

Benjamin Kopp, Christoph Baumeister, Thomas Gudera, Mario Hergesell, Jochen Kampf, Andreas Morhard und Jörg Neumann

Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015

Changes in soil water balance and groundwater recharge in Baden-Wurttemberg, Bavaria, Rhineland-Palatinate and Hesse from 1951 to 2015

Für zahlreiche Fragestellungen aus Ökologie und Wasserwirtschaft sind Kenntnisse über die Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts, der Sickerwasserbildung und der flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag von Bedeutung. Erstmals wurden nun, unter Anwendung des Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW, an den Landesbehörden von Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen gemeinsame flächendeckende Simulationen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für den Zeitraum 1951 bis 2015 durchgeführt.

Seit Ende der 1980er Jahre wird in allen Bundesländern eine hoch signifikante Erwärmung (Mann-Kendall Trend Test (MK-Test); $p < 0.05$) beobachtet. Diese führte zu einem spürbaren Anstieg der potentiellen Verdunstung (MK-Test; $p < 0.05$ seit 2003), zu einer engeren klimatischen Wasserbilanz und, insbesondere in der jüngeren Vergangenheit, zu abnehmenden Gesamtabfluss- und Grundwasserneubildungsraten. Gleichzeitig erhöhte sich der Trockenheitsindex (Anzahl an Tagen mit Füllung des Bodenwasserspeichers $< 30\%$ der nutzbaren Feldkapazität), was einen Hinweis auf eine Zunahme von Trockenperioden gibt. Ein Schwerpunkt der Betrachtung in diesem Artikel liegt auf der jüngeren Vergangenheit (2011 bis 2015), die im Vergleich zum langjährigen Mittel erheblich trockener ausfiel und die Wasserwirtschaft teilweise bereits vor Herausforderungen hinsichtlich eines Niedrigwassermanagements stellte. Hieraus wird die Notwendigkeit ersichtlich, den sich regional entwickelnden Konflikten zwischen Trinkwasserversorgung und konkurrierenden Nutzungen (z. B. landwirtschaftliche Bewässerung, Industrie) durch die Ausarbeitung und Umsetzung regionaler Anpassungsmaßnahmen und Managementpläne vorzubeugen.

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

Many issues in the field of ecology and water management require knowledge of the soil water balance, percolation and groundwater recharge from precipitation. By applying the soil water balance model GWN-BW, now, for the first time, joint extensive simulations for the period from 1951 to 2015 in high spatial and temporal resolution have been performed by the public authorities in Baden-Wurttemberg, Bavaria, Rhineland-Palatinate and Hesse.

The highly significant warming trend (Mann-Kendall Trend Test (MK-Test); $p < 0.05$) since the end of the 1980s results in increased potential evapotranspiration (MK-Test; $p < 0.05$ since 2003), narrowing the climatic water balance. Thus, especially in the younger past, a declining trend in total runoff and groundwater recharge occurred. At the same time, the drought index (number of days with soil water content $< 30\%$ of the available water capacity) increased, which indicates a rising number of drought periods. A focus of this study is on the recent past (2011 to 2015), which was remarkably drier compared to the entire period and partly challenged water management in regard to low water conditions. The observed development during the recent years points out the necessity to manage emerging conflicts between the need for a supply of drinking water and competing utilizations (e.g. agricultural irrigation, industry). Thus, regional measures and management plans need to be developed.

Keywords: drought index, groundwater recharge, groundwater resources, GWN-BW, percolate water, soil water balance

1. Einleitung

Unter den Bilanzgrößen des Wasserhaushalts kommt der flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag eine besondere Bedeutung zu. Als „Bilanzrest“ stellt sie eine regional besonders sensitive Größe im Hinblick auf Änderungen des Klimas dar. Im Gegensatz zu anderen Wasserhaushaltsgrößen kann die Grundwasserneubildung in der Regel nicht direkt gemessen werden. Der Anwendung entsprechender Modelle kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

Als bundesweite Karte wurde die mittlere jährliche Grundwasserneubildung (Tafel 5.5) innerhalb des Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD) (BMU, 2003) sowie im Nationalatlas Deutschland (IfL, 2003) veröffentlicht. Die Berechnungen basieren auf

dem Verfahren HAD-GWNeu (NEUMANN, 2009), das wiederum auf der mittleren jährlichen Gesamtabflusshöhe gemäß HAD-Tafel 3.5 aufsetzt. Die Konzeption der beiden Karten sowie ein methodischer Vergleich mit der Tafel 4.5 Sickerwasserrate sind in JANKIEWICZ et al. (2005) beschrieben.

Diese deutschlandweiten Daten sind für viele regionale Fragestellungen der Wasserwirtschaft nur bedingt geeignet. Dementsprechend werden vor allem auf Ebene der Bundesländer Modelle in höherer räumlicher Auflösung zur Ermittlung der Grundwasserneubildung eingesetzt. Neben regionalen Ansätzen, wie z. B. dem Ansatz nach Meßer (MEßER, 1997) für das Ruhrgebiet sind hier das überwiegend in den nördlichen Bundesländern angewendete Wasserhaushaltsmodell mGROWA (z. B. HERRMANN et al., 2013), sowie das in Süddeutschland flächendeckend einge-

setzte und im Folgenden näher beschriebene Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW zu nennen (GUDERA & MORHARD, 2015; KLIWA, 2012; KLIWA, 2017).

In Süddeutschland basiert die öffentliche Trinkwasserversorgung zum überwiegenden Teil auf der Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen (Baden-Württemberg 66 %, Bayern 93 %, Hessen 99 %, Rheinland-Pfalz 84 %) (DESTATIS, 2013). Somit spielt die Grundwasserneubildung eine wesentliche Rolle für die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung. Änderungen der Grundwasserneubildungsrate als Folge des Klimawandels haben daher direkte Auswirkungen auf die Grundwasservorkommen (DWA, 2011), die Versorgungssicherheit und die Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung.

Das Kooperationsvorhaben KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft; www.kliwa.de) der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hat zum Ziel, den Klimawandel in Süddeutschland und damit verbundene Auswirkungen auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Ergänzend zu den in die Zukunft gerichteten, länderübergreifenden Szenariosimulationen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW (KLIWA, 2012; KLIWA, 2017) wurde nun mit Beteiligung von Hessen (MORHARD, 2015) eine Langzeitsimulation für den Zeitraum 1951 bis 2015 durchgeführt. Damit liegen erstmalig für den gesamten süddeutschen Raum methodisch vergleichbare und auf weitgehend einheitlicher physiographischer Datengrundlage (Landnutzung, Böden, etc.) basierende Ergebnisse für die wichtigsten Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts und der flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag vor. Im Mittelpunkt dieses Beitrags steht die zeitliche Entwicklung der Zustands- und Wasserbilanzgrößen im Zeitraum 1951 bis 2010 sowie im vergleichsweise trockenen Zeitraum 2011 bis 2015.

2. Modellkonzeption und -parametrisierung

Das im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung verwendete Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW ist ein modular aufgebautes, deterministisches und flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. In den einzelnen Teilmodulen kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Anwendung (Abb. 1).

Das in GWN-BW verwendete Interzeptionsmodul beschreibt die Interzeption von Niederschlagswasser in mehreren Schichten der Vegetationsdecke und auf versiegelten Flächen (ARMBRUSTER, 2002). Das Transpirationsmodul basiert auf der Penman-Monteith-Gleichung und kann wahlweise mit dem Verdunstungsmodell TRAIN (MENZEL, 1999) sowie dem modelleigenen Ansatz „Persephone“ betrieben werden (MORHARD, 2009). Letzterer wurde im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung angewendet. Der Ansatz

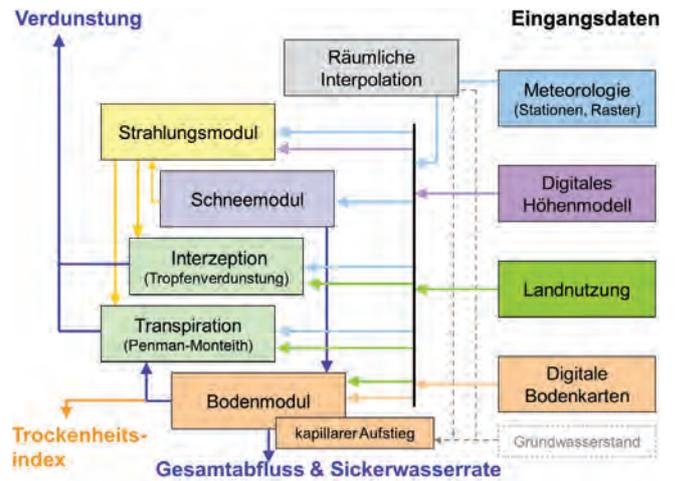


Abbildung 1
Schematische Darstellung des modularen Aufbaus des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und der benötigten Eingangsparameter.
Modular structure and input data required by the soil-water balance model.

verwendet für die Verdunstungsberechnung landnutzungsspezifische Parameter, welche eine witterungsabhängige Beschreibung der Eintrittszeitpunkte phänologischer Entwicklungsphasen erlauben („dynamisierte Vegetationsperiode“). Dabei werden die Zeitpunkte zu denen die Vegetation einen bestimmten Entwicklungsstand erreicht nicht statisch höhenabhängig, sondern standort- und witterungsabhängig über Temperatursummen berechnet. Der Bodenspeicher wird durch die nutzbare Feldkapazität beschrieben (Abb. 3a), über den Niederschlag aufgefüllt und durch die Verdunstung (Evaporation und Transpiration) sowie ggf. Versickerung entleert. In Auenbereichen mit direkter Grundwasseranbindung der Böden trägt kapillarer Aufstieg zur Füllung des Bodenspeichers bei. Die Berechnung des kapillaren Aufstiegs erfolgt gemäß der Methode der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Für eine nähere Beschreibung der im Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW implementierten Module wird auf GUDERA & MORHARD (2015) verwiesen.

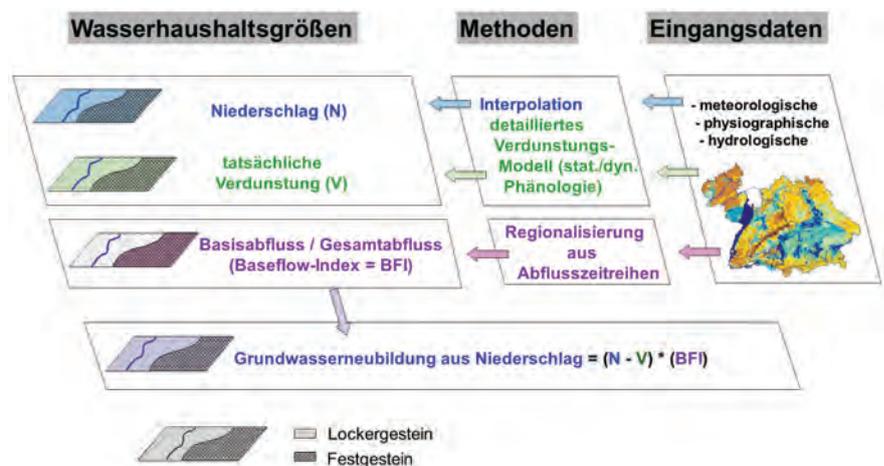


Abbildung 2
Grundkonzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.
Conceptual outline for calculation of groundwater recharge induced by precipitation.

