

Thomas Gudera und Andreas Morhard

Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW

High-resolution modelling of soil water balance and groundwater recharge using GWN-BW

Für zahlreiche Fragestellungen aus Ökologie und Wasserwirtschaft sind Kenntnisse über die räumliche und zeitliche Verteilung von Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts, der Sickerwasserbildung und flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag von Bedeutung. In Süddeutschland kommt für die hochaufgelöste Beschreibung dieser Bilanzgrößen im Zusammenhang mit Routineaufgaben der Landesbehörden, aber auch bei Untersuchungen zu Folgen des Klimawandels, seit einigen Jahren das Modell GWN-BW zum Einsatz. Durch den flächenhaft über Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen hinweg erfolgenden Einsatz ist eine für alle Naturräume Süddeutschlands konsistente Prozessbeschreibung gegeben, welche die Validierung und Analyse verbleibender Modellunsicherheiten erleichtert. Der Artikel beschreibt das Bodenwasserhaushaltsmodell und illustriert seine aktuellen und künftigen Einsatzmöglichkeiten anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele.

Schlagwörter: Bodenwasserhaushalt, Grundwasserdargebot, Grundwassermodelle, Grundwasserneubildung, GWN-BW, Sickerwasserrate

Many issues in the fields of ecology and water management require knowledge of the spatial and temporal distribution of soil water balance, infiltration and groundwater recharge from precipitation. In Southern Germany, the GWN-BW model has been used for some years, to calculate these balance quantities for routine tasks of the public authorities, as well as for studies on climate change impacts. By using GWN-BW all over Baden-Wuerttemberg, Bavaria, Rhineland-Palatinate and Hesse, a consistent process description has been achieved for all natural areas of Southern Germany. Thus, validation and analysis of remaining model uncertainties is facilitated. The article describes the soil-water balance model and illustrates its current and future fields of application using selected application examples.

Keywords: Groundwater models, groundwater recharge, groundwater resources, GWN-BW, percolate water, soil water balance

1 Einleitung

Unter den Bilanzgrößen des Wasserhaushalts kommt der flächenhaften Grundwasserneubildung eine große Bedeutung zu. So beruht die Wasserversorgung in Baden-Württemberg zum überwiegenden Teil auf der Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen. Änderungen der Grundwasserneubildungsrate können damit direkte Auswirkungen auf die Grundwasservorkommen, die Versorgungssicherheit und die Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung haben. Im Jahr 2010 gab es insgesamt 1.334 öffentliche Wasserversorger mit Sitz in Baden-Württemberg. Rund zwei Drittel dieser Unternehmen haben auch selbst Wasser gewonnen (STALA 2012). Damit bewirtschaften etwa 900 Wasserversorgungsunternehmen ihr eigenes Einzugsgebiet und sind entweder auf die lokale Neubildung aus dem Niederschlag als entscheidende Zuflusskomponente des Grundwasservorkommens angewiesen oder auf die ebenfalls aus flächenhafter Grundwasserneubildung gespeisten Randzuströme aus angrenzenden Gebieten. Berechnungen und Abschätzungen der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag sind daher von großer Bedeutung und wurden in Baden-Württemberg in den vergangenen rund 40 Jahren mit verschiedenen Methoden und auf Basis unterschiedlicher Datengrundlagen angestellt.

Zu Beginn des Jahres 1975 wurde von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg ein erster Bericht zur Grundwasserneubildung (LFU 1975a) fertiggestellt, mit welchem über die zum Jahresende 1963 aufgenommenen Messungen der Sickerwasserrate mit Lysimetern an einigen Standorten im Oberrhein-gebiet berichtet wurde. Dabei wurde durch lineare Regression ein Zusammenhang zwischen Niederschlagshöhe und gemessener

sener sowie nach der Methode von HAUDE (1955) und RENGGER (1974) berechneter Sickerwasserrate hergestellt. Ende des Jahres 1975 wurde ein zweiter Bericht zur Grundwasserneubildung (LFU 1975b) fertiggestellt, mit dem Richtwerte für die Grundwasserneubildung außerhalb der Oberrheinebene ermittelt und die standortbezogenen Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Sickerwasserrate in der Oberrheinebene in die Fläche übertragen wurden.

Eine erste landesweite Auswertung zur vieljährig mittleren Grundwasserneubildung wurde mit der Karte „Grundwasserneubildung Baden-Württemberg (berechnet nach Wundt)“ im Jahre 1990 bereitgestellt. Grundlage waren hierbei die Abflusszeitreihen gewässerkundlicher Pegel des Landes Baden-Württemberg. Bei dem Verfahren nach Wundt wurde durch das Mittel der monatlichen Niedrigabflüsse von etwa 30-jährigen Zeitreihen bis 1988 der durchschnittliche Grundwasserabfluss bestimmt, welcher wiederum der durchschnittlichen Grundwasserneubildungsrate im Einzugsgebiet des Pegels gleichgesetzt wurde.

Ab dem Jahr 2001 wurde eine Vielzahl von Berechnungen zur Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag in unterschiedlichsten Betrachtungsmaßstäben mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW durchgeführt. Die Ergebnisse dienten in zahlreichen Anwendungsfällen als obere Randbedingung für großräumige numerische Grundwassermodelle. Weitere Projektbearbeitungen erfolgten im Auftrag einzelner Wasserversorger für deren Trinkwassergewinnungsgebiete, wobei die Simulationsergebnisse auch als Grundlage für Betrachtungen zum Nitratauswaschungspotenzial dienten (z.B. MORHARD 2006, MORHARD 2014). Seit 2010 werden im Rahmen

der jährlichen Berichterstattung zur Entwicklung der Grundwasserverhältnisse (LUBW 2010–2014) regelmäßig aktuelle landesweite Auswertungen zu Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung durchgeführt. Hierzu ist es erforderlich, den vorliegenden Bestand an meteorologischen Antriebsdaten zeitnah um das zurückliegende Kalenderjahr fortzuschreiben, zu prüfen und simulationsgerecht aufzubereiten.

GWN-BW wird seit einigen Jahren auch in den Nachbarbundesländern Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen für flächendetaillierte Berechnungen der Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag eingesetzt, insbesondere im Zusammenhang mit Fragestellungen zum Klimawandel und dessen möglichen Auswirkungen auf das Grundwasserdargebot (KLIWA 2012). Im vorliegenden Beitrag werden die Struktur und Methodik von GWN-BW, erforderliche Datengrundlagen und ausgewählte Anwendungen in Baden-Württemberg vorgestellt.

2 Modellkonzeption

GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. In den einzelnen Teilmodulen (Abb. 1) kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Anwendung. Die Simulation erfolgt in zeitlich hochaufgelöster Form auf Basis von Tagesschritten, wobei modellinterne Rechenschritte in Zusammenhang mit Strahlungsbilanz und Sickerwasserbildung teils auch auf Stundenbasis abgearbeitet werden. Die räumliche Diskretisierung kann wahlweise durch beliebig aufgelöste Rasterdaten oder durch Vektorgeometrien erfolgen.

Die in Form von Stationswerten vorliegenden meteorologischen Eingangsdaten (Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Windstärke, alternativ auch Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit) können nach verschiedenen Verfahren auf die Fläche interpoliert werden. Alternativ ist eine Vorgabe extern regionalisierter Daten möglich. Gleiches gilt auch für den zur optionalen Abschätzung des kapil-

laren Aufstiegs benötigten Grundwasserstand, welcher wahlweise als zeitlich konstante Verteilung vorgegeben oder bei ausreichend dichtem Messnetz mit Hilfe des Interpolationsmoduls für jeden Einzeltag im Simulationszeitraum ausgehend von den an Grundwassermessstellen vorhandenen Zeitreihen auf die Fläche übertragen werden kann.

Im Strahlungsmodul wird unter Berücksichtigung topographischer und himmelsmechanischer Gegebenheiten das nutzbare Energiedargebot berechnet (ARMBRUSTER 2002). Im Schneemodul werden Schneedeckenaufbau und Schneeschmelze (Temperatur-Index-Verfahren) einschließlich der Speicherung und des Wiedergefrierens von flüssigen Anteilen simuliert (MORHARD 2009). Das ebenfalls in ARMBRUSTER (2002) ausführlich dokumentierte Interzeptionsmodul beschreibt die Interzeption von Niederschlagswasser in mehreren Schichten der Vegetationsdecke und auf versiegelten Flächen. Die Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher erfolgt entsprechend der bestandesinneren Variation der meteorologischen Größen aus jeder Vegetationsschicht mit unterschiedlicher Intensität. Im Transpirationsmodul werden mehrere Verfahren zur Berechnung der Pflanzenverdunstung angeboten, darunter insbesondere zwei auf dem Ansatz nach Penman-Monteith basierende Varianten.

$$\lambda \cdot E = \frac{\Delta \cdot (R_N - G) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{e_s(T) - e}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

- λ = latente Verdunstungsenthalpie des Wassers in J/kg
- E = Wasserdampffluss in $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Δ = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve in hPa/K
- R_N = Nettostrahlung in $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- G = Bodenwärmestrom in $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- ρ = Dichte der Luft in kg m^{-3}
- c_p = spezifische Wärme der Luft ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- $e_s(T)$ = Sättigungsdampfdruck bei Temperatur T in hPa
- e = aktueller Dampfdruck in hPa
- γ = Psychrometerkonstante in hPa/K
- r_a = aerodynamischer Widerstand in s/m
- r_c = Bestandeswiderstand in s/m

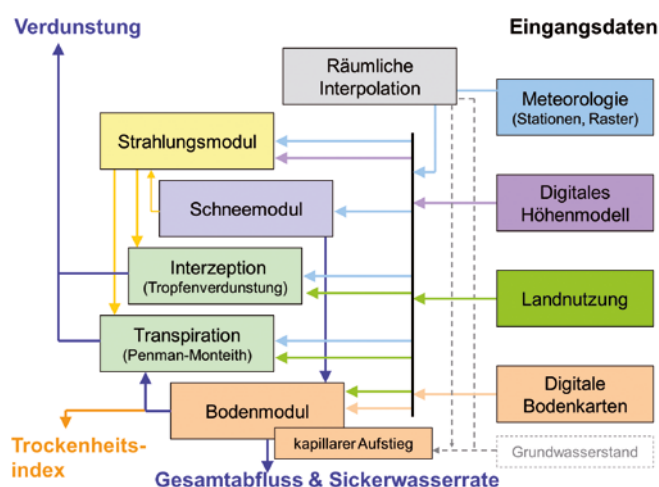


Abbildung 1
Schematische Darstellung des modularen Aufbaus des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und der benötigten Eingangsdaten.
Modular structure and input data required by the soil-water balance model.

