

Andreas Steinbrich, Hannes Leistert, Michael Stoelzle & Markus Weiler

Weichenstellung im Untergrund – vom Baseflow-Index zum Grundwasser-Neubildungs-Index?

Switches in the subsurface – moving from a base flow to a ground water recharge index?

Ein neuer, räumlich verteilter, prozessbasierter Ansatz zur Quantifizierung der Grundwasserneubildung wird vorgestellt. Der Anteil der Grundwasserneubildung am Gesamtabfluss, bestehend aus Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss, wird als Grundwasser-Neubildungs-Index (GwN-I) definiert. Er unterscheidet sich von dem, normalerweise aus den Abflussganglinien am Pegel abgeleiteten, Baseflow-Index (BFI) oder anderen Basisabflusstrennungen hinsichtlich der Methodik der Berechnung und der Definition der Abflusskomponenten. Der GwN-I quantifiziert Sickerwasser, das dem Grundwasser zufließt. Der BFI dagegen quantifiziert den Abfluss aus langsam leerlaufenden Speichern, was je nach Reaktionszeit der Abflusskomponenten zu größeren Unterschieden zwischen BFI und GwN-I führen kann. Der GwN-I kann flächendetailliert ermittelt werden und stellt somit eine Option dar, um vorhandene Grundwasserneubildungsmodelle entsprechend anzupassen oder direkt mit dem entsprechenden Modell RoGeR die Abflusskomponenten und die Grundwasserneubildung zu ermitteln.

Schlagwörter: Wasserhaushaltsmodellierung, Modell RoGeR, Grundwasserneubildung, Grundwasser-Neubildungs-Index, Baseflow-Index, Delayed Flow Index

In the current study, a novel, spatially distributed and process-based, method of quantifying groundwater recharge is presented. The spatially explicit proportion of groundwater recharge in the total runoff (overland flow, interflow and groundwater recharge) is defined as the groundwater recharge index (GwR-I). It can be distinguished from the baseflow index (BFI) by the method of derivation and the definition of the components. The GwR-I quantifies water percolating towards the groundwater while the BFI quantifies delayed discharge of slowly draining storages. This might, depending on the reaction time of flow components, lead to considerable differences between BFI and GwR-I. The GwR-I can be derived on a spatially detailed basis, which makes it an option for the adaption of existing groundwater recharge models or to apply the model RoGeR directly to determine groundwater recharge.

Keywords: water balance model, RoGeR, groundwater recharge, groundwater recharge index, baseflow index, delayed flow index

1 Einführung

Die Prozesse der Abflussbildung an der Landoberfläche und im Oberboden entscheiden, wie viel Niederschlagswasser in den Boden gelangt oder oberflächlich abfließt. Infiltrierendes Wasser füllt den Bodenspeicher, bis dieses an die Grenze des geologischen Untergrundes weitergegeben wird oder kann über präferentielle Fließwege direkt an diese Grenzen gelangen. Im Boden und am Übergang zum geologischen Untergrund entscheidet sich nun, ob Perkolationswasser vertikal dem Grundwasser zustrebt oder lateral als Zwischenabfluss abfließt. Wesentliche Faktoren sind hierbei das Gefälle, die Durchlässigkeit und Schichtung von Boden und Untergrund sowie die laterale Durchlässigkeit im Boden aufgrund präferentieller Fließwege (DWA, 2020). Diese Weichenstellung im Untergrund ist von hoher Relevanz für die Abflussbildung und Grundwasserneubildung und daher Gegenstand vieler Untersuchungen und Modellansätze (KIRKBY, 1988; ANDERSON & BURT, 1990; WEILER & McDONNELL, 2004; DWA, 2020). Da die Abschätzung der Grundwasserneubildung essenziell ist für ein nachhaltiges Grundwassermanagement, werden neben prozessbasierten Ansätzen in der Hangskale für Einzugsgebiete mit gemessenen Abflusswerten Ansätze verfolgt, um aus der Abflussganglinie den Grundwasseranteil am Gesamtabfluss abzuschätzen. Dies erfolgt häufig durch Verfahren zur Abtrennung der langsamen Abflusskomponenten (Basisabfluss) vom Gesamtabfluss (DEMUTH, 1993; WMO, 2009 (Baseflow-Index); STOELZLE et al. (2020 (Delayed Flow Index (DFI)). Der Baseflow-Index (BFI) wird für einige

eindimensionale Grundwasserneubildungsmodelle verwendet, um das simulierte Sickerwasser in laterale Komponenten und Grundwasserneubildung aufzuteilen (z. B. GWN-BW (GUDERA & MORHARD, 2015), mGROWA (HERRMANN et al., 2013)). Dazu erfolgt üblicherweise eine Übertragung des BFI mittels verschiedener Regionalisierungsansätze (ARMBRUSTER, 2002), um den in Pegeleinzugsgebieten ermittelten BFI auf andere Gebiete zu übertragen. Armbruster (2002) verwendete für die Übertragung ein auf Geofaktoren basierendes multiples Regressionsmodell. Die Grundwasserneubildung ergibt sich dann als Produkt aus Sickerwasser und BFI. Üblicherweise modellieren Wasserhaushaltsmodelle in täglicher Auflösung. Damit ist es nicht möglich, Prozesse abzubilden, die intensitätsabhängig sind. Das betrifft sowohl die Bildung von Oberflächenabfluss als auch die Aufteilung von Sickerwasser in Zwischenabfluss und Tiefenperkolation.

Das prozessbasierte Wasserhaushalts-Modell RoGeR_WB bildet neben der Verdunstung die Abflussbildung an der Bodenoberfläche und die Aufteilung des Sickerwassers im Untergrund räumlich und zeitlich hoch aufgelöst ab (STEINBRICH et al., 2021). Somit sollte es bei solch einem Modellansatz nicht mehr notwendig sein, die Aufteilung der lateralen und vertikalen Komponenten durch einen BFI durchzuführen, um eine zeitlich und räumlich konsistente Vorhersage der Grundwasserneubildung zu erhalten. Dazu wird eine Vielzahl von flächenhaft verfügbaren Daten genutzt (STEINBRICH et al., 2021). So ist es möglich, die absolute Menge der einzelnen Abflusskompo-

nenten und damit auch den Anteil der Tiefenperkolation bzw. Grundwasserneubildung am Gesamtabfluss flächendetailliert zu berechnen. Da die Ermittlung dieses Anteils auf einer gänzlich anderen Grundlage beruht als die des BFI oder DFI, wird dafür der Begriff Grundwasser-Neubildungs-Index (GwN-I) vorgeschlagen.

Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchung ist zum einen die detaillierte Beschreibung des neuen Ansatzes für die Anwendung auf das Bundesland Baden-Württemberg und der Vergleich des räumlich verteilten GwN-I mit den BFI-Ansätzen auf Einzugsgebietsebene sowie mit regionalisierten BFI-Werten für Baden-Württemberg. Daher lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Führt der Ansatz der GwN-I zu ähnlichen räumlichen Mustern wie BFI-Ansätze?
- Wie fallen die Wertebereiche der GwN-I im Vergleich zu den Wertebereichen der BFI-Ansätze aus?
- Wo liegen Unterschiede und was könnten die Ursachen dafür sein?

2 Methoden

2.1 Das Wasserhaushaltsmodell RoGeR_WB_1D

Das Wasserhaushaltsmodell RoGeR_WB ist eine Weiterentwicklung des ereignisbasierten Niederschlag-Abfluss-Modells RoGeR (STEINBRICH et al., 2016). Es bildet neben den Prozessen der Abflussbildung auch die Evapotranspiration, Schneesmelze und kapillaren Aufstieg ab. Der Zeitschritt des Modells entspricht für Zeiten ohne Niederschlag 24 Stunden. Tritt an einem Tag Niederschlag auf, erfolgt die Modellierung in stündlicher Auflösung. Wird innerhalb eines Niederschlagsereignisses eine Intensität von 5 mm/10 Minuten erreicht, wird dieses Ereignis in 10-minütiger Auflösung modelliert. Damit wird der Bedeutung hoher Intensitäten bei der Entstehung von Horton'schem Oberflächenabfluss (d. h. infolge von Infiltrationsüberschuss) oder schnellem Zwischenabfluss Rechnung getragen. Aus dem rasterbasierten Modell RoGeR_WB, das Wasserflüsse zwischen Rasterzellen abbilden kann, wurde auch eine 1-D-Version abgeleitet, um eine schnellere Modellierung des Wasserhaushalts zu ermöglichen, bei der keine laterale Umverteilung auf benachbarte Flächen berücksichtigt werden muss. Diese Version (RoGeR_WB_1D) wurde für die hier vorgestellten Untersuchungen herangezogen. Eine Übersicht der Modellversionen von RoGeR findet sich in STEINBRICH et al. (2021).