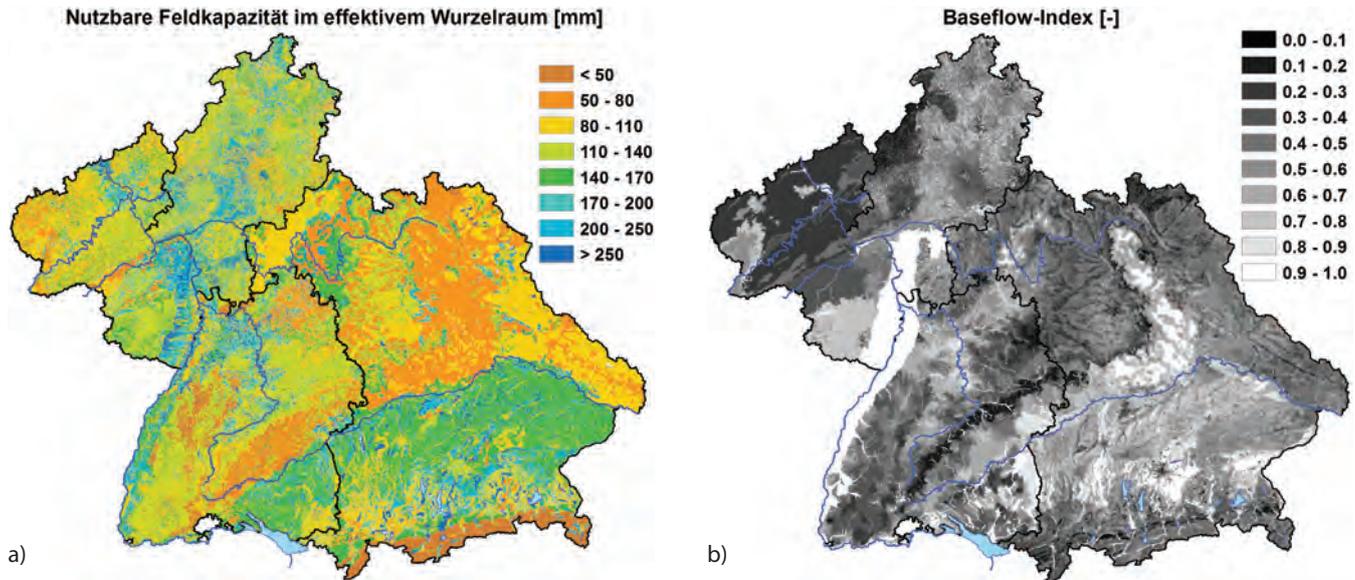


Abbildung 3
 Verteilung der nutzbaren Feldkapazität (mm) im effektiven Wurzelraum (a). Regionalisierter Baseflow-Index (BFI) als Quotient aus Basis- und Gesamtabfluss zur Bestimmung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag (b).
Distribution of the available water capacity (mm) within the effective rooting depth (a). Regionalized Baseflow-Index (BFI) as quotient of baseflow and total runoff to determine groundwater recharge from precipitation (b).

Die berechnete Sickerwasserrate entspricht in Gebieten mit vernachlässigbaren schnellen lateralen Abflusskomponenten (z. B. im Bereich der meist in Ebenen und Senken gelegenen Porengrundwasserleiter) näherungsweise der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. In Gebieten mit nennenswerten schnellen lateralen Abflusskomponenten (z. B. in den Mittelgebirgen bzw. den meisten Festgesteinsgrundwasserleitern) ist zur Ermittlung der Grundwasserneubildung eine Reduktion der Sickerwasserrate mit dem Baseflow-Index (BFI) erforderlich (Abb. 2, 3b).

Der meteorologische Antrieb für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung beruht auf Tageswerten für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windstärke. Vor der Durchführung der Langzeitsimulation von 1951 bis 2015 wurden die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellten Stationsdaten (Tageswertreihen) aufbereitet. Dies beinhaltet eine umfangreiche Plausibilitätsprüfung der Tageswertreihen (MORHARD, 2013; MORHARD, 2015).

Als Niederschlagsdaten wurden die unkorrigierten, in täglicher Auflösung vorliegenden REGNIE-Rasterdaten des DWD verwendet. Die Methode REGNIE (Regionalisierung von Niederschlagshöhen) basiert im Wesentlichen auf der Interpolation von Anomalien in Bezug auf langjährige Mittelwerte und beinhaltet die Berechnung von allgemeinen Hintergrund- und Niederschlagsfeldern (RAUTHE et al., 2013).

3. Physiographische Eingangsdaten

Das Modell GWN-BW benötigt physiographische Daten, die aus dem Höhenmodell, der CORINE-Landnutzung und der Boden-

Tabelle 1 Physiographische Datengrundlagen für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW in den vier Bundesländern. <i>Physiographic data basis for the soil-water balance modelling with GWN-BW in the four federal states.</i>					
Land	Fläche km ²	Anzahl der Grundflächen	Landnutzung	Bodenkarte	Höhenmodell
Baden-Württemberg	35.738	65.645	CORINE 2000	BÜK200	DHM50
Bayern	70.576	104.915	CORINE 2000	BÜK1000	DHM50
Rheinland-Pfalz	19.856	34.816	CORINE 2000	BÜK200	DHM10
Hessen	21.116	196.352	CORINE 2006	BK50	DHM20

karte (Abb. 3a) abgeleitet werden. Dabei wurde auf eine nach Datengrundlage und Methodik der Aufbereitung weitgehend länderübergreifende Konsistenz geachtet.

Die so ermittelten Grundflächendatensätze (Tab. 1) umfassen zusammen 205.376 Flächen für Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, wobei alle drei Länder in vergleichbarer räumlicher Auflösung vorliegen. Für Hessen wurde die Simulation auf Basis der hoch aufgelösten Bodenkarte BK50 durchgeführt, so dass die Landesfläche in 196.352 Grundflächen unterteilt wird. Insgesamt wird der 147.286 km² große Untersuchungsraum durch 401.728 Grundflächen, mit jeweils einheitlicher Kombination aus Landnutzung und nutzbarer Feldkapazität (nFK), abgebildet.

Der BFI (Abb. 3b) bildet relevante Direktabflussanteile wie Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss auf unversiegelten Flächen ab. Er wird durch den Quotienten aus Basis- und Gesamtabfluss auf Grundlage langer Abflusszeitreihen definiert und kann daher nur auf Jahreswerte oder größere Zeiträume angewendet werden. Ihm liegt die Annahme zu Grunde, dass er weitgehend unabhängig von kurzfristigen Witterungs- und Abflussdynamiken ist. Stattdessen wird er primär von Einflussfaktoren wie Hydrogeologie, Boden, Landnutzung und Relief geprägt. Die Ermittlung des BFI erfolgte in Baden-Württemberg anhand von 105 (ARMBRUSTER, 2002), in Bayern 158 (LfU, 2009), in Rheinland-Pfalz 137 und in Hessen 52 (HERGESELL & BERTHOLD, 2004) Einzugsgebieten mit

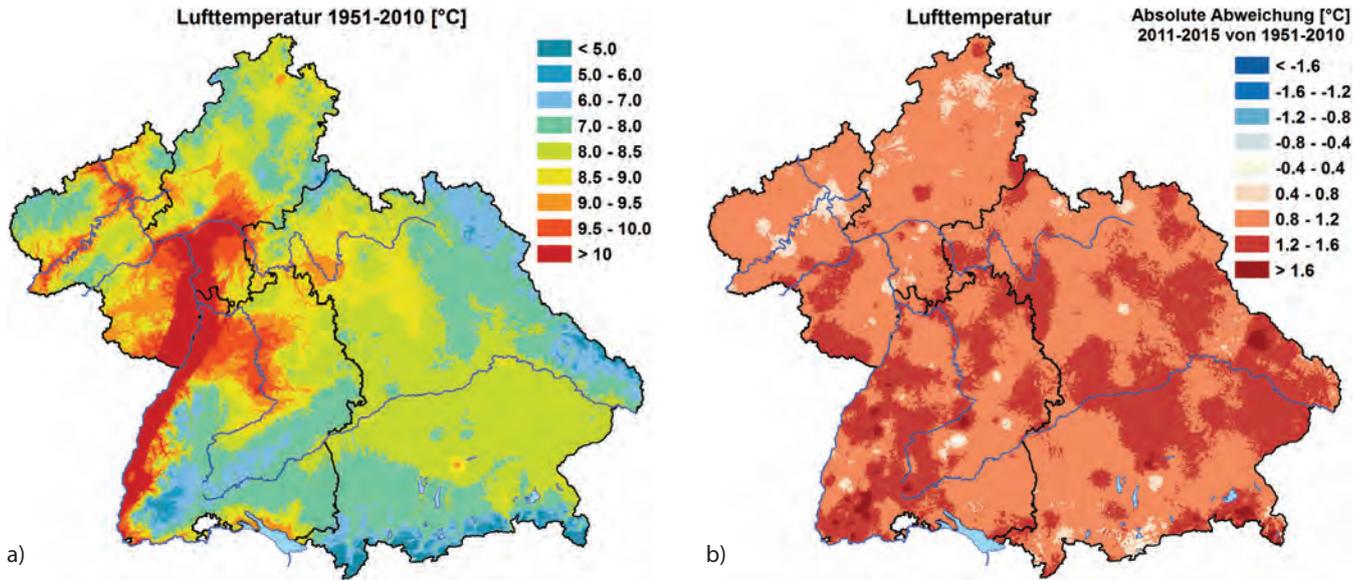


Abbildung 4
Mittlere Lufttemperatur 1951 bis 2010 in °C (a) und absolute Abweichung im Zeitraum 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 (b).
Mean air temperature 1951 to 2010 in °C (a) and absolute deviation 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 (b).

weitgehend homogenen naturräumlichen Verhältnissen und geringer anthropogener Beeinflussung (KLIWA, 2012). Ein vergleichbares Verfahren wurde, im Rahmen des Hydrologischen Atlas von Deutschland, bei der Ermittlung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung von Deutschland angewendet (NEUMANN, 2009).

4. Entwicklung der klimatischen Eingangsdaten 1951 bis 2015

4.1. Lufttemperatur

Die über Süddeutschland gemittelte Lufttemperatur betrug im Zeitraum 1951 bis 2010 (Abb. 4a) 8.2 °C und im Zeitraum von 2011 bis 2015 (Abb. 4b) 9.3 °C. Die mittleren Temperaturen der einzelnen Bundesländer und Naturräume sind in Tabelle 2 enthalten. Neben dem direkten Zusammenhang mit der Geländehöhe zeigt sich ein West-Ost-Gradient, welcher auf mildere Winter durch das stärker ozeanisch geprägte Klima in den westlichen Regionen zurückzuführen ist (PEEL et al., 2007).