Bei der Methode aus dem Verdunstungsmodell TRAIN (MENZEL 1999) wird der effektive Bestandeswiderstand in Abhängigkeit von Blattflächenindex, Bodenfeuchtedefizit und Lufttemperatur ermittelt. Der modelleigene Ansatz "Persephone" berücksichtigt die Einflüsse von Bedeckungsgrad (Pflanzen- bzw. Bodenverdunstung) und Bodenfeuchte in separaten Schritten, wobei sich die Parametrisierung von landnutzungsabhängigen Parametern wie minimalem Bestandeswiderstand oder Blattflächenindex an phänologischen Entwicklungsstadien orientiert, deren Eintrittszeitpunkte auch witterungsabhängig berechnet werden können (MORHARD 2009). Das Bodenmodul zur Simulation der Auffüllung (durch Niederschlags- und Schneeschmelzwasser) und Entleerung (durch Transpiration und Perkolation) des Bodenspeichers wurde dem Niederschlag-Abfluss-Modell HBV entlehnt (BENGTSOON 1997, vgl. auch KLIWA 2012). Aufgrund seines simplen konzeptionellen Charakters ist es auch für größere Untersuchungsräume einfach parametrisierbar, erlaubt aber gleichwohl eine Berücksichtigung der schon vor flächenhaftem Erreichen der Feldkapazität einsetzenden Sickerwasserbildung, welche ihre Ursache in erster Linie in der Heterogenität der Böden hat.

$$\frac{\text{Sick}}{\text{Inf}} = \left(\frac{\text{BWG}}{\text{nFKwe}} \right)^{\text{BETA}}$$

Sick = Sickerwasserbildung in mm
 Inf = Infiltrationsmenge in mm
 BWG = pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt in mm
 nFKwe = nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in mm
 BETA = von nFKwe abhängiger Bodenparameter

Dabei kann der Bodenparameter BETA mit Hilfe des von ARMBRUSTER (2002) durch Aneichung an Lysimeterstandorte in Baden-Württemberg gefundenen Zusammenhangs abgeleitet werden:

$$\text{BETA} = 1 + \frac{6}{1 + \left(\frac{\text{nFKwe}}{118.25} \right)^{-6.5}}$$

Für Flächen mit hohem Grundwasserstand kann der kapillare Aufstieg entsprechend den Angaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1996) abgeschätzt werden, wobei der Flurabstand als zeitlich konstanter Mittelwert vorgegeben oder bei ausreichend dichtem Messnetz für jeden Einzeltag aus beobachteten Zeitreihen regionalisiert werden kann.

In Gebieten mit vernachlässigbaren Anteilen schneller lateraler Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss unterhalb der Bodenoberfläche, d.h. alle Komponenten, die nicht lokal zu einer Auffüllung des Grundwasserspeichers beitragen), z.B. im Bereich der meist in Ebenen und Senken gelegenen Porengrundwasserleiter, entspricht die mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell (Abb. 1) berechnete Sickerwasserrate zugleich der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Demgegenüber ist zur Ermittlung der Grundwasserneubildung in Gebieten, in denen schnelle laterale Komponenten eine nennenswerte Rolle spielen (z.B. in den Mittelgebirgen bzw. im Bereich der meisten Festgesteinsgrundwasserleiter), eine nachgeschaltete Reduktion der Gesamtabflusshöhe (bei für langjährige Mittelwerte zulässiger Vernachlässigung der Speicheränderung: $Q_{\text{repc}} = N - V$) durch Multiplikation mit dem sog. Baseflow-Index BFI erforderlich (Abb. 2). Dieser wird durch den Quotienten aus Basis- und Gesamtabfluss gebildet, kann aus den Abflussganglinien von Oberflächengewässern abgeleitet werden und liegt für die süddeutschen Bundesländer in regionalisierter Form für jeweils die gesamte Landesfläche vor. Einschränkung sei darauf hingewiesen, dass die Anwendung des in KLIWA (2012) ausführlich beschriebenen BFI Konzepts für die entsprechenden Gebiete nur eine Bestimmung mehrjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildung erlaubt.

Die Kurzbezeichnung GWN-BW (Grundwasserneubildung-Bo-

denwasserhaushalt) beschreibt den gesamten Prozess, also die zeitlich hochaufgelöste Simulation des Bodenwasserhaushalts mit der daraus resultierenden Abflussbildung und die darauf basierende Ableitung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.

3 Modellparametrisierung und -betrieb

Ein Hauptaugenmerk bei der Implementierung der Software GWN-BW lag auf der Bereitstellung einer nach funktionalen wie anwendungstechnischen Gesichtspunkten auf den Einsatz in den vielfältigen operationellen Aufgabenbereichen von Landesbehörden ausgerichteten benutzerfreundlichen Desktop-Anwendung. In diesem Sinne wurden die Datenstrukturen konzipiert, Plausibilitätsprüfungen und Fehlerbehandlungsroutinen eingeführt und Zusatzwerkzeuge für das pre- und post-processing entwickelt. Darüber hinaus wurde der Programmcode soweit modularisiert, dass zur Beschreibung einzelner Teilprozesse mehrere Ansätze angeboten werden können, unter welchen das für die jeweilige Fragestellung geeignete Verfahren ausgewählt werden kann.

GWN-BW ist mit graphischen Benutzeroberflächen ausgestattet (Abb. 3), über welche die Modellsteuerung und die Konfiguration des Rechenlaufes erfolgen können. So stehen Editoren für die Vereinbarung der Eingangsdaten und des Simulationszeitraums, der zu erzeugenden Ergebnisdateien, aber auch zur Auswahl optional verwendbarer Module und zur Einstellung von Parametern für die Interpolation meteorologischer Eingangsdaten zur Verfügung. Durch Vorgabe einer Maske, der Koordinaten eines Rechteckes oder eines beliebigen Polygonzuges, kann der Anwender das bei einem Simulationslauf zu berücksichtigende Modellgebiet gegenüber dem Eingangsdatensatz beschränken. Die vollständige Problemdefinition mit sämtlichen über die Benutzeroberfläche vorgenommenen Einstellungen lässt sich in Form einer Initialisierungsdatei speichern, welche zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen werden kann. Derartige Initialisierungsdateien dienen zugleich der Dokumentation der gewählten Einstellungen und finden insbesondere bei einem Modellbetrieb im Batch-Modus, etwa bei Szenariosimulationen, Verwendung.

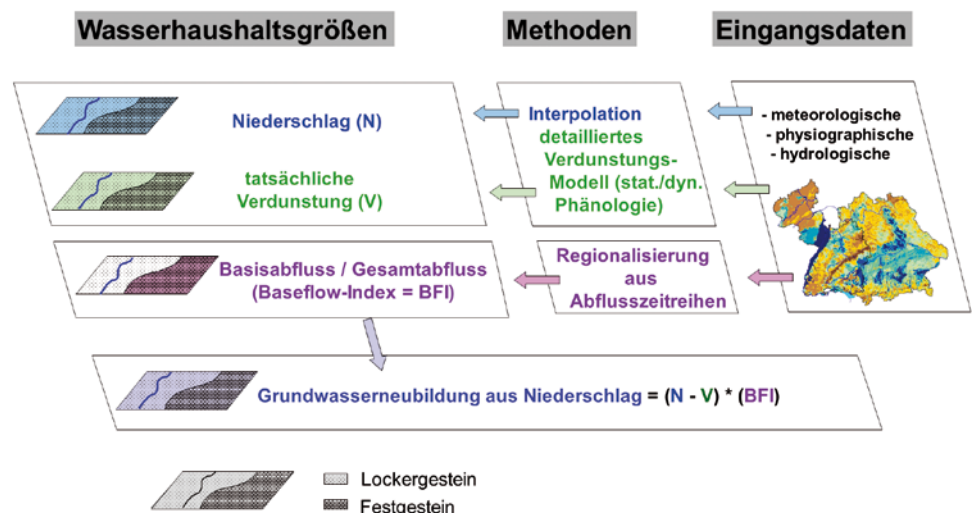


Abbildung 2

Grundkonzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag
Conceptual outline for calculation of groundwater recharge induced by precipitation

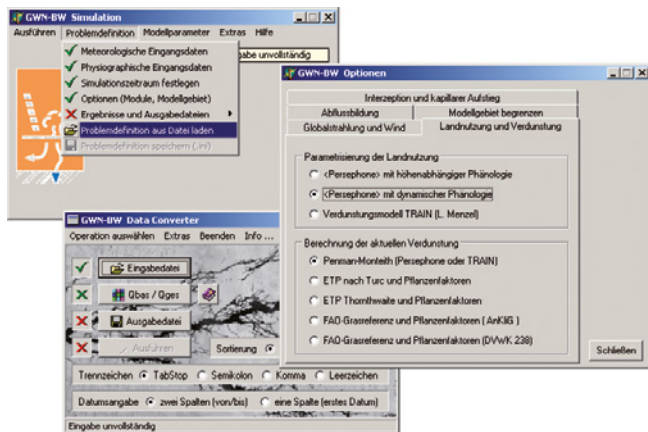


Abbildung 3

Graphische Benutzeroberfläche von GWN-BW
GWN-BW's graphical user interface

Einzelne Module (z.B. Abschattung durch Horizontüberhöhung, Abschätzung des kapillaren Aufstieges) können wahlweise zu- oder abgeschaltet werden, oder es stehen für eine bestimmte Funktionalität mehrere Varianten zur Auswahl. So wurde eine Reihe alternativer Methoden zur Berechnung der aktuellen Verdunstung implementiert. Die Parametrisierung landnutzungsabhängiger Vegetationseigenschaften kann nach MENZEL (1999) oder dem für die Simulation veränderter Klimabedingungen entwickelten modelleigenen Schema erfolgen, welches neben statisch-höhenabhängiger auch eine dynamisch-witterungsabhängige Beschreibung der Eintrittszeitpunkte phänologischer Entwicklungsphasen und davon abhängiger, für das Verdunstungsverhalten maßgeblicher Bestandeseigenschaften erlaubt (MORHARD 2009).

Umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten ergeben sich für die Übertragung der meteorologischen Eingangsdaten auf die Grundflächen, wobei sowohl eine räumliche Interpolation ausgehend von den an einzelnen Stationen aufgezeichneten Zeitreihen als auch die Verwendung vorab regionalisierter Verteilungen möglich ist. Dabei stehen verschiedene Verfahren zur Kombination von Distanzgewichten mit/ohne Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit und für die Auswahl der zu berücksichtigenden Nachbarstationen zur Wahl. Bei allen angebotenen Varianten handelt es sich um exakte (d.h. stationstreue) Interpolationsverfahren. Die Einstellungen für jeden Parameter können separat vorgenommen werden, so dass etwa die Lufttemperatur und die Windgeschwindigkeit ausgehend von Stationsdaten interpoliert, die Niederschläge dagegen aus Rasterdaten oder aus anderen bereits auf die Fläche übertragenen Produkten des Wetterdienstes übernommen werden können.

Die physiographischen Eingangsdaten können als Rasterdaten oder beliebig im Raum angeordnete Vektorflächen vorliegen, als Formate kommen Rasterdatensätze im ASCII Grid Format oder ASCII Dumps von Datenbanktabellen in Frage. Weiterhin wird zwischen einem für die Bearbeitung großräumiger Gebiete mittels Rasterdaten konzipierten Modus mit beliebig vielen Nutzungsanteilen je Grundfläche und einem solchen mit nur einer Nutzung je Grundfläche (oder Rasterzelle) unterschieden. In dem zuerst genannten muss beispielsweise einer 500 m Rasterzelle nicht eine „dominante“ Nutzung zugewiesen werden, sondern die Rasterzelle kann in 30 % Acker, 30 % Grünland und 40 %

Laubwald aufgeteilt sein. Für alle drei Anteile wird modellintern eine separate Simulation durchgeführt, aber nur die flächengewichteten Mittelwerte werden als Ergebnis ausgegeben. Während über die Benutzeroberfläche bislang nur eine zeitlich konstante Landnutzung vereinbart werden kann, wird modellintern auch eine (ggf. durch Anpassungen in der als Initialisierungsdatei gespeicherten Problemdefinition steuerbare) Verarbeitung be-

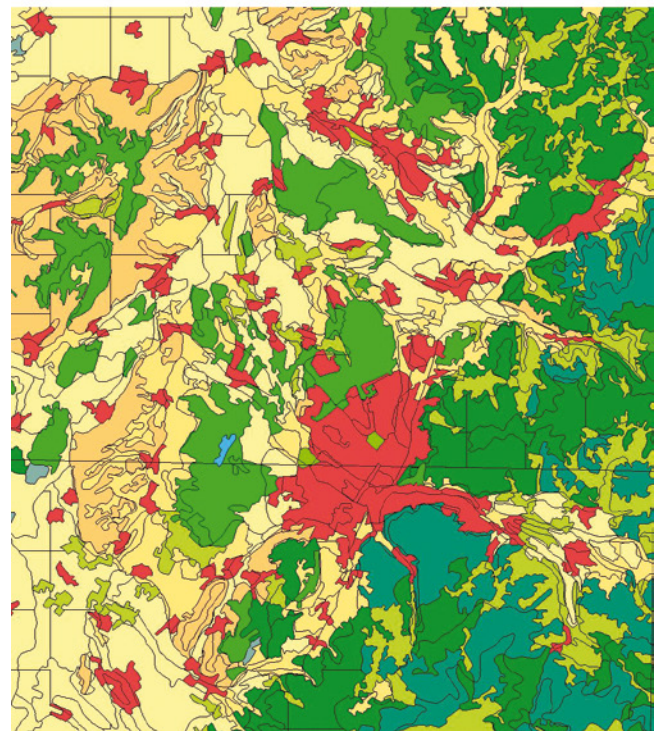
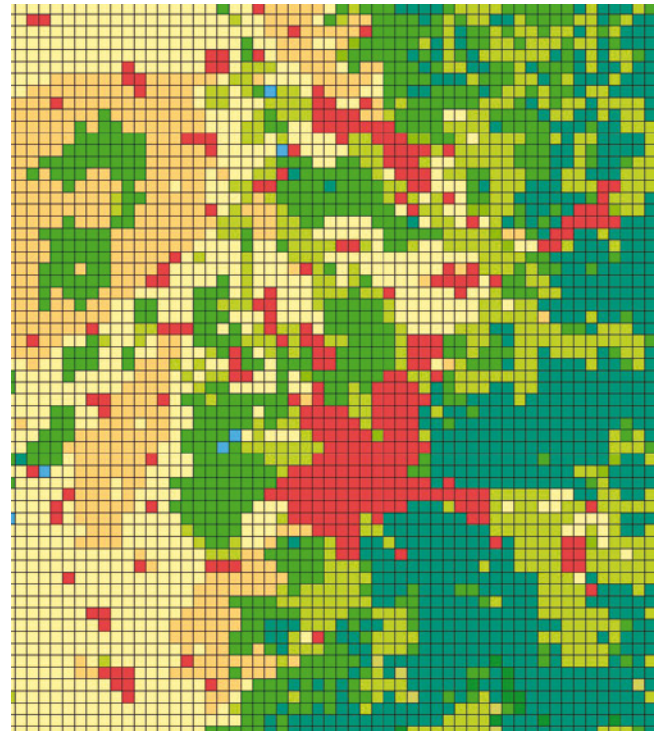


Abbildung 4

Physiographische Eingangsdaten als Rasterdaten oder Vektorgeometrien
Physiographic input data provided as regular grid or vector geometries

liebig vieler Zeitpunkte mit Nutzungsaufnahme unterstützt, um etwa die in Wasserschutzgebieten erfolgende Kartierung der auf Ackerflächen angebauten Feldfrüchte in Wert setzen zu können.

Neben der ausführbaren Programmdatei und einer Reihe vorkompilierter Bibliotheken (DLLs) umfasst die Anwendung GWN-BW sechs in Form von ASCII Dateien vorliegende Initialisierungsdateien. In diesen sind Parameter abgelegt, welche zwar nicht über die graphische Benutzeroberfläche verändert werden können, die für spezielle Anwendungen, Testläufe oder eine Feinkalibrierung aber grundsätzlich ohne Eingriffe in den Quellcode variierbar sein sollten. Zu diesen Parametern gehören etwa die Zeitschrittweite für das Strahlungsmodul, Kenngrößen bezüglich des Jahresganges der Trübung der Atmosphäre oder Koeffizienten, welche den Zusammenhang zwischen Sonnenscheindauer und Globalstrahlung beschreiben. Im Landnutzungskatalog können bei Bedarf neue Klassen definiert werden. In der zugehörigen Parameterdatei lassen sich zu bestimmten Entwicklungsstadien erreichte Pflanzeigenschaften und die zum Erreichen dieser Stadien benötigten Temperatursummen editieren oder auf lokale Verhältnisse anpassen.

4 Ergebnisausgabe

Modellergebnisse können unabhängig von der räumlichen Struktur der Eingangsdaten als ASCII Grid und/oder in Tabellenform ausgegeben werden. Für die zeitliche Aggregierung stehen Mittel- und Einzelwerte für Kalenderjahre, Kalendermonate und hydrologische Halbjahre zur Auswahl, des Weiteren der mittlere Jahresverlauf (Regime-Ganglinie) oder feste Zeitschrittweiten von N Tagen ab einem frei wählbaren Startdatum. Soweit für den jewei-

ligen Parameter sinnvoll, wird zwischen einer Ausgabe als mittlere Zustandsgröße bzw. Flussrate oder in Form des Summenwertes über den Zeitschritt unterschieden. Auch die Anzahl der auszugebenden Dezimalstellen kann vom Benutzer für jeden Parameter und jede zeitliche Aggregierung separat vorgegeben werden.

Zu den für eine Ergebnisausgabe verfügbaren Modellgrößen zählen neben den Interpolationsergebnissen der meteorologischen Eingangsdaten (Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Windstärke) die Simulationsergebnisse für die Sickerwassermenge unterhalb der durchwurzelten Bodenzone, aktuelle und potenzielle Verdunstung, Direktabfluss von versiegelten Flächen, Sättigung des Bodenwasserspeichers, Interzeption und Wasseräquivalent der Schneedecke. Weitere Größen, wie kapillarer Aufstieg oder zur Laufzeit auf die Fläche interpolierte Grundwasserstände, können bei Verwendung der entsprechenden Module hinzukommen.