Abbildung der Prozesse, welche die Bildung von Grundwasser steuern im Modell RoGeR_WB

Die Infiltration von Niederschlag und/oder Schneesmelze über die Bodenoberfläche, durch Makroporen und Trockenrisse wird in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften, der aktuellen Bodenfeuchte und der Niederschlagsintensität modelliert (STEINBRICH et al., 2016). Die nutzbare Feldkapazität (nFK) und die Luftkapazität (LK) werden aufgrund der BK50 (Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000) parametrisiert und durch Infiltration und kapillaren Aufstieg gefüllt. Entleert wird der Bodenspeicher durch Verdunstung, Tiefenperkolation und Zwischenabfluss. Die Verdunstung aus dem Boden und dem Interzeptionsspeicher

(auf Blättern oder anderen Oberflächen zwischengespeicherte Menge Wasser) sowie die Transpiration der Pflanzen, die den Boden bedecken, werden in Abhängigkeit der aktuellen potenziellen Verdunstung und des aktuellen Wassergehaltes des Bodens modelliert. Im Falle von Bäumen bzw. Wald steht über dem Boden ein zusätzlicher Interzeptionsspeicher für die Verdunstung zur Verfügung. Die Vegetation am Boden und die Bäume teilen sich das im Boden verfügbare Wasser für die Transpiration. Die potenzielle Verdunstung steht zum einen für die Baumschicht und zum anderen reduziert durch die Baumbeschattung für den Boden respektive für die Bodenvegetation zur Verfügung. Dadurch ist es möglich, dass die aktuelle Verdunstung aus beiden Verdunstungsebenen höher sein kann als die potenzielle Verdunstung.

Austausch mit dem geologischen Untergrund und Zwischenabfluss

Sowohl aus nFK als auch aus LK kann in Abhängigkeit der hydraulischen Potenziale und der vertikalen Leitfähigkeit an der Basis des Bodens Wasser in den geologischen Untergrund gelangen. Umgekehrt kann bei hohen Grundwasserständen Wasser kapillar in den Boden aufsteigen. Wenn die nFK durch Infiltration überschritten wird, steht auch Wasser für Zwischenabfluss zur Verfügung. Wie viel Zwischenabfluss gebildet werden kann, hängt ab vom Gefälle, der Höhe des Sättigungswasserspiegels an der Basis des Bodens, der Tiefe dieser Basis und der lateralen Leitfähigkeit an der Bodenbasis (Matrixdurchlässigkeit und Makroporosität) (STEINBRICH et al., 2016). Ist der Boden trotz Zwischenabfluss und Tiefenperkolation gesättigt, tritt Sättigungs-Oberflächenabfluss auf.

Sonderfall Perkolation aus dem Boden direkt ins Grundwasser

Steht Grundwasser so hoch an, dass der Boden davon direkt erreicht wird, findet bei Überschreitung der nFK eine Abgabe von Wasser aus dem Boden direkt in das Grundwasser statt. In der Regel sind Bereiche, in denen das stattfindet, gewässernah. Zudem findet der laterale Fließprozess dieses Wassers, wie beim Zwischenabfluss im Boden, dort auch durch Makroporen statt. Damit ist hier in der Regel mit geringeren Reaktionszeiten zu rechnen als durch den geologischen Untergrund und aus gewässerferneren Bereichen. Aus diesem Grund gibt es sowohl gute Argumente, dieses Wasser dem Grundwasser zuzuordnen, als auch dafür, es dem Zwischenabfluss zuzuschlagen. Für die hier vorgestellten Vergleiche wurde dieses Wasser der Grundwasserneubildung zugeschlagen.

2.2 Eingangsdaten für RoGeR_WB_1D

Physische Gebietseigenschaften

Für eine auf Baden-Württemberg bezogene, landesweite Parametrisierung des Modells RoGeR_WB_1D konnte auf flächendeckend verfügbare Daten zurückgegriffen werden (Tab. 1).

Zur flächendeckenden Parametrisierung des Modells RoGeR_WB_1D wurde eine Verschneidung der Bodenkundlichen Kartiereinheiten, der hydrogeologischen Einheiten und der Landnutzung durchgeführt. Daraus ergaben sich für die gesamte Landesfläche rund 4.380.000 Teilflächen (Modelleinheiten). Für die als Rasterdaten vorliegenden Eingangsgrößen "Gefälle", "Versiegelungsgrad" und "Grundwasserflurabstand" wurde für jede Modelleinheit der Mittelwert aus den detaillierten Rasterdatensätzen ermittelt.

Tabelle 1

Verwendete Datensätze für die Parametrisierung des N-A-Modells RoGeR_WB_1D (LUBW = Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, LGRB = Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, PHF = Professur für Hydrologie Freiburg, WaBoA = Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg).

Applied data sets (LUBW = Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, LGRB = Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, PHF = Professur für Hydrologie Freiburg, WaBoA = Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg).

| Datensatz | Zeitstempel | Bereitstellende Institution |
|---|-------------|-----------------------------|
| ATKIS-Landnutzung | 2015 | LUBW |
| Versiegelungsgrad der Erdoberfläche | 2008 | WaBoA |
| Bodenkundliche Kartiereinheiten 1 : 50.000 (BK50) | 2018 | LGRB/PHF |
| Hydrogeologische Karte 1 : 50.000 (HGK50)* | 2018 | LGRB |
| LIDAR-DHM | 2008 | LUBW |
| Landesweite mittlere GW-Flurabstände | 2018 | PHF |

* Nach Plausibilisierung und Aktualisierung der kf-Werte durch das LGRB mit Blick auf die Durchlässigkeit in vertikaler Richtung

Klimadaten

Für den meteorologischen Antrieb des Modells wurden Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ausgewählt. Kriterien für die Auswahl sind eine hohe zeitlichen Auflösung der Niederschlagsaufzeichnungen (10 Minuten) sowie eine ausreichend lange Zeitreihe (mindestens 10 Jahre). Außerdem sollte das Zeitfenster der Aufzeichnung nicht in die Zeit vor dem Jahr 1994 reichen, da erst ab diesem Zeitpunkt Zeitreihen der Grasreferenz-Verdunstung beim DWD vorliegen, die für RoGeR_WB als Eingangsdaten für die potenzielle tägliche Verdunstung verwendet werden.

Aufgrund dieser Kriterien konnten 139 Niederschlagsstationen ausgewählt werden. Anhand der Stationen wurde die Fläche von Baden-Württemberg in Thiessen-Polygone gegliedert. Jedes Thiessen-Polygon ist eine Modellregion, für die ein Modellauf über 11 hydrologische Jahre (1. November 2006 bis 31. Oktober 2017) erfolgte.

Um lückenlose Daten (10 min Niederschlag, Tageswerte Temperatur und potenzielle Verdunstung) für alle Niederschlagsstationen sicherzustellen, wurden verschiedene Datenaufbereitungsschritte durchgeführt. Zuerst wurden die in ein- und fünfminütiger Auflösung vorliegenden Niederschlagsdaten zu 10-Minutenwerten aggregiert. Danach wurden fehlende Niederschlagsdaten mit Daten der nächstgelegenen Station ersetzt. Dabei wurde der Niederschlag entsprechend des mittleren jährlichen Niederschlagsverhältniswerts zwischen den beiden Stationen korrigiert, wobei die stationsspezifische Variabilität der Zeitreihe erhalten bleibt. Letztlich wurden die Niederschlagswerte der Stationen so skaliert, dass der langjährige mittlere Jahresniederschlag an der Station dem mittleren, korrigierten Jahresniederschlag (1961 bis 1990) entspricht. Dieser wurde der Atlastafel 2.2 "Mittlere korrigierte Niederschlagshöhe" des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) (UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG, 2001) entnommen. Grundlage der Atlastafel 2.2 sind die korrigierten Tageswerte nach REGNIE (DWD-Verfahren "Regionalisierte Niederschlagshöhen"), aggregiert zum mittleren Jahresniederschlag (1961 bis 1990).