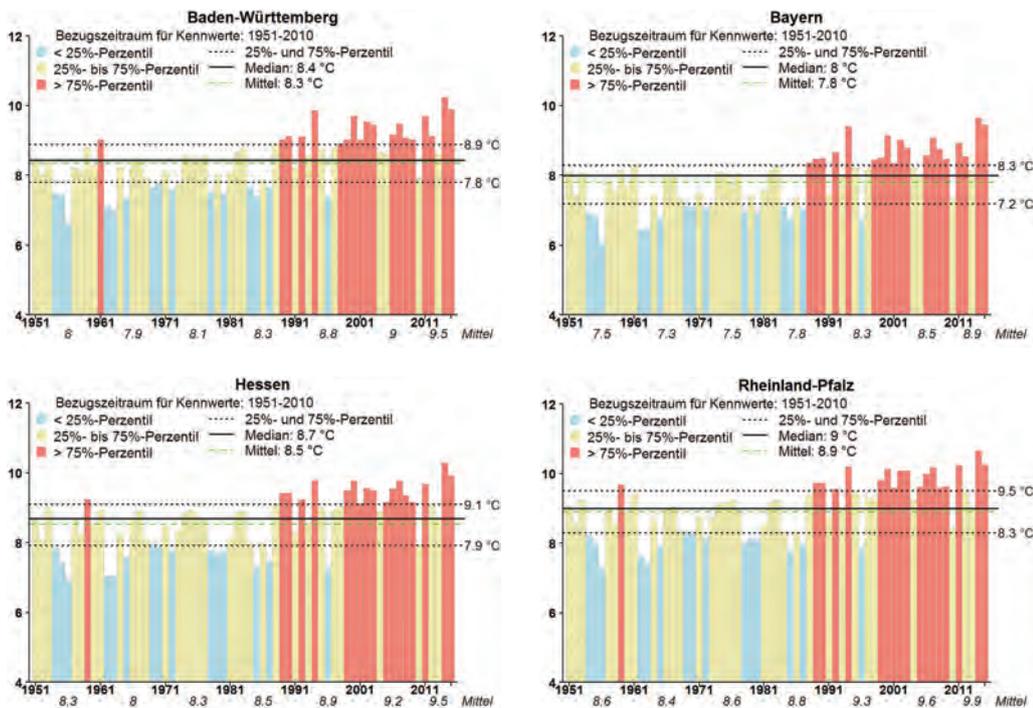


Abbildung 5
Jährliche Lufttemperatur in den vier Bundesländern von 1951 bis 2015 (°C).
Annual air temperature in the four federal states from 1951 to 2015 (°C).

Die Jahreswerte der Lufttemperatur im Gesamtzeitraum (Abb. 5) zeigen in allen Bundesländern ab dem Jahr 1988 eine hoch signifikante Erwärmung (MK-Test; $p < 0.05$). Bis auf wenige Ausnahmen (z. B. 1996 und 2010) wies diese Periode nahezu durchgehend Werte über dem vieljährigen Mittel auf, wobei eine deutliche Mehrheit der Jahre (65 %) über dem 75 %-Perzentil lag.

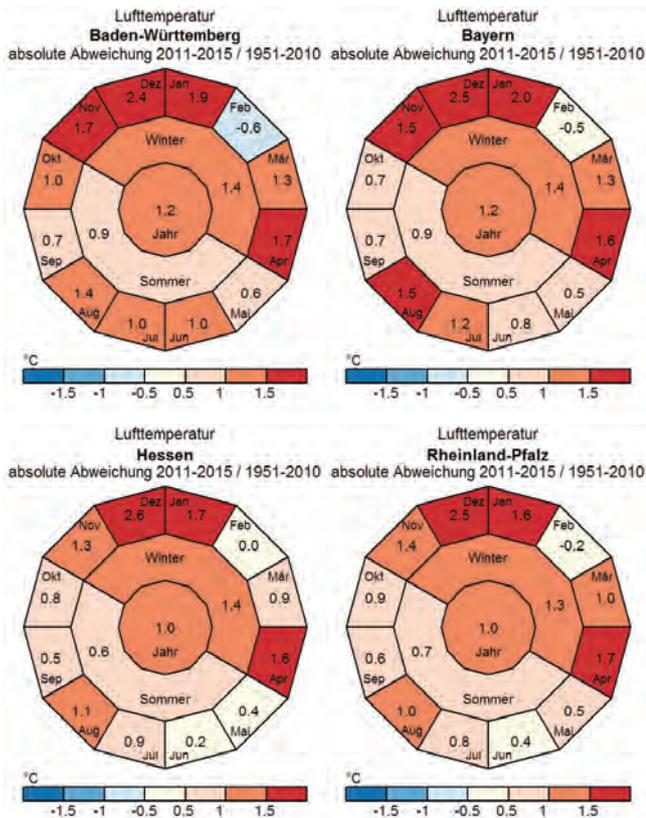


Abbildung 6
Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Lufttemperatur (°C) 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 in den vier Bundesländern. Die Farben entsprechen dem Monatsmittel.
Mean absolute air temperature changes (°C) during the year for the period 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 in the four federal states. The colors represent mean monthly values.

Im Zeitraum 2011 bis 2015 lag die mittlere Lufttemperatur zwischen +1.0 °C und +1.2 °C über dem vieljährigen Mittel von 1951 bis 2010 (Abb. 6). Diese Zunahme beruht vor allem auf einer Erwärmung der Wintermonate (+1.4 °C). In den Sommermonaten fiel die Temperaturzunahme mit Werten zwischen +0.6 °C in Hessen und +0.9 °C in Baden-Württemberg und Bayern geringer aus.

4.2. Niederschlag

Im Mittel lag der Niederschlag in Süddeutschland im Zeitraum 1951 bis 2010 bei 903 mm/a (Abb. 7a) und 818 mm/a im Zeitraum 2011 bis 2015 (Abb. 7b). Die mittleren Niederschläge der einzelnen Bundesländer und Naturräume sind in Tabelle 2 enthalten.

Betrachtet man das Niederschlagsregime, so liegen die Sommerniederschläge über denen des Winterhalbjahres. Der Quotient aus Niederschlag im Winterhalbjahr und Niederschlag im Sommerhalbjahr variiert dabei zwischen 0.72 in Bayern und 0.92 in Rheinland-Pfalz. Im Jahresverlauf weisen die Monate Februar bis April die geringsten und die Monate Dezember, Juni und Juli die höchsten Niederschlagsmengen auf.

Es ist bisher kein langjähriger Trend bei den jährlichen Niederschlagsmengen im Gesamtzeitraum erkennbar (Abb. 8). Vielmehr traten wiederholt Schwankungen der jährlichen und mehrjährigen Niederschlagsmengen auf, so dass sich zeitweise Nass- und Trockenperioden über Zeiträume von rund 6 bis 10 Jahren abwechselten. Die Jahresniederschläge sind zu einem hohen Grad von Zufälligkeiten geprägt und somit unabhängig von der Niederschlagsmenge des Vorjahres. So traten beispielsweise Nassjahre (> 75 %-Perzentil) innerhalb der trockenen Dekade 1971 bis 1980 auf. Auffallend sind aber, mit Ausnahme von 2007, die meist unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen in der verhältnismäßig trockenen jüngeren Vergangenheit seit dem Jahr 2003, und vor allem seit dem Jahr 2011.

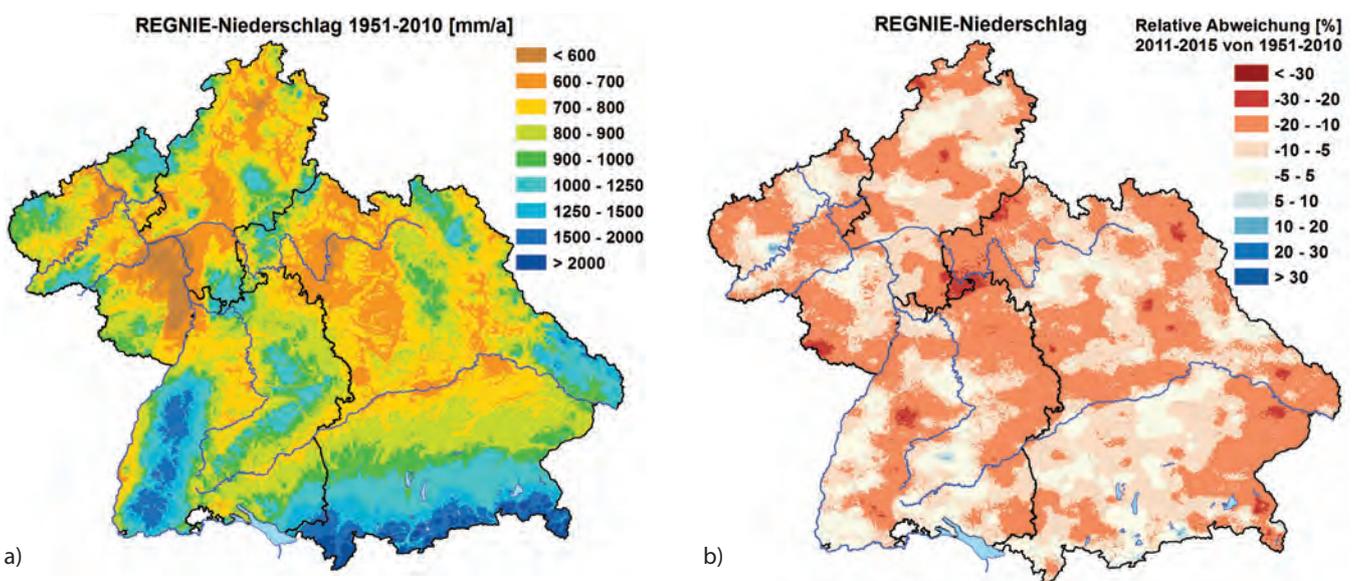


Abbildung 7
Mittlere Niederschlagshöhe 1951 bis 2010 in mm/a (a) und relative Abweichung im Zeitraum 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 (b).
Mean precipitation 1951 to 2010 in mm/yr (a) and relative deviation 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 (b).

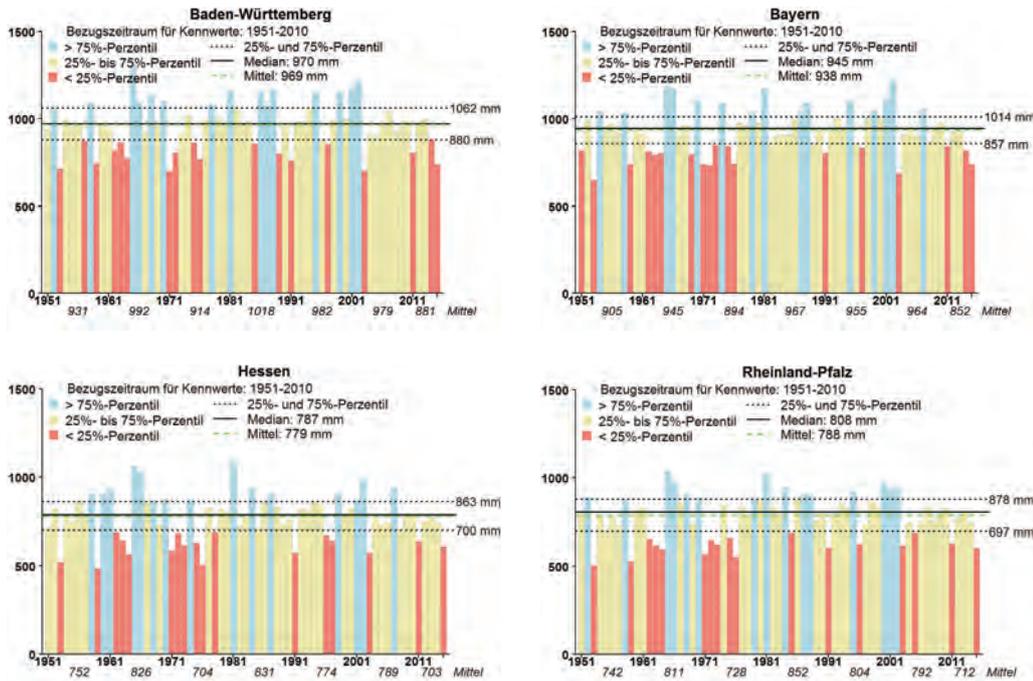


Abbildung 8
 Jährliche Niederschlagshöhe in den vier Bundesländern von 1951 bis 2015 (mm/a).
 Annual precipitation in the four federal states from 1951 to 2015 (mm/yr).