5 Anwendungsbeispiele

5.1 Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg

Für den Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WABOA 2007) wurden auf Grundlage von Berechnungen mit GWN-BW mehrere Kartenthemen erstellt. Dazu zählen die mittlere jährliche tatsächliche Verdunstungshöhe, die mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag und der Trockenheitsindex, jeweils für die Normalperiode 1961–1990 (Abb. 5 u. 6). Der Trockenheitsindex ist definiert als Anzahl der Tage mit Unterschreitung einer 30 %igen Füllung des Bodenwasserspeichers bezogen auf die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum. Diese Karten stellen hochaggregierte Ergebnisse des landesweit im 500 m

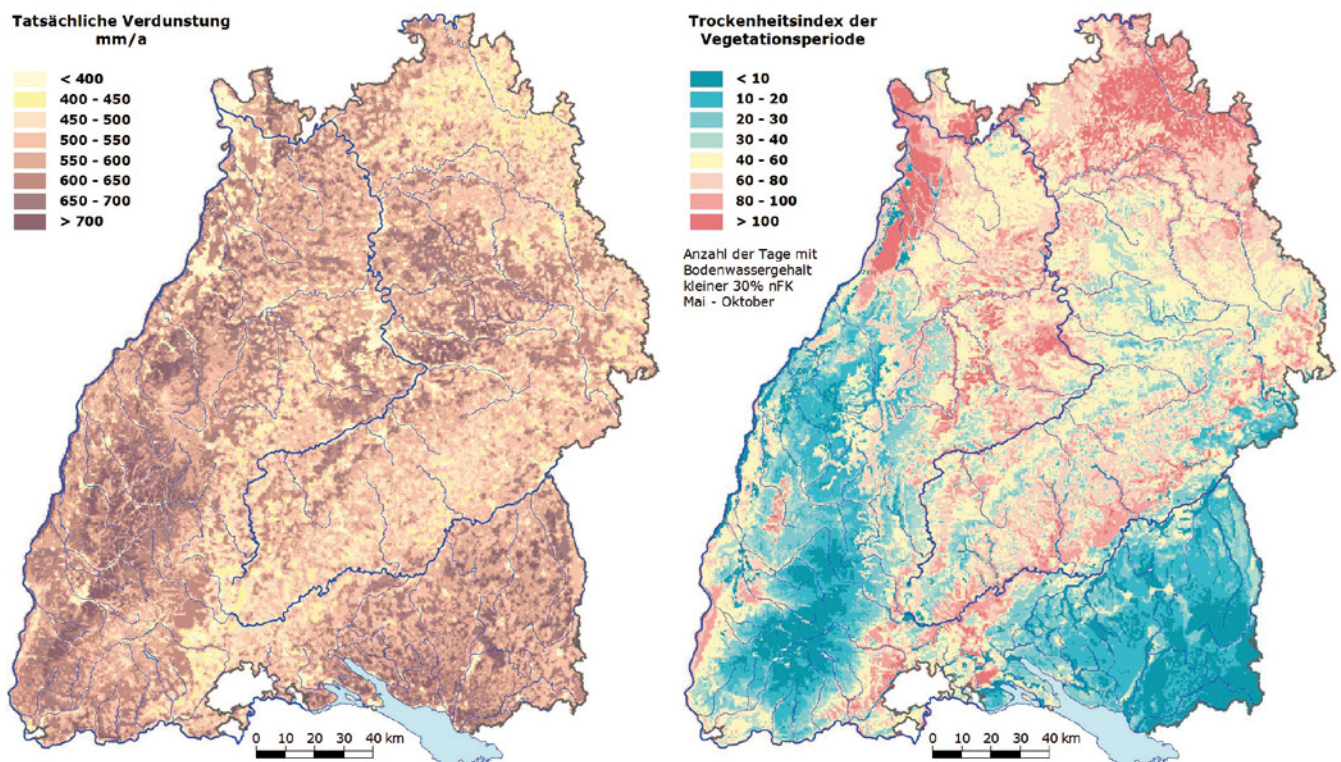


Abbildung 5

Mittlere tatsächliche Verdunstung und mittlerer Trockenheitsindex für die Zeitspanne 1961–1990 (Datenquelle WABOA)

Mean actual evapotranspiration and mean drought index 1961–1990

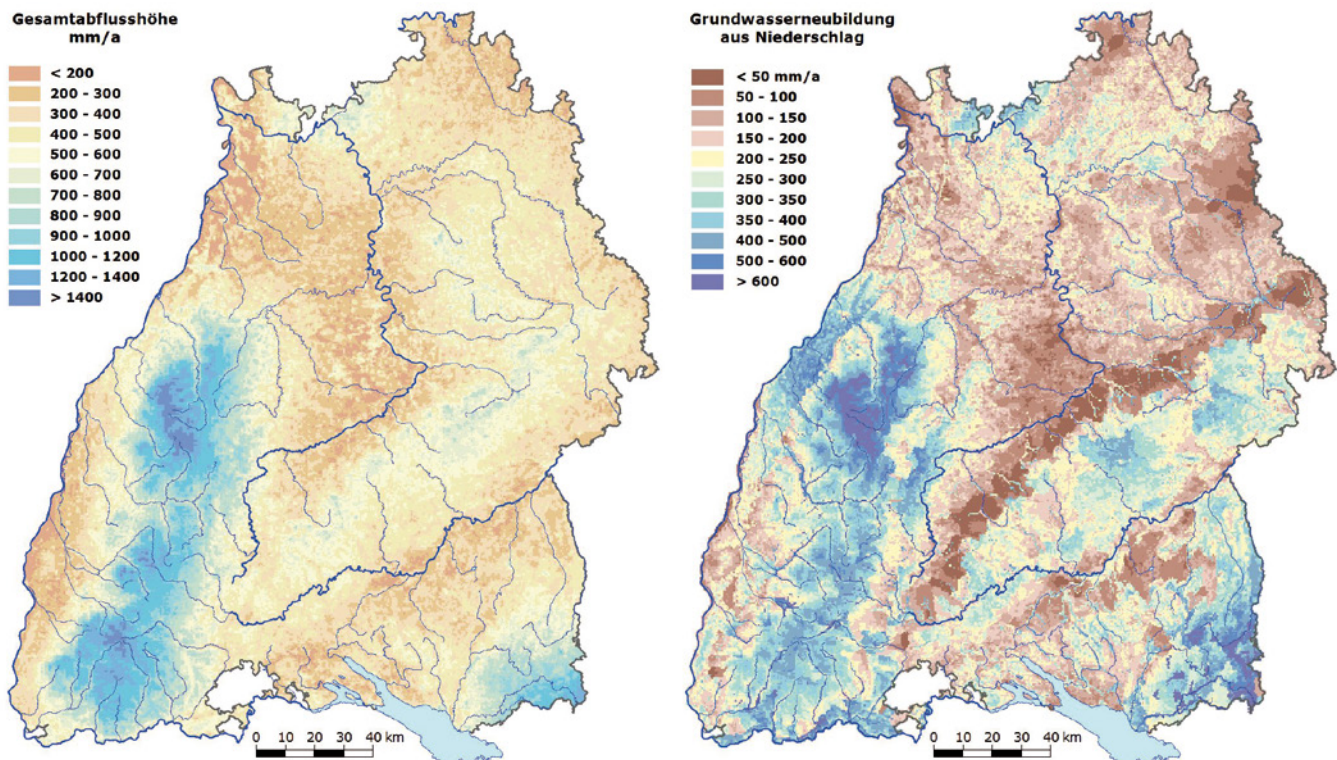


Abbildung 6

Mittlere Gesamtabflusshöhe und mittlere Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag für die Zeitspanne 1961–1990 (Datenquelle WABOA)
Mean values of total discharge and groundwater recharge induced by precipitation for the period 1961–1990

Raster auf Tageswertbasis modellierten Wasserhaushalts dar. Dabei wurde die langjährig mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Abb. 6) durch Multiplikation der berechneten mittleren jährlichen Sickerwasserbildung mit dem regionalisierten Quotient „Basisabfluss zu Gesamtabfluss“ abgeschätzt. Unter Annahme einer hinreichenden Stationarität dieses Quotienten lassen sich entsprechende landesweite Auswertungen auch für einzelne Dekaden erstellen.

5.2 Jährlicher Bericht des Grundwasserüberwachungsprogramms

Im jährlichen Bericht der LUBW über die Ergebnisse der Grundwasserbeprobung für das zurückliegende Jahr im Rahmen des Grundwasserüberwachungsprogramms (LUBW 2010–2014) wird auch auf die Niederschlags- und vor allem die regional unterschiedlichen Grundwasserneubildungsverhältnisse eingegangen. Hierzu werden zeitnah die erforderlichen Antriebsdaten beim Deutschen Wetterdienst (DWD) angefragt, modellgerecht aufbereitet und der landesweiten Simulation zugeführt. Damit ist eine aktuelle Beschreibung der regional differenzierten hydrometeorologischen Situation sowie ihrer Auswirkung auf Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung möglich. Durch Bezug auf eine 30-jährige Vergleichsperiode (1961–1990 und zuletzt 1981–2010) werden Unterschiede zum vieljährigen Mittel in der räumlichen Verteilung wie auch im innerjährlichen Verlauf sichtbar und können für Erklärungen zum mengenmäßigen wie auch qualitativen Zustand des Grundwassers im Berichtsjahr genutzt werden.