Da nur an den Klimastationen Temperaturwerte und andere meteorologische Daten vorliegen, war es notwendig, diese Zeitreihen auf die verbleibenden Niederschlagsstationen zu übertragen. Dazu wurde jeweils die nächstgelegene Klimastation verwendet, um die Tagesmitteltemperatur entsprechend der Höhendifferenz der beiden Stationen unter Annahme einer Temperaturabnahme von 0.65 K pro 100 m zu korrigieren. Die potenzielle Verdunstung wurde übertragen, wobei basierend auf der WaBoA-Karte der langjährigen mittleren potenziellen Verdunstung ein Faktor aus dem Wert der WaBoA-Karte an der Stelle der Lage der Klimastation und dem entsprechenden Wert an der Stelle der Niederschlagsstation abgeleitet wurde. Fehlwerte bei den Temperaturmessungen und den Daten der potenziellen Verdunstung wurden entsprechend dem Vorgehen bei den Niederschlagsdaten aus den nächstgelegenen Stationen mit den entsprechenden Korrekturfaktoren ersetzt.

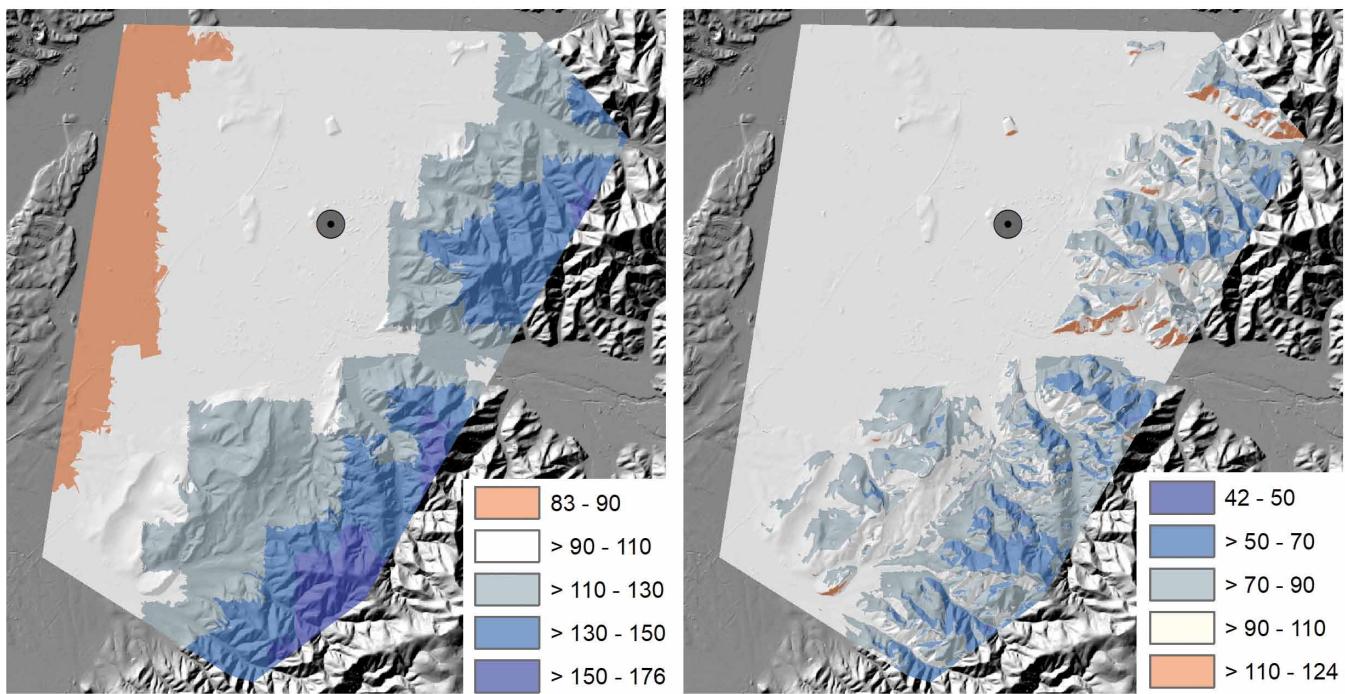
Die Übertragung der Stationswerte für Niederschlag, Verdunstung und Temperatur auf die im entsprechenden Thiessen-Polygon liegenden Modelleinheiten aus der Verschneidung von Landnutzung, Bodenkarte und Hydrogeologie geschieht, ausgehend von der Lage der Station, entsprechend langjähriger mittlerer höhenabhängiger Abweichungen. Die Höhenabhängigkeit wurden aus den WaBoA-Atlastafeln 2.2 "Mittlere korrigierte Niederschlagshöhe", 2.11 "Mittlere potenzielle Verdunstungshöhe" und 2.15 "Mittlere Lufttemperaturen" entnommen. Für die Regionalisierung der Verdunstungs- und der Temperaturdaten wurden zudem die mittlere jährliche Erhöhung bzw. Reduzierung der Strahlungsenergie aufgrund der Exposition im Vergleich zu einer flachen Ebene ermittelt. Dieser Strahlungsfaktor ist der Quotient aus der mittleren jährlichen Strahlung im tatsächlichen Relief und der mittleren jährlichen Strahlung auf einer ebenen Fläche an der gleichen Stelle. Er wird mit den Faktoren aus der Höhenabhängigkeit von Temperatur und Verdunstung verrechnet. Die Kombination der Faktoren erfolgte hierbei multiplikativ. Der Faktor aus der Höhenabhängigkeit der Verdunstung ergibt sich dabei einfach als Quotient aus der langjährigen mittleren Verdunstung nach WaBoA für die jeweilige Modelleinheit und dem langjährigen mittleren Wert nach WaBoA an der Stelle der Station.

Im Falle der Temperatur musste der Faktor noch in eine absolute Temperaturdifferenz (ΔT) umgerechnet werden. Diese ergibt sich aus dem Faktor und der Jahresmitteltemperatur an der Station:

$$\Delta T = T_{\text{stat}} * F_t - T_{\text{stat}}$$

Dabei ist ΔT die absolute Temperaturkorrektur [$^{\circ}\text{C}$], T_{stat} die mittlere Jahrestemperatur an der Station und F_t der Temperaturfaktor aufgrund von Höhe und Exposition [-].

Aus diesen Faktoren ergeben sich somit für jede Modelleinheit drei weitere Parameter für das Modell. In Abbildung 1 ist beispielhaft für das Thiessen-Polygon um die DWD-Station am Flughafen

**Abbildung 1**

Verteilung der Anpassungsfaktoren [%] für Niederschlag (links) und potenzielle Verdunstung (rechts) für das Thiessen-Polygon um die DWD-Station am Flughafen Freiburg (graues Symbol).

Distribution of the factors [%] for the adaption of precipitation (left) and potential evaporation (right) within the Thiessen polygon around the station Freiburg airport (grey symbol).

von Freiburg die Verteilung der Faktoren (hier in %) für Niederschlag und potenzielle Verdunstung dargestellt.

Anhand der Stationsdaten in den Thiessen-Polygonen und der Faktoren können so die räumlichen Verteilungen der Klimaparameter für alle Ereignisse bzw. Tage ermittelt werden.

Eine Zusammenstellung der für RoGeR_WB_1D erforderlichen physischen Eingangsdaten, Klimadaten und den daraus abgeleiteten Modellparametern findet sich in STEINBRICH et al. (2021).

2.3 Abflussdaten

Für die Ableitung der abflussganglinienbasierten Ansätze standen Pegeldaten der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) mit Tagesmittelwerten des Abflusses (m^3/s) zur Verfügung. Die Auswahl der Pegel zielt darauf ab, alle wesentlichen Naturräume Baden-Württembergs abzudecken, aber fokussiert dabei auf kleinere, möglichst homogene Einzugsgebiete mit möglichst geringer anthropogener Beeinflussung des Abflusses (z. B. Kläranlagen, Stauhaltungen, Wasserentnahmen). Weiterhin waren die Länge der vorliegenden Abflusszeitreihen (mindestens 30 Jahre) und deren Vollständigkeit maßgeblich für die Auswahl. So ergab sich eine Auswahl von 91 Pegeln.