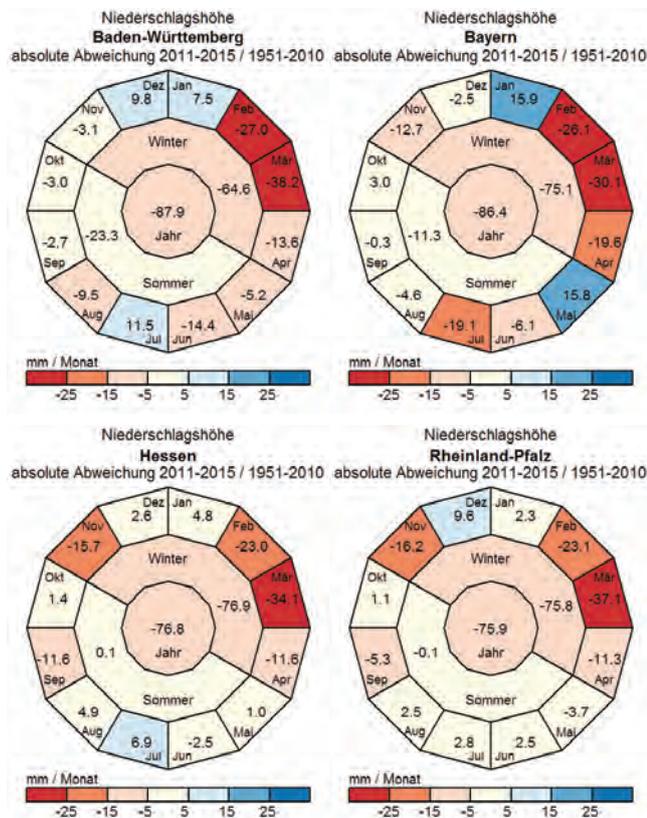


Abbildung 9
 Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Niederschlagshöhe (mm) 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 in den vier Bundesländern. Die Farben entsprechen den mittleren Monatssummen.
 Mean absolute precipitation changes (mm) during the year for the period 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 in the four federal states. The colors represent mean monthly sums.

Die Winterniederschläge weisen eine geringe Zunahme im Gesamtzeitraum auf. Diese beruht auf einer hohen Anzahl überdurchschnittlich feuchter Winterhalbjahre (> 75 %-Perzentil) im Zeitraum von ca. 1977 bis 2002, während die Winterniederschläge vor und nach diesem Zeitraum meist geringer ausfielen (KLIWA, 2017). Auf Grund der niedrigen Verdunstungsraten im Winterhalbjahr sind die Winterniederschläge entscheidend für die jährliche Höhe der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.

Im Zeitraum 2011 bis 2015 war das Sommerhalbjahr vergleichsweise durchschnittlich feucht (0 mm in Hessen und Rheinland-Pfalz bis -11 mm (-2 %) in Bayern und -23 mm (-4 %) in Baden-Württemberg). Hingegen

fiel das Winterhalbjahr mit Abweichungen zwischen -15 % und -21 % (-65 mm in Baden-Württemberg bis -77 mm in Hessen) spürbar trockener aus als im Zeitraum 1951 bis 2010 (Abb. 9). In allen Bundesländern ist in den letzten Jahren eine ausgeprägte Frühjahrestrockenheit mit einem erheblichen Niederschlagsdefizit von Februar bis April zu erkennen, welche im März mit Werten zwischen -30 mm und -38 mm (-46 % bis -62 %) am deutlichsten ausfiel.

5. Entwicklung der Wasserbilanzgrößen von 1951 bis 2015

5.1. Tatsächliche Verdunstung

Die tatsächliche Verdunstung ist die zentrale Ergebnisgröße der Bodenwasserhaushaltsmodellierung. In Süddeutschland erreichte sie im Mittel 534 mm/a im Zeitraum 1951 bis 2010 (Abb. 10a) und 526 mm/a im Zeitraum 2011 bis 2015 (Abb. 10b). Die Raten der einzelnen Bundesländer und Naturräume sind in Tabelle 2 enthalten. Im Vergleich zu anderen Wasserhaushaltsgrößen zeigt die tatsächliche Verdunstung räumlich und zeitlich eine geringe Schwankungsbreite.

Die Verdunstung kann regional einen sehr unterschiedlichen Anteil an der Niederschlagshöhe ausmachen. So verdunsteten in Baden-Württemberg und Bayern im 60-jährigen Mittel 55 bis 60 % des Niederschlags während 40 bis 45 % abflussrelevant werden. In Rheinland-Pfalz und Hessen beträgt der Anteil des verdunstenden Wassers hingegen 65 bis 70 %, so dass nur 30 bis 35 % für die schnellen (Oberflächenabfluss und Interflow) und langsamen (Basisabfluss) Abflusskomponenten verbleiben.

Seit Mitte der 1990er Jahre ist im gesamten süddeutschen Raum ein signifikanter Anstieg (MK-Test, $p < 0.05$) der potentiellen Ver-

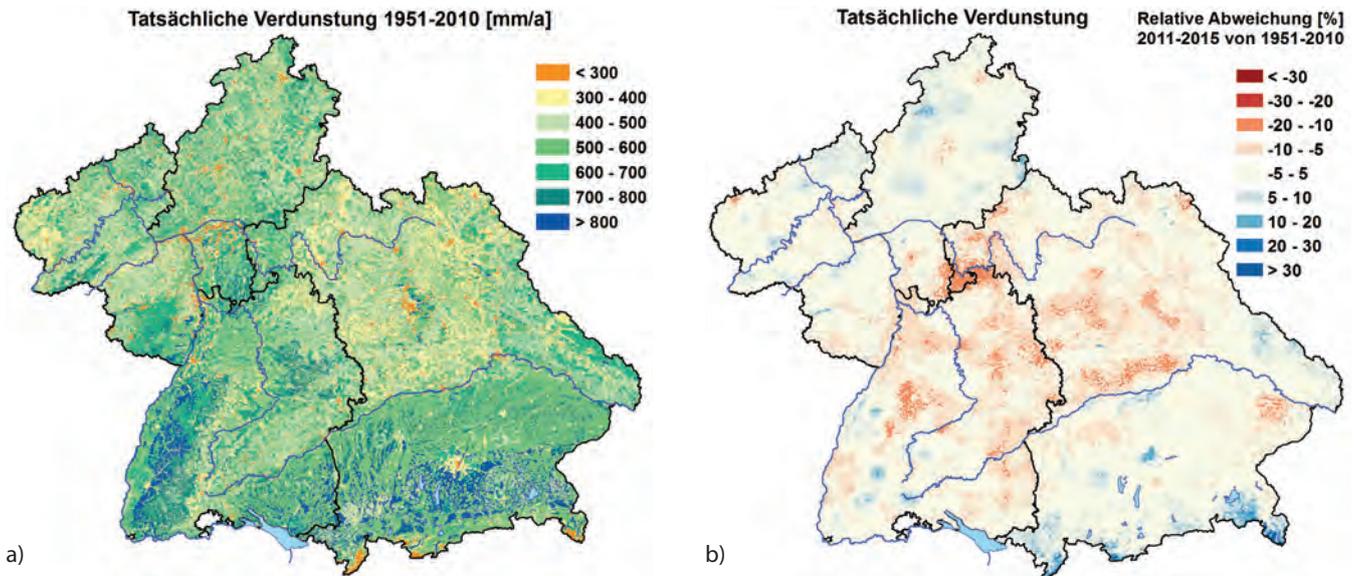


Abbildung 10
Mittlere tatsächliche Verdunstungshöhe 1951 bis 2010 in mm/a (a) und relative Abweichung im Zeitraum 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 (b).
Mean actual evapotranspiration 1951 to 2010 in mm/yr (a) and relative deviation 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 (b).

dunstungshöhe zu beobachten (KLIWA, 2017). Dieser Anstieg ist durch höhere Lufttemperaturen und eine längere Vegetationsperiode zu erklären (CHMIELEWSKI, 2007; DWD, 2016).

Während bis Mitte der 1980er Jahre die tatsächlichen Verdunstungsraten vergleichsweise (unter)durchschnittlich waren, ist seitdem eine Tendenz zu höheren Raten feststellbar (Abb. 11).

Trockene Jahre sowie der Zeitraum 2011 bis 2015 weisen wasser-mangelbedingt niedrigere Werte auf.

Im Zeitraum 2011 bis 2015 nahm die tatsächliche Verdunstung im Winterhalbjahr zwischen 6 mm (4 %) in Baden-Württemberg und 9 mm (6 %) in Hessen zu. Hingegen war sie mit Abnahmen zwischen -5 mm (-1 %) in Hessen und -25 mm (-6 %) in Baden-Württemberg auf Grund temporären Wassermangels im Sommerhalbjahr limitiert (Abb. 12).

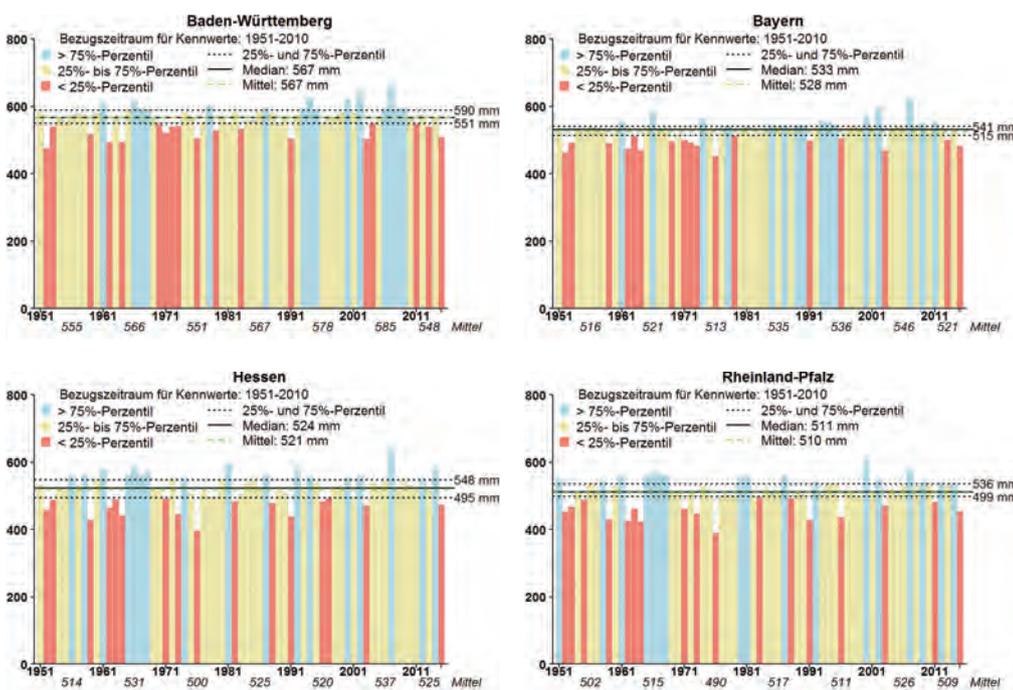


Abbildung 11
Jährliche tatsächliche Verdunstungshöhe in den vier Bundesländern von 1951 bis 2015 (mm/a).
Annual actual evapotranspiration in the four federal states from 1951 to 2015 (mm/yr).

5.2. Gesamtabfluss und Sickerwasser-rate

Sickerwasserrate und Gesamtabfluss unterscheiden sich durch den Oberflächenabfluss, welcher im Rahmen der hier vorgestellten Modellierung lediglich für Siedlungsbereiche und Wasserflächen ausgewiesen wurde. Die Unterschiede sind großräumig so gering, dass beide Größen bezogen auf langjährige Verhältnisse sowie die zu Grunde gelegten Raumeinheiten nahezu gleichbedeutend sind.

