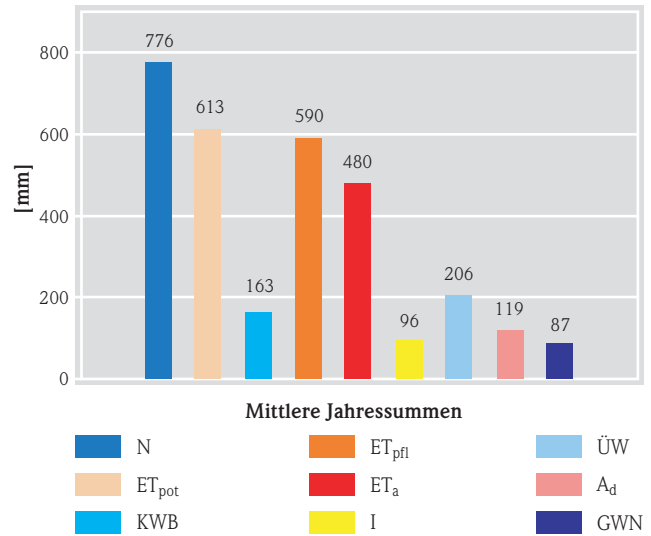


Abb. 4: Grundwasserneubildung (Monatssummen).

jährliche Grundwasserneubildung für die Referenzperiode 1971–2000 beträgt 87 mm.

Die regionale Verteilung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung ist in Abb. 6 zu sehen. Die Validierung der Modellergebnisse wurde an Hand von Lysimeterdaten, Literaturwerten und den Ergebnissen einer für das Hessische Ried bereits durchgeführten Grundwassermodellierung vollzogen. Der direkte Vergleich der verschiedenen Ergebnisse erwies sich jedoch auf Grund zu unterschiedlicher Randbedingungen als schwierig.

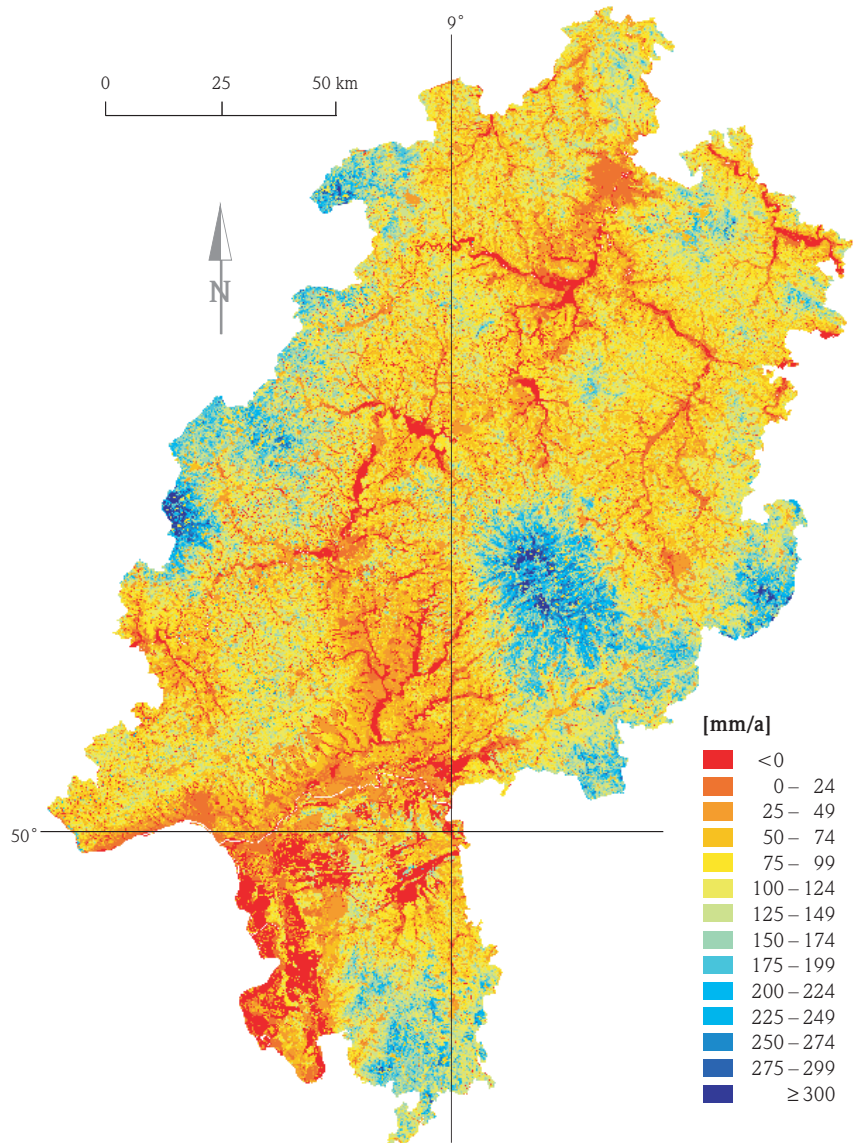
Abb. 5: Jahressummen der Grundwasserneubildung und anderer Wasserhaushaltskomponenten.