2.4 Ermittlung der langjährigen Grundwasserneubildung und des GwN-I mit RoGeR_WB_1D

Für jede der Modelleinheiten gibt es in der Attribut-Tabelle der zugrundeliegenden ArcGIS Shape-Dateien aus der oben genannten Verschneidung einen Parametersatz für RoGeR_WB_1D. Über eine eindeutige ID können die Modellergebnisse je Teilfläche wieder den Geometrie-Daten zugeordnet werden. So entsteht

je Ausgangsgröße der Modellläufe ein flächendeckender Datensatz für Baden-Württemberg. Die quantitative Ausprägung aller Komponenten des Wasserhaushaltes kann so flächendetailliert ausgegeben werden. Aus dem Verhältnis der lokalen Grundwasserneubildung (Tiefenperkolation) zum Gesamtabfluss (Oberflächenabfluss + Zwischenabfluss + Tiefenperkolation) kann so unter anderem auch der Grundwasser-Neubildungsindex (GwN-I) berechnet werden.

2.5 Methoden zur Ermittlung des BFI

Der Basisabflussindex (Baseflow-Index; BFI) ist ein quantitatives Maß, um die Speicherkapazität eines Einzugsgebiets zu bestimmen. Anhand der Speicherkapazität kann bestimmt werden, wie hoch im Mittel der Anteil von grundwasserbürtigem Abfluss (Basisabfluss) am Gesamtabfluss ist. Zahlreiche Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung beruhen auf der Annahme, dass die Neubildung über längere Zeiträume der Basisabflusssumme entspricht.

Bei der Methode nach DEMUTH (1993) werden monatliche Niedrigwasserabflüsse (MoNQ) aufsteigend sortiert aufgetragen und bis zu einem kritischen Punkt beginnend bei den niedrigsten MoNQ durch eine geradlinige und stetig ansteigende Ausgleichsgerade abgebildet. Für höhere MoNQ und höhere Ränge zeigt diese Kurve ein exponentielles Verhalten. Daher wird hier eine Beeinflussung des Abflusses durch schnellere Komponenten angenommen (z. B. während des Winterhalbjahres). Diese hohen MoNQ-Werte wie auch sehr geringe MoNQ (Messfehler) werden für die Ermittlung des Basisabflusses ausgeschlossen. Die Zielgröße ist die Identifikation des kritischen Punktes zwischen beiden Abschnitten der Approximation. Details der Methodik

sind ausführlich in DEMUTH (1993) dargelegt. Da zahlreiche höhere MoNQ-Werte in dieser Analyse verworfen werden, kann angenommen werden, dass der abgeleitete BFI nach der Demuth-Methode im Allgemeinen eher zu niedrigeren BFI-Werten im Vergleich zu anderen Methoden führt.

Die Methode der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) basiert auf einer anderen Herangehensweise (GUSTARD et al, 1992). Hierbei werden auf der Basis von 5-Tagesblöcken sogenannte Stützpunkte innerhalb der Abflusszeitreihe identifiziert. Die Stützpunkte stellen generell Abflussminima dar und werden mit benachbarten Stützpunkten verglichen und verworfen, wenn kein lokales Abflussminimum vorliegt. Die verbleibenden Stützpunkte werden durch lineare Interpolation miteinander verbunden und ergeben so die gewünschte abgetrennte Abflussganglinie des Basisabflusses. Diese Methode wird auch als "smooth minima" oder "IH-UK" (Institute of Hydrology, United Kingdom) bezeichnet und findet in der Literatur zahlreich Anwendung. Einzelheiten der Methode finden sich im Low-Flow-Manual der WMO (WMO, 2008) und auch bei STOELZLE et al. (2020). Untersuchungen haben gezeigt, dass die BFI-Abschätzung nach der WMO-Methode anfällig ist für Schneeeinfluss oder Abfluss verzögernde Strukturen, wie z. B. Seen. Daher wird angenommen, dass die BFI-Werte nach der WMO-Methode auch aufgrund der verwendeten 5-Tagesblöcke im Vergleich zu anderen Methoden eher höhere BFI-Werte aufweisen. Die Unterschiedlichkeit der DEMUTH-Methode (geringere BFI-Werte) und WMO-Methode (höhere BFI-Werte) ist auch in MEYER et al. (2011) dargestellt.

2.6 Ermittlung des Delayed Flow Index (DFI)

Die DFI-Methode erweitert den bisherigen BFI-Ansatz auf Basis der WMO-Methode. Anstatt vordefinierte 5-Tagesblöcke zur Identifikation von Minima in den Abflusszeitreihen zu verwenden, werden Abtrennungen auf Basis variabler Blockweiten durchgeführt. Dabei wird die Dauer der Tagesblöcke zwischen $N = 1$ und 120 Tagen variiert und jedes Mal ein spezifischer DFI_N-Wert zwischen 1 und 0 ermittelt. Alle DFI_N werden anschließend gegen N aufgetragen, wodurch sich eine monoton absinkende DFI_N-Kurve ergibt. Diese Kurvenform ist dabei für jedes Gebiet spezifisch, je nachdem wie viel Wasser das Gebiet im Vergleich zum Gesamtabfluss bei einer Abflussverzögerung von N Tagen verlässt. Durch diese hohe Spezifität der DFI-Methode ist davon auszugehen, dass die bisherige Bandbreite der BFI-Werte aus der DEMUTH- und WMO-Methode prinzipiell erweitert werden kann. Durch Festlegung von drei Knickpunkten kann diese Kurve in quasi-lineare Abschnitte zerlegt werden, wobei die Knickpunkte so gewählt werden, dass die Residuen der einzelnen linearen Approximationen minimal werden. Die abnehmende Steigung der einzelnen linearen Abschnitte bei größerem N wird durch die Abnahme oder das Ausbleiben schnellerer Abflusskomponenten bei fortschreitend ausbleibendem Niederschlag begründet. Das Verhältnis der DFI-Werte an den Knickpunkten ermöglicht es daraufhin, relative Anteile aus vier verschiedenen Abflussverzögerungsklassen auszuweisen: schnelle Abflüsse (Klasse S), intermediäre Abflüsse (Klasse I1 und I2), langsame Abflüsse (Klasse L). Die Methodik ist detailliert in STOELZLE et al. (2020) beschrieben.

2.7 Vergleichende Untersuchung zu den Methoden

Für 91 ausgewählte Pegel-Einzugsgebiete (Abb. 2 rechts) wurden anhand der Abflussdaten und der Modellausgaben von RoGeR_WB_1D für den Modellzeitraum 1. November 2006 bis 31. Okto-