Der mittlere Gesamtabfluss in Süddeutschland betrug 368 mm/a im Zeitraum 1951 bis 2010 (Abb. 13a) und 308 mm/a im Zeitraum 2011 bis 2015 (Abb. 13b). Die middle-

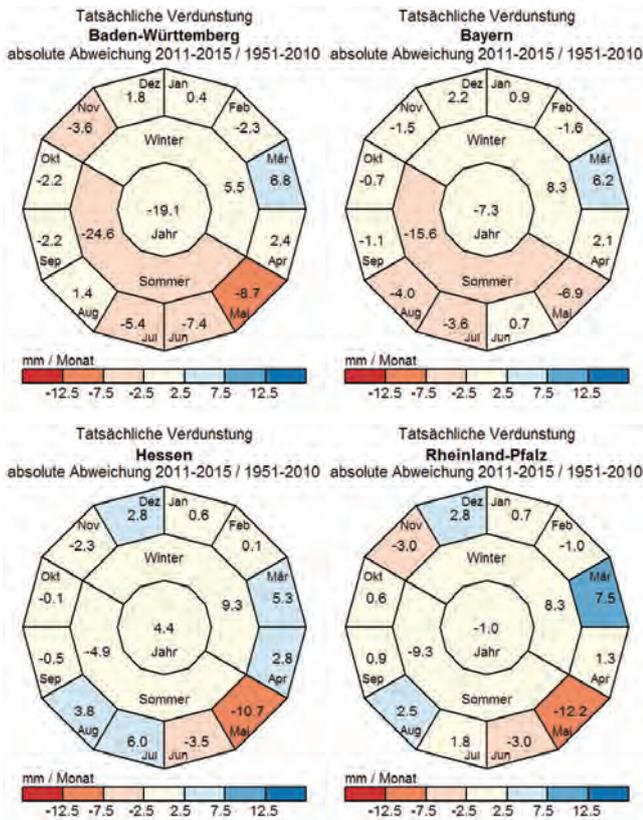


Abbildung 12
Mittlere innerjährliche absolute Änderung der tatsächlichen Verdunstungshöhe (mm) 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 in den vier Bundesländern. Die Farben entsprechen den mittleren Monatssummen. *Mean absolute actual evapotranspiration changes (mm) during the year for the period 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 in the four federal states. The colors represent mean monthly sums.*

ren Raten der einzelnen Bundesländer und Naturräume sind in Tabelle 2 enthalten.

Entsprechend dem Jahresgang der tatsächlichen Verdunstung treten, trotz höherer Sommerniederschläge, die höchsten Gesamtabflüsse während des Winterhalbjahres auf. Bei Betrachtung der einzelnen Bundesländer zeigen sich zwei unterschiedliche Charakteristika: So werden in Baden-Württemberg und Bayern die niedrigsten Gesamtabflüsse im September sowie die höchsten Abflüsse im März verzeichnet. Demgegenüber tritt das Jahresminimum in Hessen und Rheinland-Pfalz bereits im Juli und August und das Maximum im Januar auf (KLIWA, 2017). Während die Winterniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern häufiger als Schnee zwischengespeichert werden, spielt dieser Effekt im wärmeren Hessen und Rheinland-Pfalz eine untergeordnete Rolle. Der früher auftretende sommerliche Niedrigabfluss in Hessen und Rheinland-Pfalz ist zusätzlich durch das niederschlags- und verdunstungsbedingte Wasserdefizit im Sommer zu erklären. Der Quotient aus Gesamtabfluss im Winterhalbjahr und Gesamtabfluss im Sommerhalbjahr variiert zwischen 1.5 in Bayern und 4.4 in Hessen und weist auf eine ausgeprägte sommerliche Niedrigwasserperiode in Hessen und Rheinland-Pfalz hin.

Der Gesamtabfluss beschreibt die Bilanzgröße aus jährlich variablen Niederschlägen (Abb. 8) und überwiegend gering variierenden tatsächlichen Verdunstungshöhen (Abb. 11). Dies führt zu teils erheblichen Differenzen zwischen den jährlichen Gesamtabflusshöhen (Abb. 14). Bis Anfang der 2000er Jahre wechselten sich zeitweise Nass- und Trockenperioden über Zeiträume von rund 6 bis 10 Jahren ab. Auffallend sind überwiegend unterdurchschnittliche Jahreswerte in der verhältnismäßig trockenen jüngeren Vergangenheit (seit 2003), und vor allem seit dem Jahr 2011.

Im Zeitraum 2011 bis 2015 erfolgte eine ganzjährige Abnahme der Gesamtabflusshöhe von -52 mm (-13 %) in Baden-Württemberg bis -67 mm (-26 %) in Hessen (Abb. 15), welche größtenteils

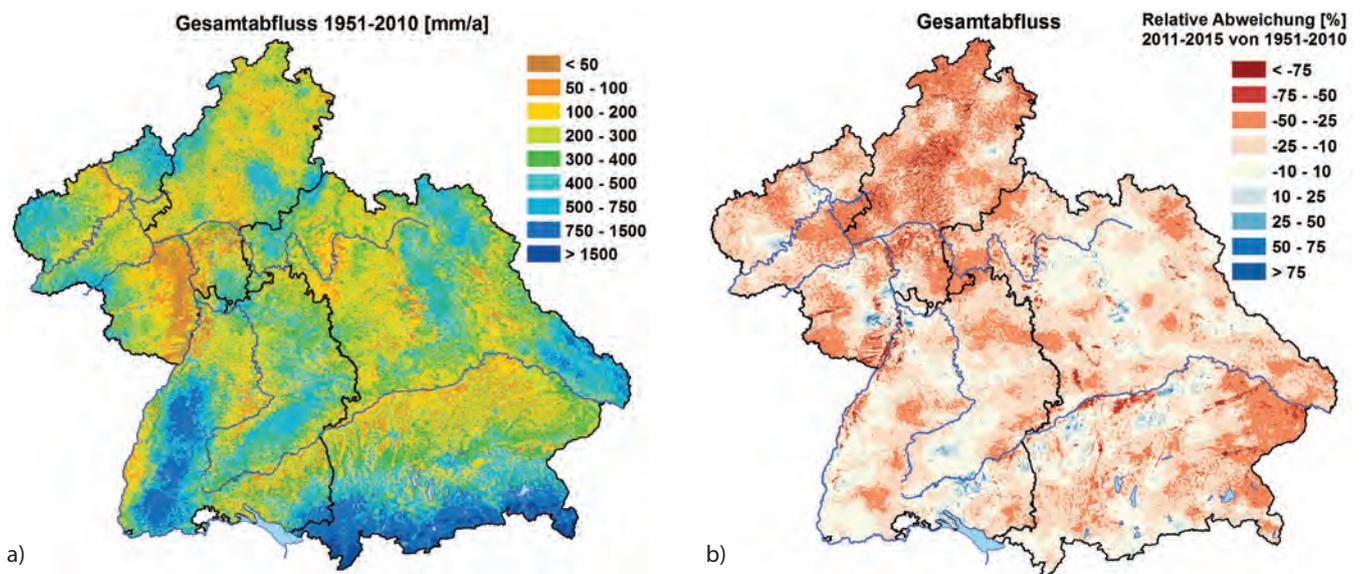


Abbildung 13
Mittlere Gesamtabflusshöhe 1951 bis 2010 in mm/a (a) und relative Abweichung im Zeitraum 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 (b). *Mean total runoff 1951 to 2010 in mm/yr (a) and relative deviation 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 (b).*

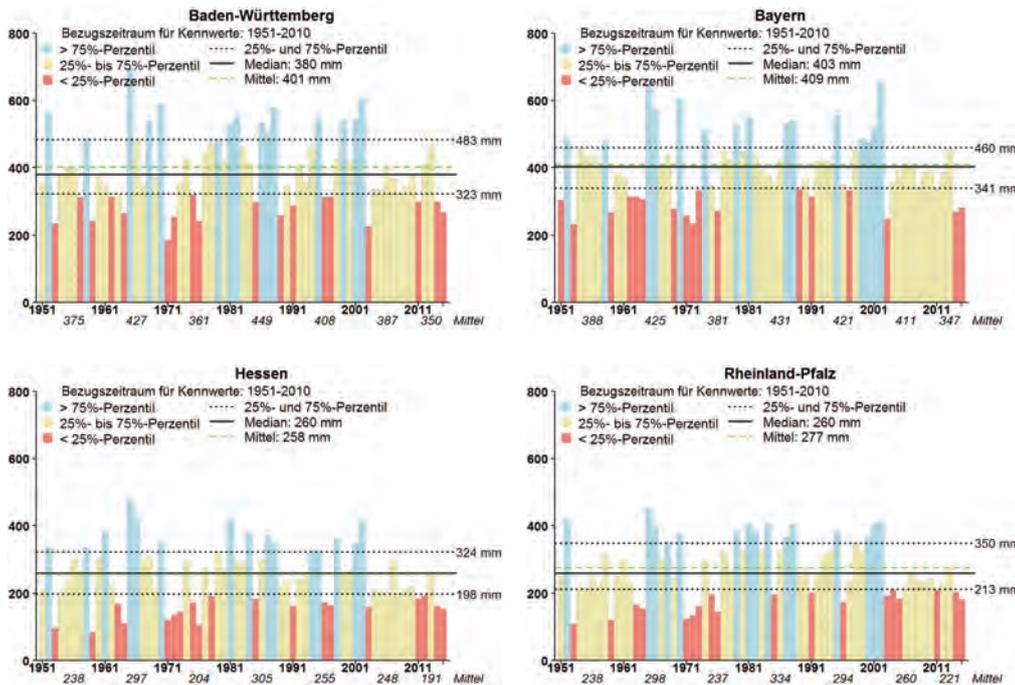


Abbildung 14
 Jährliche Gesamtabflusshöhe in den vier Bundesländern von 1951 bis 2015 (mm/a).
 Annual total runoff in the four federal states from 1951 to 2015 (mm/yr).

auf den beschriebenen geringen Niederschlägen im Winterhalbjahr beruht. Der deutlichste Rückgang trat von Februar bis April auf, während die Gesamtabflusshöhe im Januar zunahm.

5.3. Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag ist wirtschaftlich von großer Bedeutung und repräsentiert die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen. Sie ist nicht gleichbedeutend mit dem regional verfügbaren Grundwasserangebot, da dieses von weiteren Faktoren, wie z. B. den Speichereigenschaften des Untergrunds, beeinflusst wird.

Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag in Süddeutschland betrug 174 mm/a im Zeitraum 1951 bis 2010 (Abb. 16a) und 144 mm/a im Zeitraum 2011 bis 2015 (Abb. 16b). Die mittleren Raten der einzelnen Bundesländer und Naturräume sind in Tabelle 2 enthalten. Im Mittel entspricht sie ca. 20 % des jährlichen Niederschlags, so dass die Grundwasserneubildung aus Niederschlag von allen Bilanzgrößen am sensitivsten auf Änderungen der anderen Wasserhaushaltskomponenten reagiert. Dies wird insbesondere bei der Darstellung der Jahreswerte deutlich (Abb. 17). Entsprechend den Schwankungen des Niederschlags sind in allen Bundesländern neubildungsreichere Perioden (Ende der 1960er Jahre, 1979 bis 1988 und um den Jahrtausendwechsel) und neubildungsärmere Perioden (1950er bis Mitte der 1960er Jahre, 1970er Jahre) erkennbar. Vor allem seit dem Jahr 2003 traten fast nur noch durchschnittliche bis unterdurchschnittliche Neubildungsraten auf.