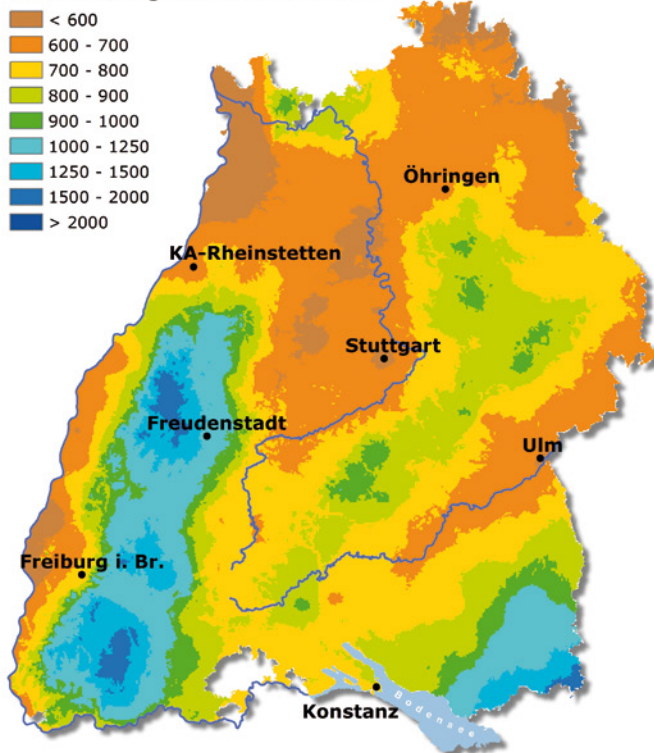
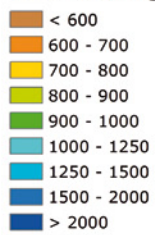
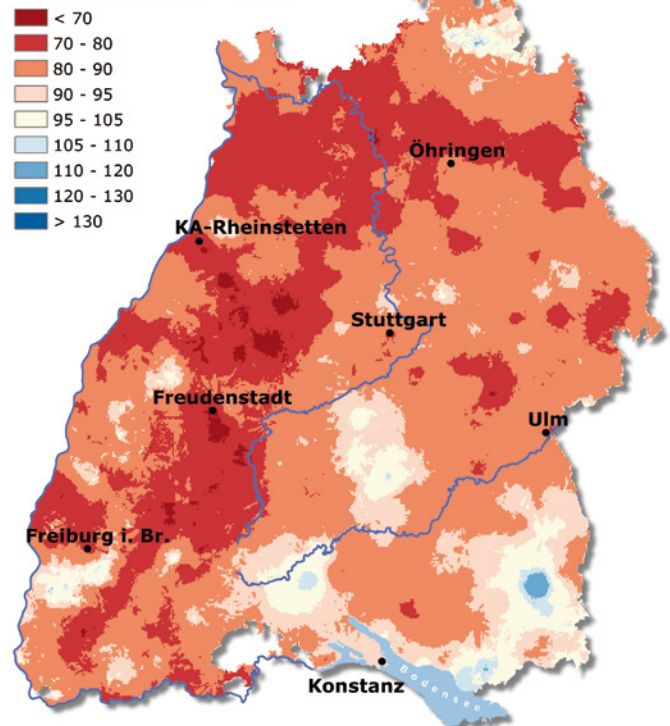
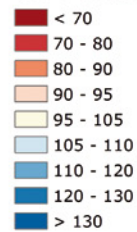
Im Folgenden werden anhand dieser Auswertungen exemplarisch die Verhältnisse für das Trockenjahr 2011 dargestellt. Im Mit-

tel fielen in Baden-Württemberg nur etwa 810 mm Niederschlag entsprechend etwa 83 % der vieljährig mittleren Niederschlags-höhe, wobei die Defizite im westlichen Landesteil deutlicher als im östlichen Landesteil waren (Abb. 7). Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag erreichte mit etwa 150 mm lediglich 75 % des vieljährig mittleren Wertes, wobei nur kleinere Regionen des Landes von deutlichen Defiziten ausgenommen waren (Abb. 8). Interessant ist auch die innerjährliche Verteilung des Niederschlags und der Sickerwasserrate (Abb. 9). Auf ein sehr niederschlagsarmes Frühjahr folgte ein durchschnittlich regenreicher Sommer und zum Jahresende ein praktisch niederschlagsfreier November vor einem sehr nassen Dezember. Dieser untypische Jahresverlauf führte zu nahezu ausbleibender Grundwasserneubildung ab März. Erst im Dezember stellte sich wieder nennenswerte Grundwasserneubildung ein.

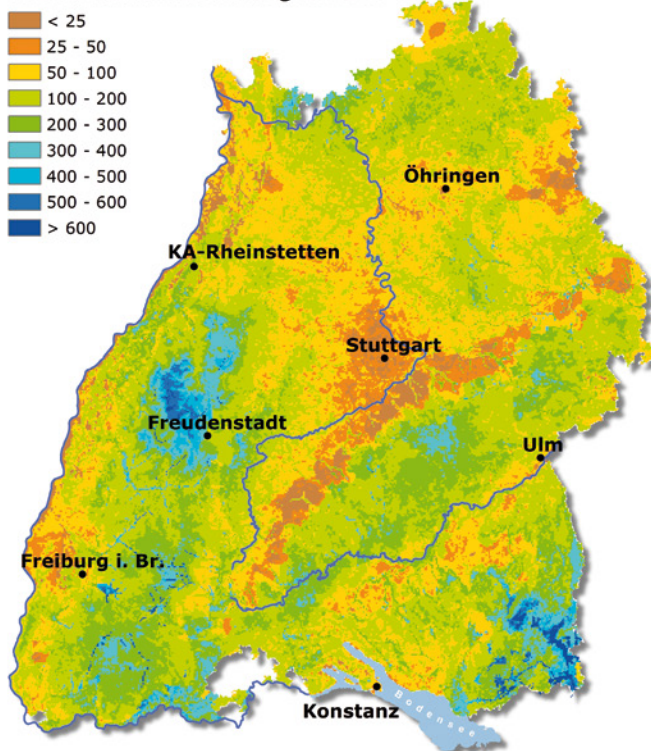
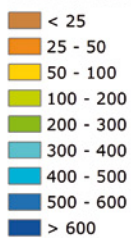
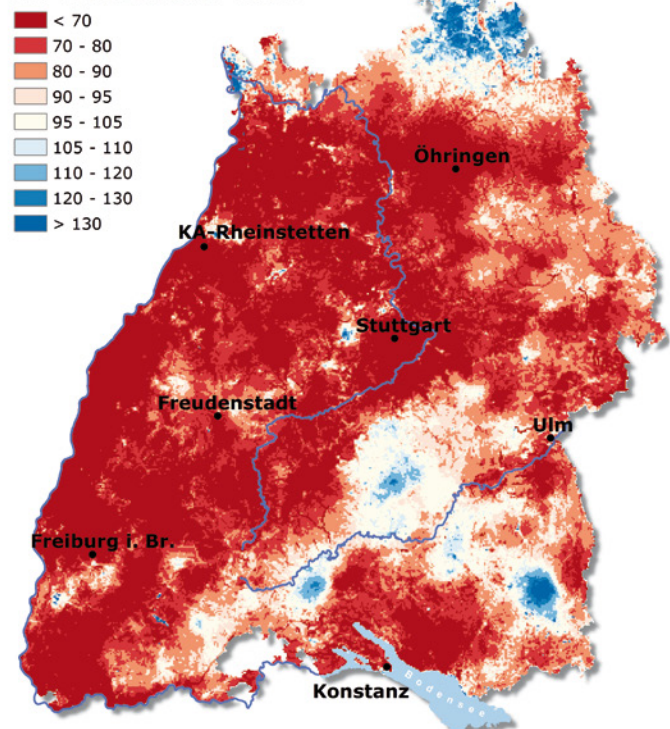
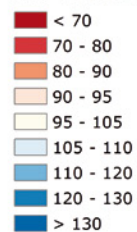
5.3 Obere Randbedingung für numerische Grundwassermodelle

5.3.1 Nördlicher Oberrheingraben

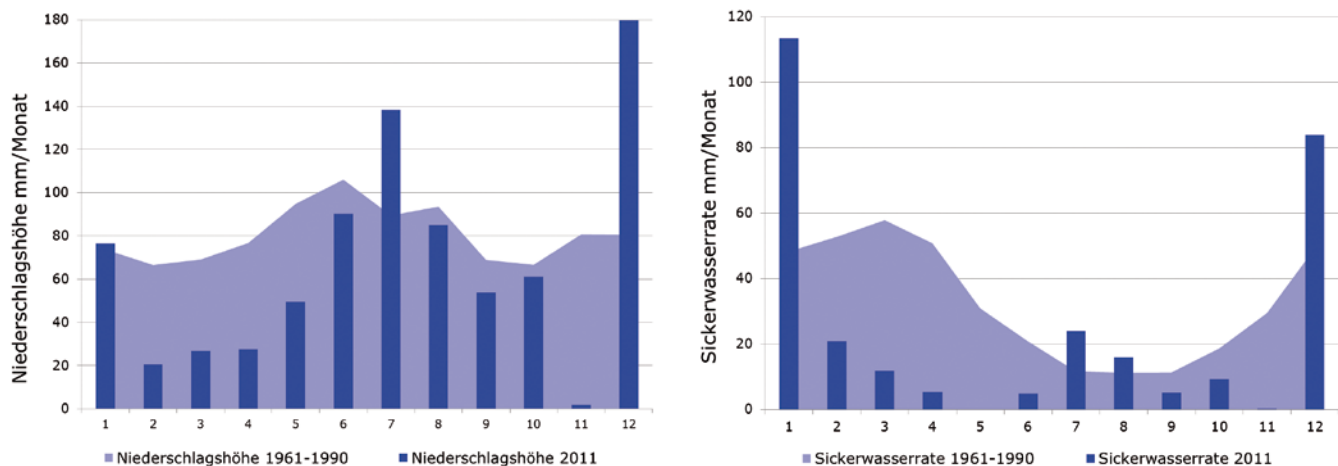
Für den nördlichen Oberrheingraben zwischen Karlsruhe und Worms wurden im Zuge der Fortschreibung des gleichnamigen großräumigen Grundwassermodells ebenfalls mit GWN-BW Berechnungen auf einem 250 m Raster durchgeführt. Das Grundwassermodellgebiet umfasst das gering relieferte Lockergestein im länderübergreifenden Oberrheingraben (BW, RLP & HES 1999, BW & RLP 2007), so dass aufgrund der, für die lokale Grundwasserneubildung aus Niederschlag, vernachlässigbaren schnellen lateralen Abflusskomponenten auf eine Abtrennung derselben durch Multiplikation mit dem Baseflow-Index verzichtet werden kann. Der Grundwasserflurabstand ist im Untersuchungsgebiet in weiten Bereichen gering und zeitlichen