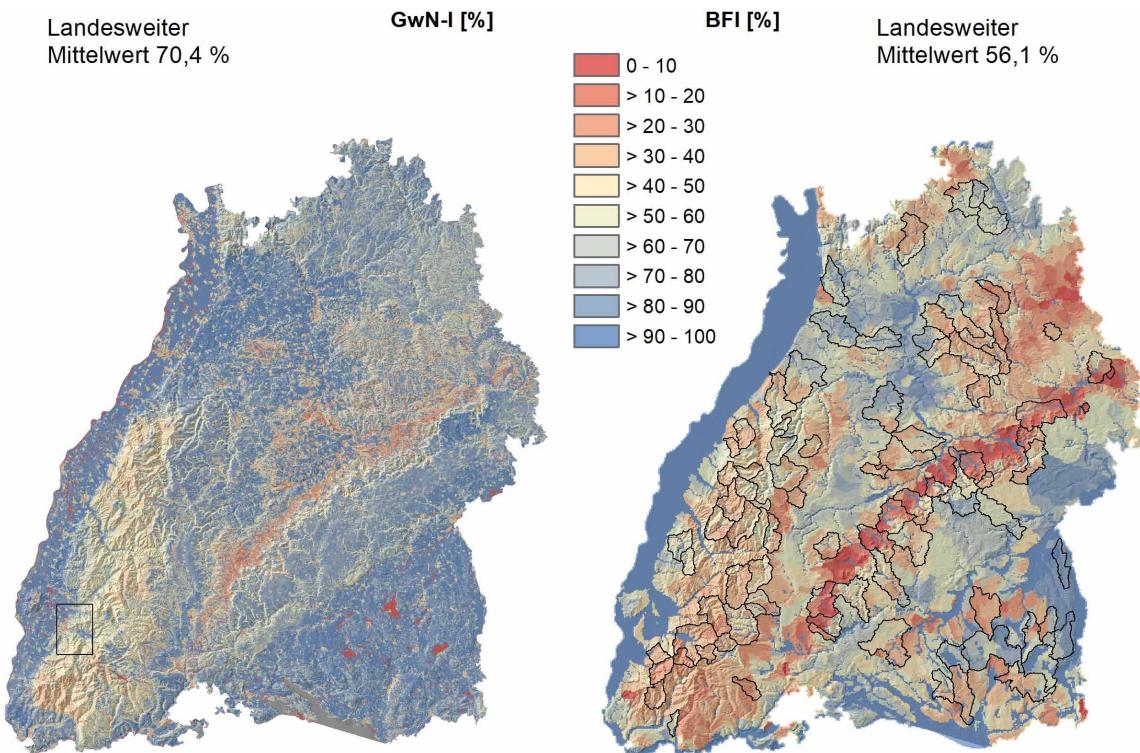
ber 2017 vergleichende Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurden aus den Modellergebnissen die langjährigen mittleren GwN-I und die Gesamtabflüsse extrahiert. Aus den Abflussdaten wurden auf Tageswert-Basis die BFI nach WMO und DEMUTH, die DFI für verschiedene Abflussverzögerungsklassen sowie die mittleren Abflusshöhen für den Modellzeitraum abgeleitet. Für die DFI-Methode wurde dann sowohl der Anteil für die langsamen Abflüsse (Klasse L) berechnet als auch der Anteil ohne die schnellen Abflüsse (Klassen I1, I2 und L). Außerdem wurden die von ARMBRUSTER (2002) auf die Landesfläche von Baden-Württemberg regionalisierten BFI den landesweit modellierten GwN-I gegenübergestellt. Schließlich wurde eine für das Thiessen-Polygon um Freiburg (Abb. 3) für den Zeitraum vom 1. Januar 2005 bis 31. Dezember 2016 durch das Büro GIT HydroS Consult auf Tageswert-Basis durchgeführte Wasserhaushalts-Modellierung mit dem Modell GWN-BW (GUDERA & MORHARD, 2015) herangezogen und die Modellergebnisse mit denen aus RoGeR_WB_1D für den Zeitraum 1. November 2006 bis 31. Oktober 2017 verglichen. Geometrische Grundlage für den Vergleich sind die bislang für GWN-BW verwendeten Verschneidungsflächen aus der Bodenübersichtskarte (BÜK), CORINE-Landnutzung und 1 km²-Raster der interpolierten Klimadaten. Für diese Geometrien wurden die Flächen-Mittelwerte der Wasserhaushaltsgrößen aus dem aktuellen Modellauf mit RoGeR_WB_1D bestimmt und den Werten aus GWN-BW gegenübergestellt. Die Modellzeiträume von GWN-BW und RoGeR_WB decken sich nicht genau. Vom Zeitraum 1. Januar 2005 bis 31. Oktober 2017 werden aber rund 80 % von beiden Modellen abgedeckt. Auch unterscheidet sich der mittlere Jahresniederschlag der beiden Zeitreihen an der für beide Modelle maßgeblichen Niederschlagstation "Freiburg" nur geringfügig (1. Januar 2005 bis 31. Dezember 2016, 876 mm; 1. November 2006 bis 31. Oktober 2017, 852 mm). So kann der Vergleich als repräsentativ angesehen werden.

3 Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die landesweite räumliche Verteilung der GwN-I den von Armbruster (2002) regionalisierten BFI nach DEMUTH (1993) gegenübergestellt. Dabei ist generell eine ähnliche räumliche Gliederung erkennbar. Die GwN-I weisen jedoch einen viel höheren räumlichen Detaillierungsgrad auf. Im landesweiten Mittel liegen die GwN-I-Werte höher als die BFI-Werte nach ARMBRUSTER. Insbesondere im Rheingraben fällt die starke Strukturierung der GwN-I-Werte im Vergleich zur einheitlichen Fläche der BFI-Werte (90 bis 100 %) auf. Im Schwäbisch-Fränkischen Lias (Nordosten) und im Odenwald (Norden) werden von den regionalisierten BFI deutlich geringere Grundwasseranteile am Gesamtabfluss ausgegeben als von den GwN-I.

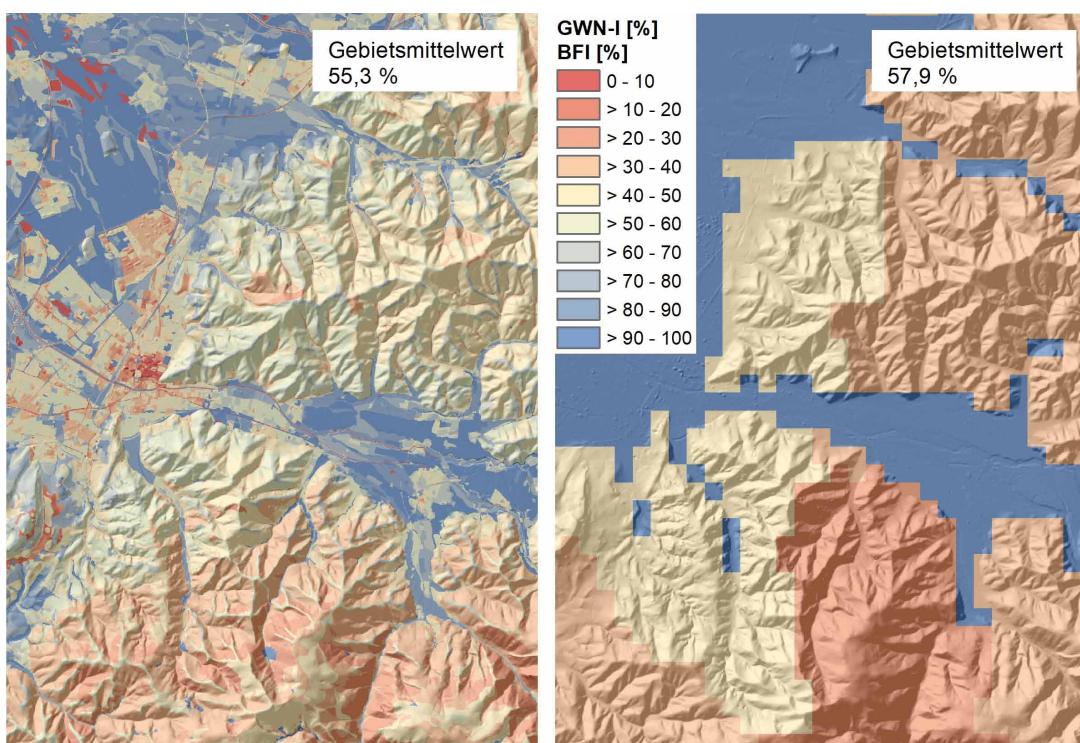
Abbildung 3 zeigt den in Abbildung 2 unten links dargestellten Ausschnitt bei Freiburg. Hier wird die höhere Strukturdichte der GwN-I im Vergleich zu den regionalisierten BFI besonders deutlich. Das Zartener Becken und der Rheingraben weisen bei den BFI einheitlich die höchste Klasse auf, während durch die GwN-I die Wirkung verschiedener Situationen im Untergrund oder Versiegelungsgrade berücksichtigt werden. So ist die Lage der Stadt Freiburg und insbesondere die dicht bebauten Innenstadt deutlich an geringeren GwN-I erkennbar.