Die unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen im Zeitraum 2011 bis 2015, vor allem während der Winterhalbjahre, führten zu einem deutlichen Rückgang der Grundwasserneubildung (Abb. 16b). Dieser beträgt in Süddeutschland -30 mm (-17 %) und zeigt sich im trockeneren Rheinland-Pfalz und Hessen deutlicher ausgeprägt (-22 % bzw. -30 %) als im feuchteren Baden-Württemberg und Bayern (-14 % bzw. -16 %).

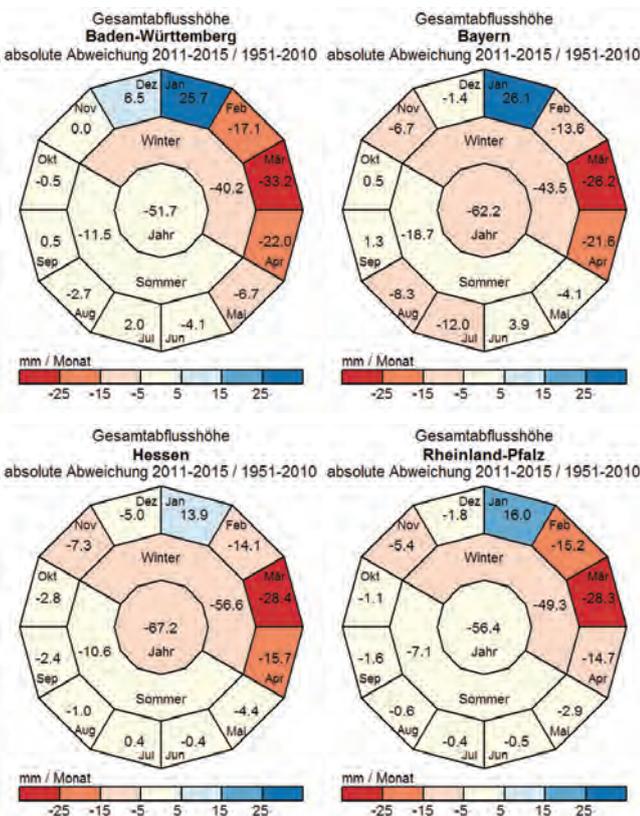


Abbildung 15
 Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Gesamtabflusshöhe (mm) 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 in den vier Bundesländern. Die Farben entsprechen den mittleren Monatssummen.
 Mean absolute total runoff changes (mm) during the year for the period 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 in the four federal states. The colors represent mean monthly sums.

Die unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen im Zeitraum 2011 bis 2015, vor allem während der Winterhalbjahre, führten zu einem deutlichen Rückgang der Grundwasserneubildung (Abb. 16b). Dieser beträgt in Süddeutschland -30 mm (-17 %) und zeigt sich im trockeneren Rheinland-Pfalz und Hessen deutlicher ausgeprägt (-22 % bzw. -30 %) als im feuchteren Baden-Württemberg und Bayern (-14 % bzw. -16 %).

5.4. Trockenheitsindex

Der Trockenheitsindex nach WaBoA (2007) ist definiert als die Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers (< 30 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK)). Er wird maßgeblich durch die standortabhängige Größe des Bodenwasserspeichers (Abb. 3a) in Verbindung mit der Menge des für die Befüllung zur Verfügung stehenden Niederschlagswassers gesteuert. Das bedeutet, dass vergleichsweise niederschlagsarme Regionen nur dann keine hohen Werte für den Trockenheitsindex zeigen, wenn

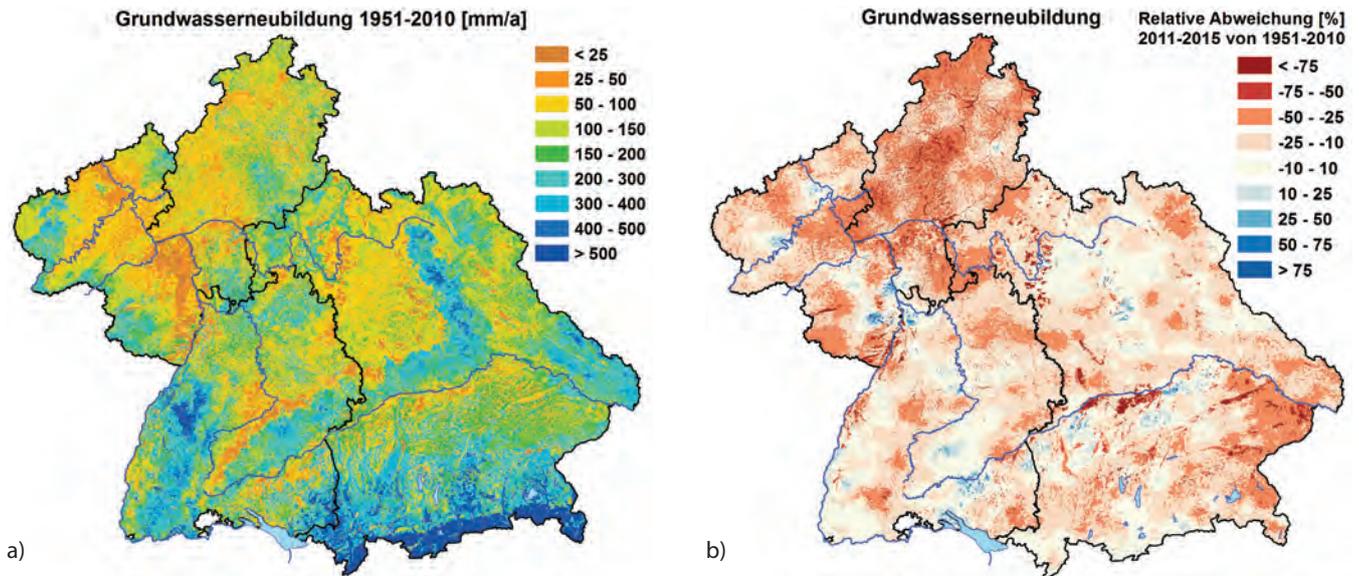


Abbildung 16 Mittlere Grundwasserneubildungshöhe 1951 bis 2010 in mm/a (a) und relative Abweichung im Zeitraum 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 (b). *Mean groundwater recharge in 1951 to 2010 in mm/yr (a) and relative deviation 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 (b).*

hier ein ausreichend großer Bodenspeicher zur Verfügung steht. Umgekehrt treten in niederschlagsreichen Regionen nur dort geringe Werte auf, wo geringmächtige und wenig speicherfähige Böden anzutreffen sind.

Während im Lockergesteinsbereich südlich der Donau sowie im Schwarzwald der Schwellenwert (< 30 % der nFK) an nur

wenigen Tagen im Jahr unterschritten wird, ist in vielen Naturräumen im mittleren und nordwestlichen Süddeutschland mit Überschreitungen > 70 Tagen/a zu rechnen (Abb. 18). Meteorologisch bedingt können zwischen einzelnen Jahren erhebliche Unterschiede bestehen (Abb. 19). Die vieljährigen Mittel 1951 bis 2010 und 2011 bis 2015 für die einzelnen Bundesländer und Naturräume sind in Tabelle 2 enthalten.

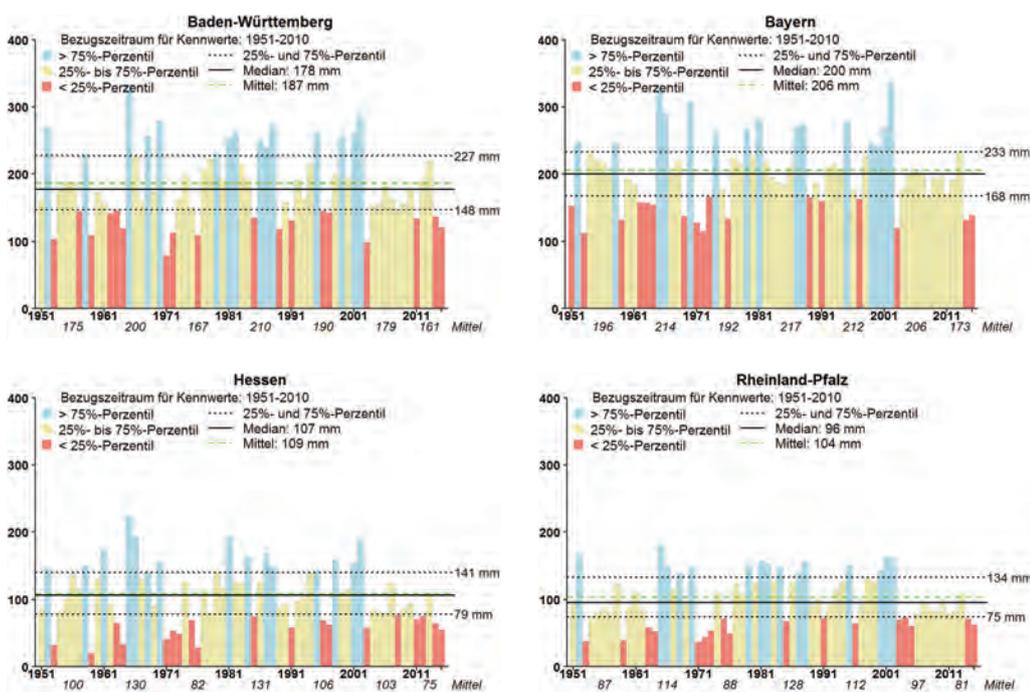


Abbildung 17 Jährliche Grundwasserneubildungshöhe in den vier Bundesländern von 1951 bis 2015 (mm/a). *Annual groundwater recharge in the four federal states from 1951 to 2015 (mm/yr).*

Erwartungsgemäß weisen die Böden in erster Linie im Sommerhalbjahr eine starke Austrocknung auf (mehr als 90 % der betroffenen Tage). In diesen Monaten wird der Schwellenwert in Baden-Württemberg und Bayern an ca. 30 %, in Hessen an ca. 40 % und in Rheinland-Pfalz an mehr als 50 % der Tage unterschritten. Zurückzuführen ist dies auf vegetations- und einstrahlungsbedingte hohe Verdunstungsraten, welche zu einer zügigen Entleerung auch gut gefüllter Bodenwasserspeicher führen.