Niederschlagshöhe 2011 in mm**Niederschlagshöhe 2011 in % vom Mittel der Periode 1961 - 1990****Abbildung 7**

Verteilung der Niederschlagshöhe im Jahr 2011 und Anomalie bezogen auf die mittlere Niederschlagshöhe von 1961–1990
Spatial distribution of precipitation in the year 2011 and deviation from mean annual values 1961–1990

Grundwasserneubildung 2011 in mm**Grundwasserneubildung 2011 in % vom Mittel der Periode 1961 - 1990****Abbildung 8**

Verteilung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Jahr 2011 und Anomalie bezogen auf die mittlere Grundwasserneubildung von 1961–1990
Spatial distribution of groundwater recharge induced by precipitation in the year 2011 and deviation from mean annual values 1961–1990

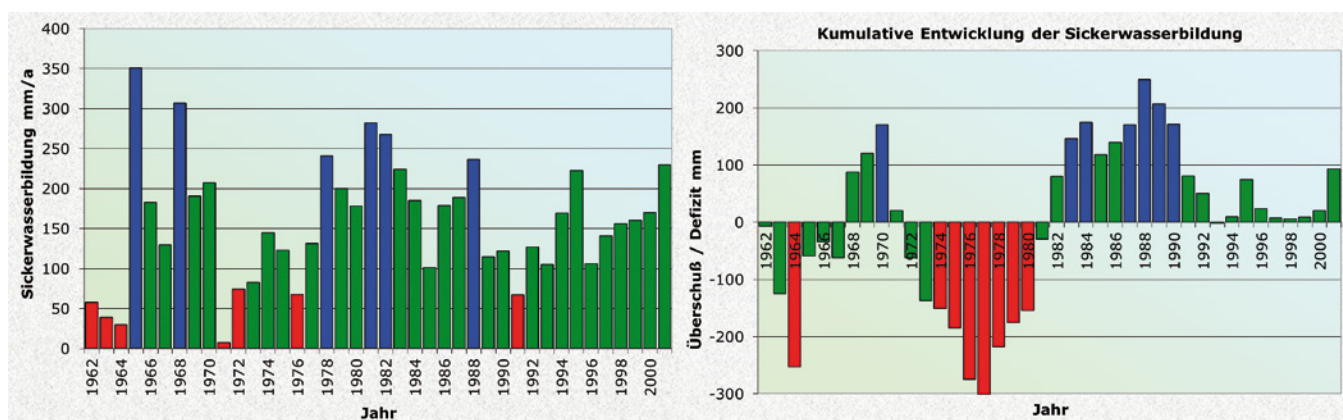

Abbildung 9

Innerjährliche Verteilung von Niederschlag und Sickerwasserrate im Jahr 2011 und Abweichung von den Monatsmittelwerten der Periode 1961–1990
Seasonal cycle of precipitation and percolate water in the year 2011 and deviation from mean annual values 1961–1990

Änderungen unterworfen. Auf Grundlage der vergleichsweise zahlreichen Grundwasserstandszeitreihen wurde daher eine zeitvariante Interpolation der Grundwasseroberfläche auf das Berechnungsraster des Bodenwasserhaushaltsmodells durchgeführt, um darauf basierend den kapillaren Aufstieg abzuschätzen.

Die Grundwasservorratsänderung im nördlichen Oberrhein-graben wird neben der lokalen Grundwasserneubildung aus Niederschlag vor allem durch die Wechselwirkung mit dem Gewässernetz bestimmt, was mit dem großräumigen Grundwassermodell detailliert beschrieben, hier jedoch nicht weiter vertieft wird. Die zeitlichen Schwankungen der Sickerwasserbildung zwischen den Einzeljahren und über mehrjährige Perioden hinweg sind von hoher Bedeutung für die Entwicklung des Grundwasserstandes und damit des Grundwasservorrats. In Abbildung 10 fällt der Zeitraum zwischen 1971 und 1977 als eine Periode mit sieben aufeinander folgenden Jahren unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung auf. Sie wird ab 1978

von einer unmittelbar anschließenden Zeitspanne abgelöst, in welcher bis 1988 zehn von elf Kalenderjahren, mit Ausnahme des relativ trockenen Jahres 1985, eine überdurchschnittlich hohe Neubildung aufweisen. Bei kumulierter Darstellung der normierten Überschüsse bzw. Defizite gegenüber dem langjährigen Mittelwert begründen die geringen Grundwasserneubildungsraten der frühen 70er Jahre eine Periode mit stetig wachsendem Neubildungsdefizit. In den feuchten Jahren zwischen 1978 und 1981 wird zunächst dieses Defizit ausgeglichen, bevor die anhaltend hohen Sickerwassermengen über die 1980er Jahre hinweg für einen relativen Überschuss sorgen. Eine durch ein Neubildungsereignis in Gang gesetzte Speicherfüllung wird im Untersuchungsgebiet limitiert durch die zahlreichen Gewässerrandbedingungen, die sich insbesondere in den Niederungsbereichen befinden und dort den Grundwasseranstieg durch ihre Drainagewirkung begrenzen. Für das stationäre Grundwassermodell zwischen Karlsruhe und Worms wurde als obere Randbedingung die monatliche Sickerwasserrate für die Periode 1962 bis 2001 bereitgestellt.


Abbildung 10

Mittlere Sickerwasserrate im Modellgebiet für die 40 Einzeljahre von 1962–2001 (linke Seite) und normierte kumulierte Überschüsse und Defizite gegenüber dem vieljährigen Mittelwert (rechte Seite). Jahressummen mit Differenzen größer als Standardabweichung zum Mittelwert sind rot/blau markiert.

Generation of percolate water across the investigation area for each of the 40 years within 1962–2001 (left side) and cumulated excess and deficit compared to the long term average (right side). Red and blue bars indicate values exceeding standard deviation.

5.3.2 Oberjura

Das Modellgebiet des numerischen Grundwassermodells für den Karstgrundwasserleiter des Oberjura umfasst neben dem allergrößten Teil der Schwäbischen Alb, auf welcher der Jura an der Oberfläche ansteht, weitere noch einmal fast genauso große Bereiche südlich der Donau, in denen der Karstgrundwasserleiter von Molasse und Moränensedimenten überdeckt ist (Abb. 11). Auch für dieses Grundwassermodell wird die Grundwasserneubildung als obere Randbedingung mit GWN-BW berechnet, wobei in den Bereichen mit an der Oberfläche anstehend verkarstem Gestein nahezu die gesamte Sickerwasserbildung in den Karstaquifer gelangt. Umgekehrt führt die mächtige Überdeckung im südlichen Teil des Modellgebiets dazu, dass die zeitliche Dynamik der nach Abzug der schnellen lateralen Komponenten verbleibenden Grundwasserneubildung so stark geglättet wird, dass die Eintragsfunktion für den Karstaquifer in guter Näherung als zeitlich konstant beschrieben werden kann. Sie ergibt sich aus der Multiplikation der langjährig mittleren Sickerwasserbildung mit dem Baseflow-Index.

Für das zu gut einem Drittel in Bayern liegende Modellgebiet wurden zwei physiographische Eingangsdatensätze erstellt, wobei die Datengrundlage neben Höhenmodellen und Informationen zum Flurabstand aus dem CORINE Datensatz zur Landnutzung und der auf beiden Seiten der Landesgrenze jeweils besten verfügbaren Bodenkarte besteht (BÜK200 in Baden-Württemberg, Konzeptkarte 1:25000 auf bayerischer Seite). Die Aufbereitung erfolgte zum einen in Form eines 250 m Rasters, welches mit den Rasterzellen des Finite-Differenzen Grundwassermodells deckungsgleich ist. Zusätzlich wurde ein aus Vektorgeometrien bestehender Eingangsdatensatz durch Verschneidung der CORINE Landnutzung mit den Kartiereinheiten der Bodenkarte erstellt. Dabei wurden allzu kleine Flächen $< 10.000 \text{ m}^2$ wieder in der Fläche gleicher Landnutzung aufgelöst, aus der sie bei der Verschneidung hervorgegangen waren, und die teilweise entstandenen sehr großen Flächen von 5–30 km^2 durch Verschneidung mit einem $2 \times 2 \text{ km}^2$ Raster weiter unterteilt. Diese Unterteilung dient in erster Linie dazu, bei den anschließenden Simulationsläufen die räumliche Variabilität der meteorologischen Randbedingungen, insbesondere des Niederschlags, ausreichend aufzulösen. Im Ergebnis wird das 17.393 km^2 umfassende Modellgebiet in 64.230 Grundflächen zwischen 0,01 und 5 km^2 diskretisiert. Im 250 m Rasterdatensatz sind es 278.288 Modellzellen. Neben der deutlich geringeren Rechenzeit und kompakteren Ergebnisdateien weist der Vektordatensatz zwei weitere Vorteile auf. Einerseits werden naturräumliche Strukturen, soweit sie in der Differenzierung von Landnutzung und Böden zum Ausdruck kommen, z.B. Umrisse von Siedlungen, aber häufig auch der Verlauf von Tälern und Hängen, plastischer abgebildet (vgl.