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der für die Einzugsgebiete ermittelten mittleren GwN-I-Werte gegen BFI- bzw. DFI-Werte aus den oben genannten Ansätzen. Generell ist eine starke Streuung

**Abbildung 2**

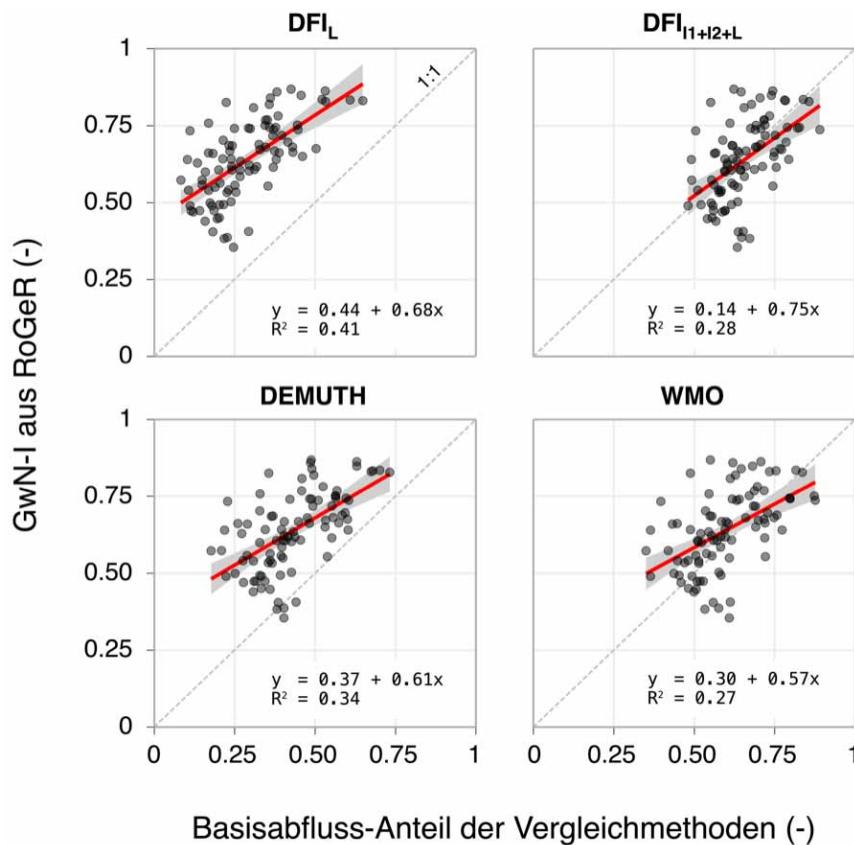
Landesweite Verteilung von GwN-I (links) und der von ARMBRUSTER (2002) regionalisierten BFI (rechts) mit Lage der für diese Untersuchung ausgewählten Pegeleinzugsgebiete (rechts). Die Lage des vergrößerten Ausschnitts in Abbildung 3 um Freiburg ist in der linken Karte markiert.

Distribution of GwR-I (left) and BFI regionalized by ARMBRUSTER (2002) (right) for the state of Baden-Württemberg. Position of the catchment areas used for this investigation (right). The zoom area around Freiburg (cf. Fig. 3) is shown on the GwN-I map of this figure.

**Abbildung 3**

Verteilung von GwN-I (links) und der regionalisierten BFI von ARMBRUSTER (2002) (rechts) für die Region um Freiburg, inklusive der Schummerung der Topographie.

Distribution of GwR-I (left) and BFI (right), regionalized by ARMBRUSTER (2002) within the region around Freiburg, highlighted by shading of topography.

**Abbildung 4**

Vergleich des GwN-I (y-Achse) gegen verschiedene DFI (oben) und BFI (unten) (x-Achse) für 91 Einzugsgebiete in Baden-Württemberg. Zwei sehr kleine, teils verkarstete Einzugsgebiete sind aus dieser Analyse entfernt worden.

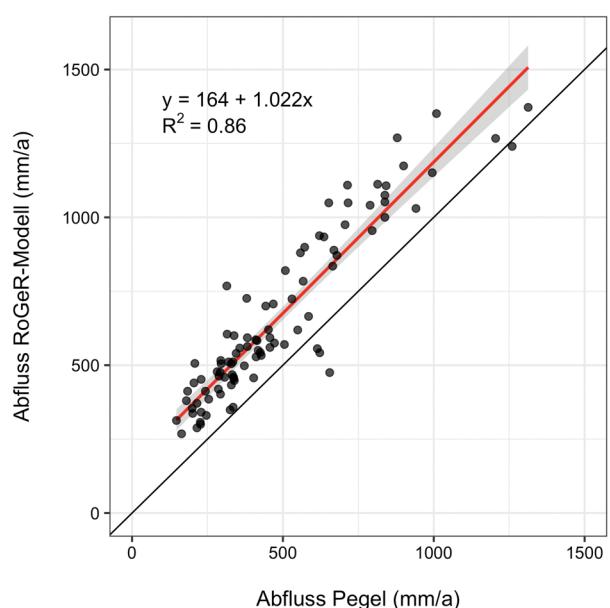
Comparison of GwR-I (y-axis) against diverse DFI and BFI (x-axis) over 91 catchments within the state of Baden-Württemberg. Two very small, partly karstic catchments are excluded from this analysis.

der GwN-I zu den BFI- bzw. DFI-Werten festzustellen. Im Verhältnis zum Verfahren nach DEMUTH (1993) und den langsamen Abflussanteilen in der DFI-Methode (DFIL) nach STOELZLE et al. (2020) liegen die ermittelten GwN-I alle über der 1:1-Linie. Im Vergleich zu den BFI nach WMO und den DFI aus langsamem und intermediären Komponenten (DFI_{I1+I2+L}) streuen die GwN-I um die 1:1-Linie.

Die Gegenüberstellung der modellierten Abflusshöhen (Oberflächenabfluss + Zwischenabfluss + Tiefenperkolation) mit den gemessenen Abflusshöhen (Abb. 5) zeigt, dass die modellierten Abflusshöhen generell höher als die gemessenen, aber tendenziell ähnlich ausfallen.

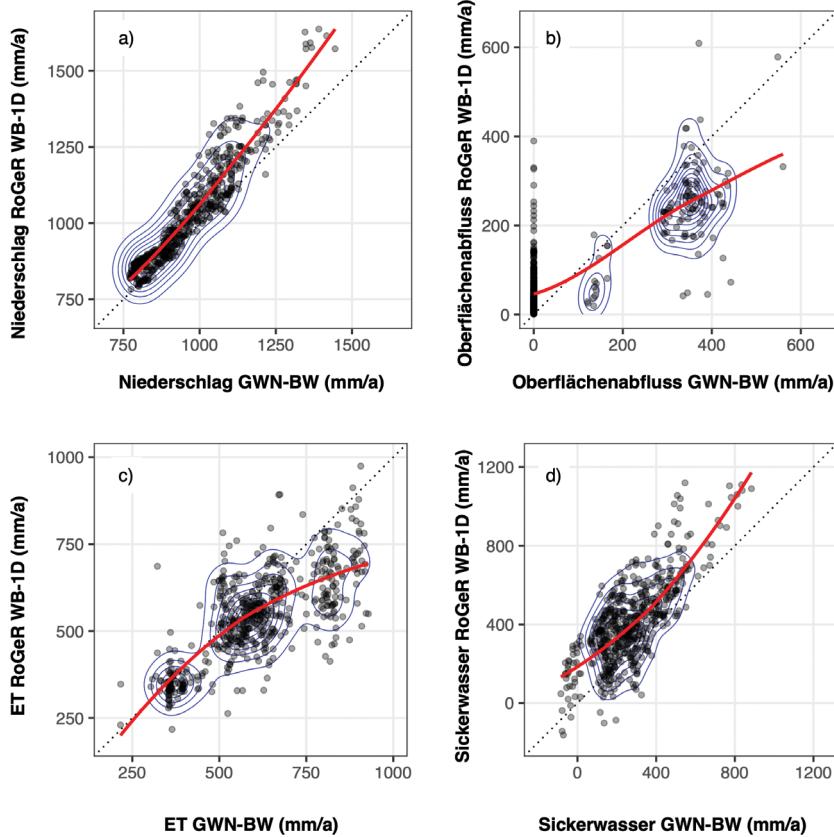
In Abbildung 6 sind Modellergebnisse von RoBeR_WB_1D (1. November 2006 bis 31. Oktober 2017) und GWN-BW (1. Januar 2005 bis 31. Dezember 2016) für das Thiessen-Polygon um Freiburg gegenübergestellt. Jeder Punkt entspricht hier einer dem Modell GWN-BW zugrundeliegenden Verschneidungsfläche (Modelleinheit in GWN-BW) von BÜK, CORINE-Landnutzung sowie dem 1 km²-Raster der in GWN-BW interpolierten Klimadaten. Die Werte aus GWN-BW stammen direkt aus den GWN-BW-Modellergebnissen für diese Flächen. Die Werte aus RoGeR_WB_1D sind die Mittelwerte für diese Flächen aus einem hinterlegten 5 * 5 m²-Raster, das dafür aus den RoGeR_WB_1D Modelleinheiten abgeleitet wurde. Die Sickerwassermenge entspricht