Während sich in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraumes Jahre mit einem niedrigen und hohen Trockenheitsindex abwechselten, trat seit Beginn der 1990er Jahre eine leichte Zunahme auf (Abb. 19). Dies deutet auf

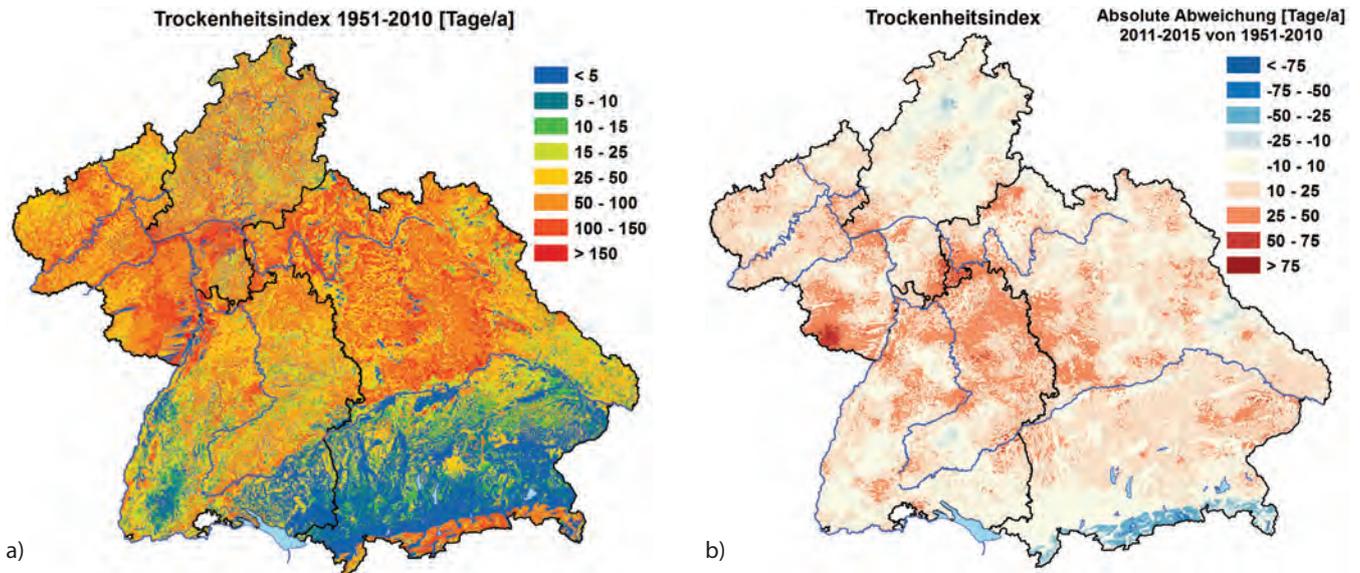


Abbildung 18 Mittlerer Trockenheitsindex 1951 bis 2010 in Tage/a (a) und absolute Abweichung im Zeitraum 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 (b).
Mean drought index in 1951 to 2010 in days/yr (a) and absolute deviation 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 (b).

eine Häufung trockener Phasen mit temporärem Wasserstress hin. Anhand des Trockenheitsindex lässt sich sehr gut ein Anstieg des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs in der jüngeren Vergangenheit erkennen. Dieser beruht auf einer verlängerten Vegetationsperiode, der engeren klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr und der beobachteten geringen Auffüllung des Bodenwasserspeichers während der Frühlingsmonate.

Im Zeitraum 2011 bis 2015 erhöhte sich der Trockenheitsindex gegenüber 1951 bis 2010 zwischen +7 Tage in Hessen, +16 Tage in

Baden-Württemberg und +18 Tage in Rheinland-Pfalz (Abb. 20). Während der überwiegende Anstieg im Sommerhalbjahr auftrat, erfolgte ebenfalls eine Zunahme in den Monaten November und April.

6. Zusammenfassung

Mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW wurde erstmals für Süddeutschland (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz) die Grundwasserneubildung im Zeitraum 1951 bis 2015 flächendeckend für 401.728 Einzelflächen simuliert. Die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Wasserbilanz- und Zustandsgrößen im Zeitraum 1951 bis 2015 hat gezeigt, dass mit der stattfindenden Erwärmung seit Ende der 1980er Jahre auch Veränderungen weiterer Bilanzkomponenten einhergingen. Alle behandelten Parameter auf Basis der Bundesländer und Naturräume für das vieljährige Mittel (1951 bis 2010) und die jüngere Vergangenheit (2011 bis 2015) sind in Tabelle 2 zusammengefasst, und werden detailliert anhand weiterer Auswertungen (Karten-, Säulen- und Ringdiagramme, Trenddreiecke) in KLIWA (2017) beschrieben.

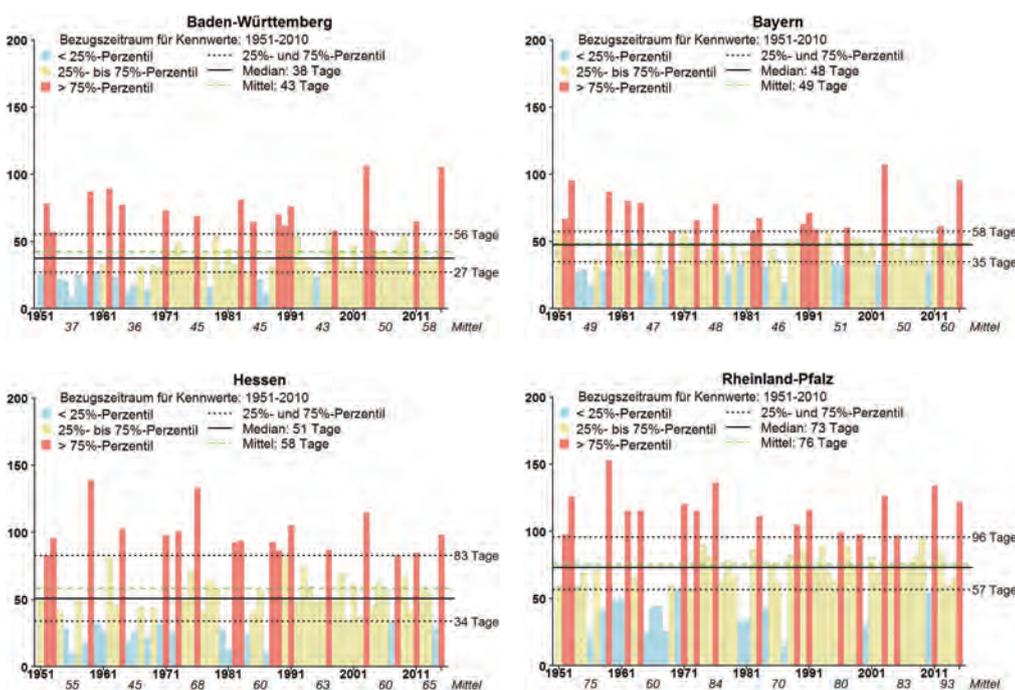


Abbildung 19 Jährlicher Trockenheitsindex in den vier Bundesländern von 1951 bis 2015 (Tage/a).
Annual drought index in the four federal states from 1951 to 2015 (days/yr).

Die Lufttemperatur wies in Süddeutschland im Zeitraum 1951 bis 1987 keinen erkenn-

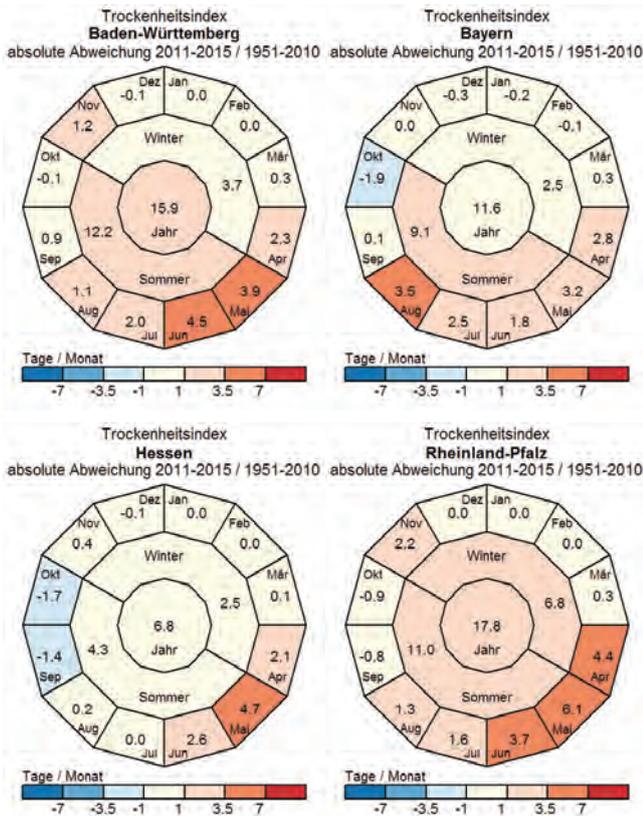


Abbildung 20
 Mittlere innerjährliche absolute Änderung des Trockenheitsindex (Tage) 2011 bis 2015 gegenüber 1951 bis 2010 in den vier Bundesländern. Die Farben entsprechen den mittleren Monatssummen.
Mean absolute drought index changes (days) during the year for the period 2011 to 2015 compared to 1951 to 2010 in the four federal states. The colors represent mean monthly sums.

baren Trend auf. Bemerkenswert ist hingegen der hoch signifikante Erwärmungstrend (MK-Test, $p < 0.05$) seit Ende der 1980er Jahre. So lagen beispielsweise die Temperaturen in der jüngeren Vergangenheit bereits $+1.2\text{ }^\circ\text{C}$ (2011 bis 2015) über dem langjährigen Mittel von $8.2\text{ }^\circ\text{C}$ (1951 bis 2010).

Bei den jährlichen Niederschlagsmengen zeigt sich noch kein eindeutiger Trend im Zeitraum 1951 bis 2015. Gut erkennbar sind jedoch unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen im verhältnismäßig trockenen Zeitraum von 2003 bis 2015. Die Niederschläge im Winterhalbjahr (November bis April) weisen eine uneinheitliche Entwicklung im Gesamtzeitraum auf. Während vor allem von Beginn der 1980er bis Anfang der 2000er Jahre vergleichsweise hohe Winterniederschläge auftraten, ist seitdem eine klare Tendenz hin zu trockeneren Winterhalbjahren zu beobachten.

Die potentielle Verdunstung weist in allen Bundesländern seit Ende der 1980er Jahre einen zunehmenden Trend auf, welcher zu einer engeren klimatischen Wasserbilanz führt. Insbesondere im wasserreicheren Baden-Württemberg und Bayern nahm seitdem auch die tatsächliche Verdunstung zu, wenngleich auch hier eine Limitierung der Verdunstung während einzelner trockener Jahre sowie im Zeitraum von 2011 bis 2015 erkennbar ist. Die insgesamt steigende Verdunstung ist durch höhere Lufttemperaturen und eine längere Vegetationsperiode zu erklären.

Gesamtabfluss und Sickerwasserrate als Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsmodellierung unterscheiden sich durch den Oberflächenabfluss, welcher im Modell nur für Siedlungsbereiche und Wasserflächen ausgewiesen wurde. Während für beide Größen keine einheitliche Entwicklung über den Gesamtzeitraum von 1951 bis 2015 erkennbar ist, zeigt die verhältnismäßig trockene jüngere Vergangenheit (seit 2003) eine Tendenz hin zu abnehmenden Raten, wobei die überwiegende Mehrheit der Jahre unterdurchschnittliche Werte aufwies.

Analog weist die Grundwasserneubildung aus Niederschlag keine einheitliche Entwicklung über den Gesamtzeitraum von 1951 bis 2015 auf. Den zwischenzeitlichen Zunahmen in den feuchten 1980er Jahren und teils auch 1990er Jahren stehen Abnahmen seit dem Jahr 2003 gegenüber. Insgesamt wies die jüngere Vergangenheit (seit 2003) überwiegend unterdurchschnittliche Werte auf.

Der Trockenheitsindex (Anzahl von Tagen mit Werten $< 30\%$ der nFK) zeigt eine Entwicklung hin zu einer höheren Anzahl von Tagen im Jahr, an denen der Schwellenwert unterschritten wird. Vor allem in der jüngeren Vergangenheit ist eine Zunahme zu verzeichnen, was auf eine Häufung von Trockenperioden und somit einen steigenden landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf hinweist.

Die vorliegenden Ergebnisse deuten in einem überregionalen Kontext auf bereits stattgefundene Änderungstendenzen innerhalb des Gesamtzeitraums von 1951 bis 2015 hin, welche vor allem in der jüngeren Vergangenheit seit dem Jahr 2003 deutlich werden. Die Ergebnisse erlauben eine großräumige Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Bodenwasserhaushaltskomponenten und somit der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in Süddeutschland. Insbesondere die Jahre 2011 bis 2015 zeigen die Notwendigkeit (über)regionaler Anpassungsmaßnahmen, um auch zukünftig Trinkwasser in ausreichender Qualität und Menge der Bevölkerung zur Verfügung zu stellen. Damit soll Konflikten zwischen Trinkwassergewinnung und konkurrierenden Nutzungen (z. B. landwirtschaftliche Bewässerung) vorgebeugt werden (LfU, 2017). Speziell in Regionen mit gering ergebnisreichen Grundwasserleitern (HAD, Tafel 5.2) (BMU, 2003) wird daher im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung empfohlen, von einer vieljährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate als Bemessungsgröße abzuweichen. Stattdessen sollte die Ansetzung einer reduzierten Grundwasserneubildungsrate auf Basis eines Trockenwetterdargebots als Handlungsoption geprüft werden (KLIWA, 2017).