Abb. 4). Der Vektordatensatz ist in Bereichen, in denen Nutzung und Bodenbedeckung kleinräumig variieren, höher aufgelöst als in solchen mit großflächig einheitlicher Gebietsausstattung. Zugleich eröffnen sich für die Ergebnisse differenziertere Auswertungsmöglichkeiten, da jede Grundfläche (im Unterschied zu Rasterzellen mit gewichteten Ergebnissen für die unter ihnen liegenden Anteile verschiedener Nutzungen und Böden) eindeutig einer Nutzungsform und einem bestimmten Boden zugeordnet werden kann.

6 Validierung

Für die mit GWN-BW berechneten Gesamtabflüsse und Sickerwassermengen wurde eine umfangreiche Validierung an Lysimeterstandorten und Gebietsabflüssen durchgeführt. Dabei erweist sich der Abgleich gegen die Messwerte einzelner Lysimeterstandorte in Baden-Württemberg insofern als problematisch, als für diese in der Regel keine im Labor bestimmten Bodenkennwerte vorliegen. Im Mittel über sieben grasbewachsene Lysimeter im Oberrheingraben und fünf Grünlandstandorte in Oberschwaben ergibt sich gegenüber Messwerten aus den Jahren 1980 bis 2004 in beiden Regionen eine Überschätzung der Sickerwassermenge um 3–4 %, über fünf Ackerstandorte am Oberrhein hinweg eine solche um 8 %. Gleichwohl wurde auf eine Nachkalibrierung der Verdunstung von Ackerstandorten verzichtet, da keine Informationen zu den jeweils angebauten Feldfrüchten vorliegen und im klimatisch begünstigten Oberrheingraben durchaus mit dem Anbau ertragsstärkerer Sorten mit höherer Biomasseproduktion und entsprechend höherem Wasserverbrauch gerechnet werden muss.

Der Abgleich zwischen simuliertem und beobachtetem Gesamtabfluss erfolgte für 345 Pegelbezugsgebiete in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen mit einer Größe zwischen 7,5 und 500 km^2 und einer Gesamtfläche von 40.538 km^2 (Tab. 1). Dabei zeigt sich, dass die beobachteten

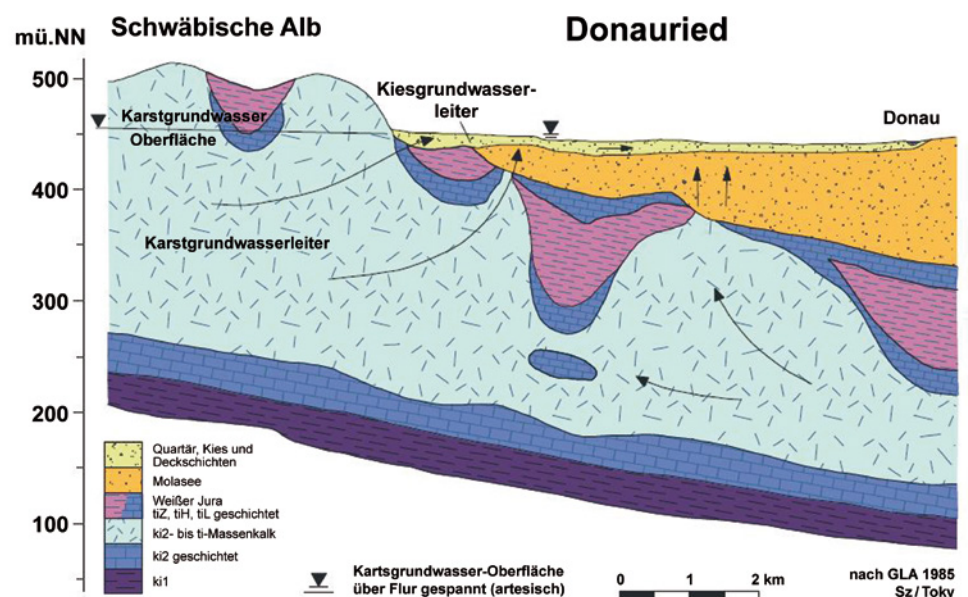


Abbildung 11

Schematischer geologischer Schnitt durch das Modellgebiet Oberjura (Prinzipdarstellung nach Dr. Schloz, Geologisches Landesamt 1985)

Geological cross section of the model area "Oberjura"

Tabelle 1

Validierung der mit GWN-BW berechneten Gesamtflüsse.

Validation of total discharge calculated by GWN-BW against measured volumes.

Naturraum	Anzahl der Gebiete	Fläche km ²	Qobs mm/a	Qsim mm/a	Sim-Obs mm/a	Sim/Obs
Westerwald	14	1.404	425,7	449,6	23,9	1,056
Eifel und Schiefergebirge	28	3.229	364,0	422,8	58,8	1,162
Pfälzer Wald und Hunsrück	54	6.644	244,3	262,9	18,6	1,076
Nördlicher Oberrhein	10	950	135,6	129,3	-6,3	0,953
Schwarzwald	23	1.719	854,4	815,1	-39,3	0,954
Schwäbische Alb	10	1.266	382,5	398,3	15,8	1,041
Keuper und Muschelkalk	17	1.541	248,2	267,1	18,9	1,076
Bayern südlich der Donau	62	8.771	474,6	464,0	-10,6	0,978
Ostbayerisches Kristallin	24	2.792	496,7	476,6	-20,1	0,960
Frankenalb, Keuper, MuKa	47	6.392	216,7	277,3	60,6	1,280
Odenwald, Spessart, Rhön	13	1.349	324,3	337,9	13,6	1,042
Westhessisches Bergland	8	848	303,4	304,5	1,1	1,004
Fulda-Werra-Bergland	12	1.369	304,9	274,1	-30,8	0,899
Vogelsberg	14	1.379	337,0	342,1	5,1	1,015
Taunus	9	887	209,6	217,1	7,4	1,036

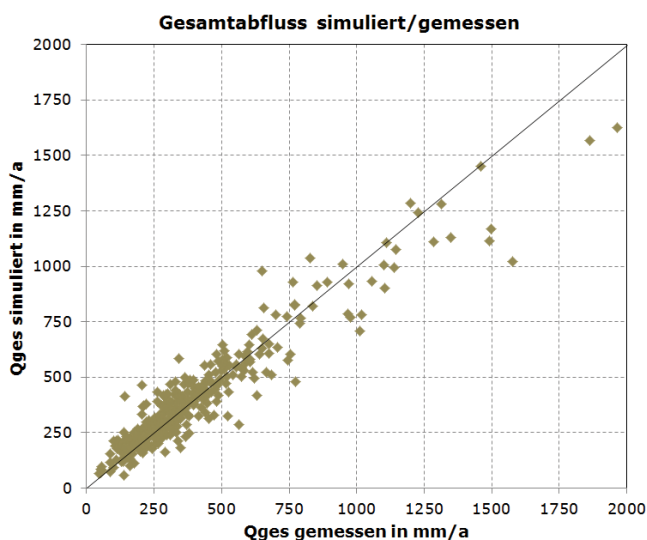
Gebietsabflüsse im regionalen Mittel über einige 100 km² hinweg in nahezu allen Naturräumen Süddeutschlands mit ihrer weiten Spannweite an Gebietsausstattungen und Klimabedingungen mit hoher Genauigkeit reproduziert werden. Wo dies ausnahmsweise nicht der Fall ist, konnten die spezifischen Ursachen auf Seiten der Eingangsdaten (Bodenkarte) oder der Vergleichsdaten (unterirdischer Abfluss im Karst) identifiziert werden. Zugleich verbleiben auf Maßstabebene einzelner Einzugsgebiete von 10–250 km² Größe erhebliche positive und negative Abweichungen (vgl. Abb. 12), welche den Ergebnissen weitergehender Untersuchungen (MORHARD 2013a, MORHARD 2013b) nach in fast allen Fällen vollständig durch eine Unsicherheit des Gebietsniederschlags in der Größenordnung von zumeist $\pm 10\%$, seltener bis 15 %, erklärt werden können.

Dabei muss der Gebietsniederschlag nicht die einzige Ursache der verbleibenden Modellfehler sein, dieser erweist sich jedoch als die mit Abstand sensitivste und zugleich nur schwer mit höherer Genauigkeit zu erfassende Eingangsgröße. Darauf deutet auch der Umstand hin, dass in einer Reihe von Fällen Änderungen im Niederschlagsmessnetz zu abrupten Niveausprüngen des Modellfehlers führen, und dass besonders große Modellfehler meist kleine Einzugsgebiete und bevorzugt solche in den höheren Lagen der Mittelgebirge betreffen (d.h. solche mit aufgrund der topographischen Gliederung, Luv-Lee-Effekten und zunehmendem Messfehler bei höherem Schneeanteil und stärkerer Windexposition schwierig zu bestimmendem Gebietsniederschlag).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit GWN-BW steht ein methodisch detailliertes, hinsichtlich Konfiguration und benötigter Eingangsdaten flexibel anwendbares Modell zur Beschreibung von Bodenwasserhaushalt, tatsächlicher Verdunstungshöhe sowie der Sickerwassermenge und Grundwasserneubildung zur Verfügung. Seit dem Jahr 2001 wurde es zunächst in Baden-Württemberg und in der Folge auch in den Nachbarbundesländern Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen für zahlreiche Fragestellungen eingesetzt und technisch und methodisch weiterentwickelt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf einer über die unterschiedlichen Naturräume Süddeutschlands hinweg konsistenten Prozessbeschreibung und Parametrisierung sowie einer möglichst umfangreichen Validierung der Modellergebnisse, welche durch Untersuchungen zur Sensitivität und Unsicherheit der Modelleingangsdaten ergänzt wurde.