in beiden Modellen dem Wasser, das für die Grundwasserneubildung und den Zwischenabfluss vor der Auf trennung zur Verfügung steht. Da bei der Bilanzierung des Sickerwassers der kapillare Aufstieg mit eingeht, können auf manchen Flächen auch negative Werte auftreten. Die verwendete Eingangsgröße für den Niederschlag ist bei GWN-BW fast auf allen Modelleinheiten geringer als der im Modell RoGeR_WB_1D, wobei die Abweichung für hohe Niederschlagswerte zunimmt. Hier zeichnet sich bei den Niederschlags-Eingangsdaten von RoGeR_WB_1D eine stärkere Höhenabhängigkeit ab als bei den entsprechenden Eingangsdaten für GWN-BW. Der Oberflächenabfluss deckt in RoGeR_WB_1D recht kontinuierlich den gesamten Bereich zwischen 0 und 600 mm ab. In GWN-BW gibt es viele Flächen, die gar keinen Oberflächenabfluss generieren, während von RoGeR_WB_1D für diese Flächen zum Teil beträchtliche Mengen an Oberflächenabfluss ausgegeben werden (versiegelte oder teilversiegelte Flächen). Auch wenn viele Punkte unter der 1:1-Linie plotten, fällt daher der Oberflächenabfluss in GWN-BW im flächengewichteten Mittel deutlich geringer aus als in RoGeR_WB_1D (Tab. 2). Im Modell GWN-BW liegt die Verdunstung tendenziell deutlich über der von RoGeR_WB_1D. Der höhere Niederschlag und die geringere Verdunstung führen in erster Linie zu den höheren Sickerwassermengen in RoGeR_WB_1D.

**Abbildung 5**

Mittlere jährliche Abflusshöhen aus dem Modell RoGeR_WB_1D gegen mittlere jährliche Abflusshöhen aus den an den Pegeln gemessenen Daten.

Average annual discharge sum by the model RoGeR_WB_1D in comparison with the measured values.

**Abbildung 6**

Vergleich des Niederschlags (a) und der modellierten Wasserhaushaltgrößen (b-d) in den Modellen RoGeR_WB_1D (y-Achse) und GWN-BW (x-Achse) auf Basis der GWN-BW-Verschneidungsflächen im Thiessen-Polygon um Freiburg ($n = 545$). Die gestrichelte Linie ist die 1:1-Linie, Dichtelinien (in blau) zeigen die 2D-Verteilung des Niederschlags/der Modellgrößen. Die rote Linie zeigt Local Polynomial Regression Fitting (d. h. eine nicht-lineare Regression) mit Parameter Alpha $a = 1$ als Grad der Glättung. Für Sickerwasser (d) treten auch negative Werte auf.

Comparison of precipitation (a) and modelled water balance values (b-d) of the models RoGeR_WB_1D (y-axis) and GWN-BW (x-axis) based on the GWN-BW model units within the Thiessen polygon around Freiburg ($n = 545$). Dashed line is the 1:1 line. Density lines (blue) show the 2D distribution of the values. The red line shows local polynomial regression fitting (i.e., non-linear regression) with parameter alpha $a = 1$ as degree of smoothing.

In Tabelle 2 sind die flächengewichteten Mittelwerte für das Thiessen-Polygon um Freiburg zusammengestellt.

Die Eignung von RoGeR_WB_1D, den Wasserhaushalt ohne Kalibrierung adäquat abzubilden, wurde ausgiebig untersucht. Für drei Großlysimeter mit den Landnutzungen Wiese, Laubwald

sich am deutlichsten in der kleinen Skale. Ursache ist hier die hohe Auflösung der Eingangsdaten für RoGeR_WB_1D, vor allem bezüglich der Versiegelungsgrade. Großflächige Abweichungen in zwei Regionen beruhen auf der unterschiedlichen Bewertung der geologischen Einheiten durch den Regionalisierungsansatz und das Modell RoGeR.

Die starke Streuung der Gwn-I-Werte zu den BFI-DFI-Werten überrascht in Anbetracht der Verschiedenheit der Ansätze nicht. Die Gwn-I sind prozessbasiert abgeleitet. Die Aufteilung des Sickerwassers in Zwischenabfluss und Tiefenperkolation ist dabei stark beeinflusst von der Parametrisierung der vertikalen Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes. Diese Eingangsinformation ist jedoch mit großer Unsicherheit behaftet. Mit der Aufteilung ist zunächst keine Aussage über die Reaktionszeit verbunden. Sowohl ein schneller Zwischenabfluss als auch ein

Tabelle 2

Flächengewichtete jährliche Mittelwerte der Modelle RoGeR_WB_1D und GWN_BW für das Thiessen-Polygon bei Freiburg.
Surface weighted annual mean over the Thiessen polygon around Freiburg.

| | RoGeR_WB_1D | GWN_BW | Differenz |
|--------------------------|-------------|--------|-----------|
| Niederschlag (N) | 1058 | 997 | 61 |
| Evapotranspiration (ETP) | 587 | 645 | -58 |
| N-ETP | 471 | 352 | |
| Oberflächenabfluss | 62 | 43 | 19 |
| Sickerwasser | 413 | 284 | 129 |
| Gesamtabfluss | 475 | 327 | |

schneller Grundwasseraufschwung können zum Teil schon innerhalb von Stunden bis wenigen Tagen am Pegel ankommen. Die Aufteilung der Abflusskomponenten der Abflussganglinie erfolgt dagegen aufgrund der Reaktionszeit auf Basis von Tageswerten. Damit ist wiederum nicht zwangsläufig ein Entstehungsprozess verbunden. Die verschiedenen Ansätze zum BFI bzw. DFI quantifizieren Speicher, die langsam bzw. verzögert leerlaufen. Der GwN-I quantifiziert den Anteil des Sickerwassers, der dem Grundwasser zufließt, wobei die Reaktionszeit im Gewässer durchaus auch schnell sein kann. Gewichtige Vorteile der hier vorgestellten Methodik zur Ableitung eines GwN-I im Vergleich zu den ganglinienbasierten Verfahren sind die hohe räumliche Auflösung und die prozessbasierte Modellierung. Da mit dem Modell flächendeckend für das ganze Land GwN-I ermittelt werden können, ist kein Regionalisierungsansatz für Gebiete ohne Pegel erforderlich. Unsicherheiten bezüglich der Modelleingangsdaten (z. B. Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes) bestehen auch bezüglich der Eingangsdaten für die Regionalisierungsansätze. Zudem ist bei diesen Ansätzen der kausale Zusammenhang zwischen Zielgrößen und Prädiktoren meist unklar.

Die Anwendung von (regionalisierten) BFI zur Aufteilung des Sickerwassers in Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung in Wasserhaushaltsmodellen berücksichtigt zudem nicht den Einfluss der Sickerwasserrate auf den Prozess der Aufteilung. Im Modell RoGeR_WB_1D gelangt Sickerwasser bei geringen Raten meist vollständig ins Grundwasser, während der Anteil von Zwischenabfluss mit höheren Raten zunimmt.

Es gibt mehrere mögliche Erklärungen dafür, dass der mit RoGeR_WB_1D modellierte Gesamtabfluss im Vergleich zu den Pegeln zu hoch ausfällt. Zum einen muss davon ausgegangen werden, dass nicht alles Wasser aus dem Gebiet vom Pegel erfasst wird, da auch im Untergrund Wasser abfließen kann. Zum anderen legt der Vergleich mit dem Modell GWN-BW nahe, dass RoGeR den Niederschlag eventuell zu hoch abbildet und die Verdunstung möglicherweise unterschätzt. Letzteres steht allerdings im Widerspruch zu den Modellergebnissen an Lysimetern und Bodenfeuchte-Messstellen. Für die Ableitung der GwN-I spielt eine mögliche Überschätzung der langjährigen mittleren Sickerwassermenge jedoch eine eher marginale Rolle, da die Aufteilung des Sickerwassers im Untergrund vor allem von der Intensität der Sickerwasserrate während einzelner Niederschlags- oder Schneeschmelzeereignisse abhängt.