Summary

By applying the soil-water balance model GWN-BW, groundwater recharge in southern Germany (Baden-Württemberg, Bavaria, Rhineland-Palatinate and Hesse) has been simulated for the first time in high temporal and spatial resolution for the period of 1951 to 2015. All state variables and water-balance parameters have been calculated for 401.728 individual areas. Table 2 contains the mean values of the discussed parameters for the period 1951 to 2010 as well as the recent past (2011 to 2015) for the four federal states and the thirty natural areas. Further results based on a variety of analyses (maps, bar-, circle- and trend charts) are discussed in detail in KLIWA (2017).

While air temperature did not reveal a clear trend from 1951 to 1987, a highly significant warming trend (MK-Test, $p < 0.05$)

Tabelle 2

Mittelwerte der Zustands- und Wasserhaushaltsgrößen für die Zeiträume 1951 bis 2010 und 2011 bis 2015 für die 4 Bundesländer und 30 Naturräume (naturräumlich hydrogeologische Einheiten).

Mean values of the state variables and water balance parameter for the periods 1951 to 2010 and 2011 to 2015 in the four federal states and 30 natural areas (hydrogeological-natural area units).



Mittelwerte 1951 - 2010/2011 - 2015

Darstellungsebene	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm/a)	Tatsächliche Verdunstung (mm/a)	Gesamtabfluss (mm/a)	Grundwasserneubildung (mm/a)	Trockenheitsindex (Tage/a)
Süddeutschland	8.2/9.3	903/818	534/526	368/308	174/144	52/65
Baden-Württemberg	8.3/9.5	969/881	567/548	401/350	187/161	43/58
Bayern	7.8/8.9	938/852	528/521	409/347	206/173	49/60
Hessen	8.5/9.5	779/703	521/525	258/191	109/75	58/65
Rheinland-Pfalz	8.9/9.9	788/712	510/509	277/221	104/81	76/93
1	6.1/7.2	1768/1656	562/588	1204/1087	505/457	36/26
2	7.8/8.9	1120/1027	628/627	491/409	251/207	10/18
3	8.1/9.3	842/770	581/568	260/218	159/133	20/37
4	8.1/9.3	884/811	569/567	314/255	225/179	13/24
5	7.0/8.2	943/837	513/512	429/346	186/151	48/60
6	7.8/8.9	769/700	461/448	306/271	128/113	77/88
7	7.9/9.1	801/712	456/431	344/299	257/223	91/104
8	8.1/9.3	738/648	470/444	268/215	154/122	64/87
9	7.3/8.4	913/839	509/493	402/363	209/186	52/65
10	8.3/9.4	722/659	470/450	250/223	99/87	80/94
11	8.6/9.8	866/781	538/516	327/280	131/111	47/67
12	8.8/9.9	714/637	462/443	252/209	133/109	76/94
13	8.6/9.7	881/760	547/524	332/255	152/114	72/92
14	7.6/8.9	1388/1266	664/654	723/636	284/248	29/42
15	10.1/11.2	900/851	605/598	295/265	192/168	33/44
16	10.3/11.3	664/598	533/516	130/96	74/48	85/102
17	9.9/11.0	599/553	466/471	132/100	46/29	84/101
18	9.2/10.4	852/742	587/571	263/198	173/127	87/120
19	8.8/10.0	743/677	463/469	279/232	96/79	81/97
20	8.6/9.5	828/750	510/511	317/252	87/69	71/86
21	8.9/9.8	808/754	458/464	349/303	201/173	76/90
22	7.7/8.7	898/788	436/439	461/364	259/203	47/63
23	8.8/9.8	679/677	480/506	198/184	113/104	69/74
24	8.7/9.6	766/685	501/504	265/191	85/53	56/64
25	7.8/8.8	1014/911	502/517	510/412	152/121	40/51
26	8.6/9.6	774/699	545/552	228/161	73/45	73/88
27	8.3/9.3	835/733	514/516	321/229	137/92	50/53
28	8.1/9.1	769/705	525/533	243/185	121/89	54/58
29	8.4/9.4	696/626	474/481	222/155	99/64	48/53
30	8.1/9.0	775/704	509/525	265/191	90/60	52/54

since the end of the 1980s is striking. Thus mean temperature increased by +1.2 °C in 2011 to 2015 compared to the long-term average of 8.2 °C (1951 to 2010).

Annual precipitation does not yet exhibit a clear trend during the observation period from 1951 to 2015, although the period since 2003 is characterized by below-average precipitation. However, precipitation during the winter half year (November to April) highlights a non-homogenous development. While the period from the beginning of the 1980s to the beginning of the 2000s was characterized by relatively high amounts of winter precipitation, the recent past (2003 to 2015) shows a clear tendency towards drier conditions from November to April.

In all federal states, potential evapotranspiration reveals a clearly rising trend since the end of the 1980s (MK-Test, $p < 0.05$), narrowing the climatic water balance. Since then, actual evapotranspiration in water-rich Baden-Württemberg and Bavaria increased, although single dry years as well as the period 2011 to 2015 led to limited actual evapotranspiration rates. The overall rising evaporative demand correlates well with higher air temperatures and prolonged vegetation periods.

Total runoff and seepage water as results of the soil water balance model differ in the surface runoff, which is only defined for settlement areas and open water bodies. While no consistent development of both parameters is recognizable for the period from 1951 to 2015, the relatively dry recent past (since 2003) shows a tendency towards lower rates. Since then, the majority of years were below-average.

Similarly, groundwater recharge shows no clear trend during the observation period from 1951 to 2015. While increases during the humid 1980s and partly in the 1990s were observed, decreases have occurred since the year 2003. Overall, the recent past (since 2003) is characterized by a majority of years with below average groundwater recharge.

The drought index (number of days with values < 30 % of the available water capacity) indicates an increase in the number of days below the defined threshold, which is especially detectable in the recent past. This gives evidence of a rising number of drought periods and increased agricultural irrigation requirements.

The presented results reveal changes of state variables and water balance parameters during the period from 1951 to 2015, which were particularly observable in the recent past since the year 2003. The results enable a large-scale assessment of spatial and temporal changes of soil water budget components and thus groundwater recharge in southern Germany. Especially the years 2011 to 2015 show the necessity to develop (regional) measures to ensure the supply of drinking water in sufficient quantity and quality for the population in the future. Thus regional conflicts between drinking water supply and competing utilizations (e.g. agricultural irrigation) shall be prevented (LfU, 2017). Especially in regions with low available groundwater resources (HAD map 5.2) (BMU, 2003), it should be refrained from applying mean long-term groundwater recharge rates regarding a sustainable use of groundwater. Instead, it is recommended to apply reduced groundwater recharge rates based on multi-year dry weather conditions (KLIWA, 2017).

Anschriften der Verfasser

Dr. Benjamin Kopp
Dr. Jörg Neumann
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Hans-Högn-Straße 12
95030 Hof
benjamin.kopp@lfu.bayern.de
joerg.neumann@lfu.bayern.de

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

Jochen Kampf
Christoph Baumeister
Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Straße 7
55116 Mainz
jochen.kampf@lfu.rlp.de
christof.baumeister@lfu.rlp.de

Mario Hergesell
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
mario.hergesell@hlnug.hessen.de

Andreas Morhard
GIT HydroS Consult GmbH
Bertholdstraße 61
79098 Freiburg
andreas.morhard@hydroconsult.de

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, ISBN 978-3-510-95920-4
- ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. - Freiburger Schriften zur Hydrologie 17, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg
- BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Lieferung 1-3 mit 51 Kartentafeln - Bonn/Berlin 2000/2001/2003.
- CHMIELEWSKI, F. M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: ENDLICHER, W. & F. W. GERSTENGARBE: Der Klimawandel, Einblicke, Ausblicke und Rückblicke. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., 75-85
- DESTATIS (2013): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserversorgung – Öffentliche Wasserversorgung. – Fachserie 19, Reihe 2.1.1; <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/WasserOeffentlich.html>
- DWA (2011): Wirkung und Folgen möglicher Klimaänderungen auf den Grundwasserhaushalt. DWA Themen. – T1/2011. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef
- DWD (2016): Nationaler Klimareport 2016; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 40 Seiten

- 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
- HERGESELL, M. & BERTHOLD, G. (2004): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). – Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden
- HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H. & WENDLAND, F. (2013): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Modell mGROWA. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 57 (5), 206-224; DOI: 10.5675/HyWa_2013,5_2
- HERRMANN, F., HÜBSCH, L., ELBRACHR, J., ENGEL, N., KELLER, L., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H. & WENDLAND, F. (2017): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 61 (4), 244-260; DOI: 10.5675/HyWa_2017,4_3
- IfL (LEIBNITZ-INSTITUT FÜR LÄNDERKUNDE) (2003): Nationalatlas von Deutschland – Mittlere jährliche Grundwasserneubildung, Bd. 2 Relief, Boden und Wasser, 144-145
- JANKIEWICZ, P., NEUMANN, J., DUIJNISVELD, W. H. M., WESSOLEK, G., WYCISK, P. & HENNINGS, V. (2005): Abflusshöhe, Sickerwasserrate – Grundwasserneubildung – Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 49 (1), 2-13
- KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Bade-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. – KLIWA Berichte Heft 17; <http://www.kliwa.de/publikationen-hefte.htm>
- KLIWA (2017): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015). – KLIWA Berichte Heft 21; <http://www.kliwa.de/publikationen-hefte.htm>
- LfU (2009): Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500.000 – Blatt 4: Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971-2000), Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof
- LfU (2017): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen, Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), S. 240; <http://nid.bayern.de/files/docs/niedrigwasserbericht.pdf>
- MENZEL, L. (1999): Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, PIK Report 54
- MORHARD, A. (2009): Kurzbeschreibung des Modells GWN-BW. Erweiterungen in Version 2.0. Stand 13.5.2009, ergänzt Mai 2011; <https://www.hydroconsult.com/hydrologie/bodenwasserhaushalt/>
- MORHARD, A. (2013): Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und flächenhafter Grundwasserneubildung 1951-2010. – Unveröffentl. Gutachten im Auftrag der KLIWA AG Grundwasser. – GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg
- MORHARD, A. (2015): Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW für Hessen. Modellfortschreibung und Erweiterungen 2013/2014 (unveröffentlicht) im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. – GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg
- MEßER, J. (1997): Auswirkungen der Urbanisierung auf die Grundwasserneubildung im Ruhrgebiet unter besonderer Berücksichtigung der Castroper Hochfläche und des Stadtgebietes Herne. – DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Heft 58. – Bochum
- NEUMANN, J. (2009): Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland – Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GW-Neu. – Geologisches Jahrbuch, Heft SC 6, Hannover
- PEEL, M. C., B. L. FINLAYSON & T. A. MCMAHON (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1633-1644, DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007
- RAUTHE, M., H. STEINER, U. RIEDIGER, A. MAZURKIEWICZ & A. GRATZKI (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), Meteorologische Zeitschrift 22 (3), 235–256, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0436
- StMUV (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie 2016; Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München, 222 Seiten
- WaBoA (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Umweltministerium Baden-Württemberg und Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Stuttgart, Karlsruhe