Ausblick

Es ist beabsichtigt, das hier beschriebene Modell im HLUG weiterzuentwickeln. Dabei soll das Modell mit weiteren für Hessen vorliegenden Daten abgeglichen und die Modellierung einiger Teilprozesse besser an die Gebietseigenschaften Hessens angepasst werden. So sollten z. B. für die Berechnung des Direktabflusses neben der Reliefenergie auch die Landnutzung und die Bodenarten berücksichtigt werden. Auch die Berechnung des kapillaren Aufstiegs sollte differenzierter erfolgen, da mit dem jetzigen Modellansatz dieser Prozess überschätzt wird. Die Validierung der Modellergebnisse soll unter Verwendung von Abflussmessungen erfolgen. Mit dem weiterentwickelten Modell lassen sich später Sensibilitätsanalysen durchführen und Szenarien berechnen, um z. B. die Auswirkungen von Änderungen der Landnutzung oder des Klimas vorherzusagen zu können.

Abb. 6: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (1971-2000).



Literatur

- Arbeitskreis Grundwasserneubildung FH-DGG (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. Geol. Jb., C 19: 3–98
- DÖRHÖFER, G., KUNKEL, R., TETZLAFF, B., WENDLAND, F. (2001): Der natürliche Grundwasserhaushalt in Niedersachsen. In: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung – NLFb (Hrsg.): Aufbruch nach Europa, Hydrogeologie vor neuen Aufgaben. Arbeitshefte Wasser 1: 109–167
- GROSSMANN, J. (1995): Fachliche Berichte HWW 1, Hamburger Wasserwerke GmbH, 60 S.
- GROSSMANN, J. (1997): Vergleich von Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung für große Einzugsgebiete. gfw-Wasser/Abwasser 138: 296–303
- GROSSMANN, J. (1998): Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für große Einzugsgebiete. gfw-Wasser/Abwasser 139: 14–23
- GROSSMANN, J. (2001): Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag, Beschreibung eines Verfahrens. Dokumentation der Basisdaten und Parameter; unveröffentlicht, Hamburger Wasserwerke GmbH, 33 S.
- HERGESELL, M. (2002): GIS-based modelling of regional groundwater recharge in Hesse, Germany; unveröffentlicht, Manchester Metropolitan University, 126 S.
- SANFORD, W. (2002): Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeol J 10: 110–120
- SCANLON, B. R., HEALY, R. W., COOK, P. G. (2002): Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeol J 10: 18–39
- WYCISK, .P, HARTMANN, E., MEYER-WINDEL, S. (1999) Grundwasserneubildung – Vergleichende Darstellung von Berechnungsmethoden zur Grundwasserneubildung. Literaturstudie im Auftrag der BGR. Inst. Geol. Wiss., FG Umweltgeologie, Martin-Luther-Universität Halle, 89 S.