5 Zusammenfassung

Der hier vorgestellte Grundwasser-Neubildungs-Index (GwN-I) bietet aufgrund der räumlich differenzierten, zeitlich hoch aufgelösten und prozessbasierten Ableitung mit dem Wasserhaushaltsmodell RoGeR_WB_1D die Möglichkeit, den Anteil der Grundwasserneubildung am Sickerwasser flächendeckend und räumlich hoch aufgelöst zu ermitteln. Damit entfällt die Notwendigkeit der Analyse von Abflusszeitreihen und Regionalisierungsansätzen. Im Vergleich zum regionalisierten Baseflow-Index (BFI) in Baden-Württemberg bildet der GwN-I ähnliche regionale Muster, wobei die räumliche Gliederung beim GwN-I wesentlich detaillierter ist. Im Vergleich mit aus Pegeldaten von 91 Einzugsgebieten abgeleiteten BFI und DFI (Delayed Flow Index) liegen die GwN-I im Bereich der Vergleichsmethoden, die teils auch mittelschnelle Komponenten der Abflussganglinie berücksichtigen. Im Vergleich zu Methoden, die nur langsame Komponenten ein-

beziehen, fallen die GwN-I generell höher aus. Insgesamt streuen die GwN-I stark um die Werte aus den BFI/DFI-Methoden, was aufgrund der Unterschiede in der Methodik nicht überraschend ist.

Der quantitative Vergleich der Wasserhaushaltskomponenten aus RoGeR_WB_1D und GWN-BW weist auf eine Überschätzung des Niederschlags als Eingang in das Modell RoGeR_WB_1D hin. Die aktuelle Verdunstung liegt in RoGeR_WB_1D unter der von GWN-BW. Beides bedingt höhere Sickerwasserraten in RoGeR_WB_1D. Modellvalidierungen von RoGeR_WB_1D anhand von Lysimeterdaten verschiedener Landnutzungen gaben jedoch keine Hinweise auf eine systematische Unterschätzung der Verdunstung durch RoGeR_WB_1D. Der Effekt einer möglichen Überschätzung der langjährigen mittleren Sickerwassermenge durch RoGeR auf die Aufteilung des Sickerwassers in Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung dürfte allerdings eher marginal sein.

Conclusion

The GwR-I offers the possibility to quantify the share of groundwater recharge on total runoff in spatial high resolution without using observed discharge data or a regionalization approach. This is possible because of the process based and spatial distributed modelling approach of the based model RoGeR_WB_1D.

In comparison to the BFI, regionalized across Baden-Württemberg, the GwR-I shows comparable regional patterns. In detail, spatial variability of GwR-I is considerably higher than the regionalized BFI. The mean GwR-I for 91 catchments lies within the range of BFI/DFI-values derived from hydrograph separation that include slow and intermediate discharge components. BFI/DFI-values derived by methods including only the slowest flow components led to considerably lower values compared to the GwR-I. Generally, a more pronounced variability of the GwR-I compared to the BFI/DFI was detected across 91 study catchments. This is not surprising, taking the differences between the presented approaches into account.

The quantitative comparison of the components of the water balance modelled by GWN-BW and RoGeR_WB_1D indicates that the precipitation input data for RoGeR might be overestimated. Actual evapotranspiration in RoGeR was less than in GWN-BW, which, together with the higher precipitation, led to more percolation water in RoGeR than in GWN-BW. However, validation runs of RoGeR_WB_1D with lysimeter data from different land uses did not show any tendency of RoGeR to underestimate evapotranspiration.

A hypothetic overestimation of long time mean of percolation water by RoGeR would affect the process of the division into interflow and groundwater recharge only marginally because the division of percolating water into lateral subsurface flow and vertical groundwater recharge is mainly triggered by the intensity of percolation during single precipitation or snowmelt events.

Danksagung

Die Autoren danken der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, die das "Forschungsprojekt zur Erarbeitung von Grundlagen für die landesweite Abschätzung der Vulnerabilität von Grundwasser gegenüber Stoffeinträgen durch Sickerwasser

und eines flächendetaillierten Grundwasserneubildungs-Indexes (GwN-I)" finanziert hat, aus dem die vorgestellten Ergebnisse stammen, sowie dem Ingenieur-Büro GIT HydroS Consult für die Bereitstellung von Modellergebnissen aus GWN-BW für das Thiessen-Polygon um Freiburg.

Anschrift der Verfasser

Andreas Steinbrich

Hannes Leistert

Prof. Dr. Markus Weiler

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Professur für Hydrologie

Friedrichstr. 39, 79098 Freiburg i. Br.

andreas.steinbrich@hydrology.uni-freiburg.de

hannes.leistert@hydrology.uni-freiburg.de

markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Dr. Michael Stölzle

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Professur für Umwelthydrosysteme

Friedrichstr. 39, 79098 Freiburg i. Br.

michael.stoelzle@hydrology.uni-freiburg.de

Die während der aktuellen Studie erzeugten Datensätze stehen im Repository [FreiDoc plus] zur Verfügung [<https://freidok.uni-freiburg.de/data/223621>].

Literatur

ANDERSON, M.G. & T.P. BURT (1990): Subsurface runoff. In: Anderson, M.G.; Burt, T.P. (Hrsg.), Process studies in hillslope hydrology, Chichester, John Wiley & Sons, S. 365–400.

ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 2002; 17, Institute of Hydrology (Hrsg.).

DEMUTH, S. (1993): Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 1993; 1, Institute of Hydrology (Hrsg.).

DWA (2020): Merkblatt DWA-M 922 "Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung". Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.).

GUDERA, T. & A. MORHARD (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 59 (5), 205–216. DOI: 10.5675/HyWa_2015,5_1.

GUSTARD, A., BULLOCK, A. & J.M. DIXON (1992): Low flow estimation in the United Kingdom, Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 108, 88.

HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H. & F. WENDLAND (2013): Zeitlich und räumlich hochauflöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Modell mGROWA. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 57 (5), 206–224. DOI: 10.5675/HyWa_2013,5_2.

KIRKBY, M. (1988): Hillslope runoff processes and models. Journal of Hydrology 100 (1988) 325–339.

LEISTERT, H., STEINBRICH, A., SCHÜTZ, T. & M. WEILER (2018): Wie kann die hydrologische Komplexität von Städten hinreichend in einem Wasserhaushaltsmodell abgebildet werden? In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 39.18, M³ – Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 in Dresden. Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Gundermann (Herausgeber). Technische Universität Dresden, Professur für Hydrologie. Dresden 2018.

MEYER, R., SCHÄDLER, B., VIVIROLI, D. & R. WEINGARTNER (2011). Die Rolle des Basisabflusses bei der Modellierung von Niedrigwasserprozessen in Klimaimpaktstudien. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 55 (5), 244–257.

STEINBRICH, A., LEISTERT, H. & M. WEILER (2021): RoGeR – ein bodenhydrologisches Modell für die Beantwortung einer Vielzahl hydrologischer Fragen. In Korrespondenz Wasserwirtschaft, 14. Jahrgang, Heft Nr. 2, Februar 2021. DOI: 10.3243/kwe2021.02.004.

STEINBRICH, A., LEISTERT, H. & M. WEILER (2020): Forschungsprojekt zur Generierung von einheitlichen Datengrundlagen für die hydraulische Modellierung von Starkregenereignissen, Projektbericht an die LUBW 2020, unveröffentlicht.

STEINBRICH, A., HENRICHS, M., LEISTERT, H., SCHERER, I., SCHÜTZ, T., UHL, M. & M. WEILER (2018): Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushalts als Planungsziel für Siedlungen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 62 (6), 400–409. DOI: 10.5675/HyWa_2018,6_3.

STEINBRICH, A., LEISTERT, H. & M. WEILER (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environmental Earth Sciences, 75:1423. DOI: 10.1007/s12665-016-6234-9.

STOELZLE, M., SCHUETZ, T., WEILER, M., STAHL, K. & L.M. TALLAKSEN (2020): Beyond binary baseflow separation: a delayed-flow index for multiple streamflow contributions, Hydrol. Earth Syst. Sci., 24, 849–867. DOI: 10.5194/hess-24-849-2020.

UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG, STUTTGART (2001): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 4. Lieferung 2012.

WMO (2008): Manual on Low-flow Estimation and Prediction – Operational Hydrology Report No. 50, edited by A. Gustard and S. Demuth, World Meteorological Organization, 1029, 136.

WEILER, M. & J. MCDONNELL (2004): Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology. Journal of Hydrology 285, 3–18.