Wie das Beispiel des Trockenheitsindex und Untersuchungen zur Nitratauswaschungsgefährdung zeigen, lassen sich ausgehend von den primären Modellergebnissen weitere Fragestellungen mit konkreter, beispielsweise land- oder forstwirtschaftlicher Relevanz angehen, die künftig auch den Bewässerungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturpflanzen um-

**Abbildung 12**

Simulierter und gemessener Gesamtabfluss der Pegelbezugsgebiete
Simulated and measured discharge of catchments located across Southern Germany.

fassen könnten. Die gezeigten landesweiten Auswertungen lassen sich nach Landnutzung, Region oder Betrachtungszeiträumen weiter differenzieren. Zur Einschätzung der Auswirkungen veränderter Klimabedingungen auf den Wasserhaushalt können weitere Simulationsrechnungen dienen, welche die auf Grundlage globaler und regionaler Klimamodelle generierten Szenariendaten als Eingangsgrößen verwenden. Dabei wurde in ersten Pilotstudien auch die durch den Grundwasserspeicher erfolgende Transformation der mit GWN-BW berechneten Sickerwasserbildung in Gebietsabflüsse untersucht (STAUDER et al. 2014, STÖLZLE 2014), womit ausgehend von der erwarteten Änderung der Grundwasserneubildung auch auf Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse und Quellschüttungen in Trockenperioden geschlossen werden kann.

Durch die inzwischen landesweit fertiggestellte Bodenkarte 1:50000 (BK50) steht in Baden-Württemberg für die Parametrisierung des Bodenspeichers künftig eine deutlich verbesserte Datengrundlage zur Verfügung, welche nicht nur die Genauigkeit und räumliche Auflösung der Eingangsdaten erhöht, sondern aufgrund der zusätzlich enthaltenen Informationen auch eine versiertere Prozessbeschreibung erlauben wird (z.B. Bildung von Direktabfluss, Sättigungsflächen). Zudem liegen für die rund 40 % der Landesfläche, die von Wäldern eingenommen werden, seitens der Forstverwaltung umfangreiche Datengrundlagen vor, die dabei helfen können, das Verdunstungsverhalten verschiedener Waldformen weiter zu differenzieren.

Summary and outlook

The modelling software GWN-BW has been designed to provide methodologically sound routines for calculating soil water balance, actual evapotranspiration, generation of percolate water and groundwater recharge, while offering high flexibility in the configuration of modules and specification of input data. Since 2001, it has become a standard tool for public authorities in the federal states of Baden-Wuerttemberg, Bavaria, Rhineland-Palatinate and Hesse, but has been continuously enhanced in terms of methodological and technical capabilities. Notable focus was set on consistent delineation and parametrisation of hydrological processes across the entire range of landforms and climate conditions in Southern Germany, complemented by a comprehensive validation of simulation results as well as an investigation of the uncertainty and sensitivity of input data.

Over and above primary model results, examples such as drought indices and studies on the risk of nitrate leaching illustrate the capabilities to address further topics, for instance of agricultural or silvicultural relevance. In the near future, such topics may also include the irrigation demand of agricultural crops. Maps, charts and tables depicting balance quantities on the spatial scale of federal states can be refined for smaller regions, certain types of land use or different periods of time. Additional simulation runs driven by global and regional climate models may help to evaluate effects on the water cycle caused by climate change. Beyond investigations of changes of the total quantity and seasonal cycle of groundwater recharge, recent studies have also considered the transformation of percolate water into groundwater storage and discharge (STAUDER et al. 2014, STÖLZLE 2014), thus also allowing to draw conclusions on changes of low flows and spring delivery during drought periods.

The recently finished higher resolution soil map 1:50000 for Baden-Wuerttemberg provides more detailed input data and additional physical properties, while not only improving the spatial resolution and accuracy, but supporting a more sophisticated representation of hydraulic processes (e.g. generation of direct runoff, saturated areas). On top of that, the forestry administration supplies extensive information and databases for the woodlands, accounting for about 40 % of the state territory, which may contribute to further differentiate the evaporation processes of various types of forests.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. T. Gudera
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg
Hertzstraße 173, 76231 Karlsruhe
thomas.gudera@lubw.bwl.de

Dipl.-Hyd. A. Morhard
GIT HydroS Consult GmbH
Bertoldstraße 61, 79098 Freiburg

Literaturverzeichnis

- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover; 392 S., 33 Abb., 91 Tab.
- ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 17, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg
- BENGTSOON, L. (1997): Hydrologi – teori och processer (excerpt translated by Rolf Larsson Sept 2004). – Svenska Hydrologiska Rådet och Institution för Teknisk Vattenresurslära, Lunds Universitet
- BW, RLP & HES (1999): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum – Fortschreibung 1983–1998. – Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart, Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz, und Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Wiesbaden
- BW & RLP (2007): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung im Raum Karlsruhe-Speyer – Fortschreibung 1986–2005. – Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, und Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Mainz
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. – Mitteilungen Deutscher Wetterdienst 2 (11), Bad Kissingen
- HGN (1991): Abflußspendenkarte von Baden-Württemberg Blatt Offenburg, Karte M 1:50 000 und Erläuterungen. – Hydrogeologie GmbH Nordhausen im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- HGN (1991): Abflußspendenkarte von Baden-Württemberg Einzugsgebiet der Kinzig (Pegel Schwaibach), Karte M 1:50 000 und Erläuterungen. – Hydrogeologie GmbH Nordhausen im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

- KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. – KLIWA-Berichte Heft 17
- LFU (1975a): Grundwasserneubildung I. Bericht. – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Wasser- und Abfallwirtschaft, Karlsruhe
- LFU (1975b): Grundwasserneubildung II. Bericht. – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Wasser- und Abfallwirtschaft, Karlsruhe
- LFU (1990): Grundwasserneubildung Baden-Württemberg (berechnet nach Wundt), M 1:500 000. – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- LUBW (2010–2014): Grundwasserüberwachungsprogramm, Ergebnisse der Beprobung 2009, 2010, 2011, 2012, 2013. – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- MENZEL, L. (1999): Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, PIK Report 54
- MORHARD, A. (2004): Berechnung der Grundwasserneubildung für die Modellgebiete der HGK Karlsruhe-Speyer und Rhein-Neckar-Raum. – Unveröffent. Gutachten im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. – GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg
- MORHARD, A. (2006): Nitrathaushalt und Eintragungspotentiale der Trinkwassergewinnungsgebiete der badenova. Teilprojekt Wasserhaushalt und numerische Grundwassermodelle. – Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz, Freiburg
- MORHARD, A. (2009): Kurzbeschreibung des Modells GWN-BW. Erweiterungen in Version 2.0. Stand 13.5.2009; www.hydroconsult.com/hydrologie/modellidoku-gwn-bw/
- MORHARD, A. (2013a): Stadttunnel Freiburg – Abschätzung des Grundwasserzustroms von Osten (unterirdischer Abstrom aus dem Zartener Becken). – Unveröffent. Gutachten im Auftrag des Regierungspräsidiums Freiburg. – GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg
- MORHARD, A. (2013b): Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW – Untersuchungen zur Sensitivität von Eingangsdaten und Modellparametern. – Unveröffent. Gutachten im Auftrag der KLIWA AG Grundwasser. – GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg
- MORHARD, A. (2014): Bodenwasserhaushalt in den Trinkwasserschutzgebieten Zellingen und Winterhäuser Quelle. – Unveröffent. Gutachten im Auftrag der Trinkwasserversorgung Würzburg GmbH. – GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg
- RENGER, M. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. – Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 15, 1. Bericht: 148–160; 2. Bericht: 206–221
- STALA (2012): Die öffentliche Wasserversorgung in Baden-Württemberg 2010. – Monatsheft 5/2012, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart
- STAUDER, S., A. MORHARD, F. BRAUER, T. FISCHER & D. HOCHMUTH (2014): Vulnerabilitätsanalyse von Wasserversorgungsunternehmen im südlichen Schwarzwald hinsichtlich des Klimawandels. – KLIMOPASS Forschungsbericht. – Hrsg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- STÖLZLE, M. (2014): Klimasensitivität und Vulnerabilität von Fließgewässern in Zusammenhang mit Niedrigwasserabflüssen. – Dissertation, Universität Freiburg
- STÖLZLE, M., M. WEILER, K. STAHL, A. MORHARD & T. SCHÜTZ (2014): Is there a superior conceptual groundwater model structure for baseflow simulation? – Hydrological Processes 29 (6), 1301–1313; DOI: 10.1002/hyp.10251
- UNIVERSITÄT KARLSRUHE (1985): Ermittlung der hydrologischen Eingangsdaten und Wassermengenbilanzierung für die Grundwassermodelle Aachtal und Singener Kiesfeld. – Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- WABOA (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. – Umweltministerium Baden-Württemberg und Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- WASY (1995): Grundwasserneubildungsberechnung im Raum Offenburg. – WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Berlin, im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe