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

KLIWA-Projekt A 2.3.4: Langzeitverhalten des Grundwasserhaushalts
KLIWA-Projekt B 3.3.2: Simulation der Grundwasserneubildung mit
weiteren regionalen Klimaprojektionen

KLIWA-Berichte

Heft 21



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

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

*KLIWA-Projekt A 2.3.4:
KLIWA-Projekt B 3.3.2:*

*Langzeitverhalten des Grundwasserhaushalts
Simulation der Grundwasserneubildung mit
weiteren regionalen Klimaprojektionen*

KLIWA-Berichte

Heft 21



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

IMPRESSUM

Herausgeber

Arbeitskreis KLIWA

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW¹),
Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU²),
Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU³),
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG⁴) (Gaststatus)
Deutscher Wetterdienst (DWD)

www.kliwa.de

Herausgabedatum

März 2017

ISBN

978-3-88251-395-0

Bearbeitung

KLIWA-AG Grundwasser

Christof Baumeister³, Thomas Gudera¹, Mario Hergesell⁴,
Jochen Kampf³, Dr. Benjamin Kopp², Dr. Jörg Neumann²,
Wolfgang Schwebler³, Michel Wingerling¹

Grundlage

Untersuchungen im Auftrag der KLIWA-AG Grundwasser
Andreas Morhard (2009, 2013, 2014, 2015)
GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg

Druck

Louis Hofmann Druck- und Verlagshaus, Sonnefeld

Umwelthinweis

Druck auf Recyclingpapier

Bezug über

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und
Naturschutz Baden-Württemberg
76231 Karlsruhe
<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/6646/>

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Hans-Högn-Straße 12
95030 Hof

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Straße 7
55116 Mainz

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und
Geologie
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung der Herausgeber unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	11
2 Simulation der Wasserhaushaltsgrößen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell	12
2.1 Kurzbeschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells	12
2.2 Physiographische Eingangsdaten	13
2.3 Aufbereitung und Prüfung der Klimadaten.....	15
2.4 Initialisierung von Schneedecke und Bodenspeicher	16
2.5 Abgleich mit REGNIE-Rasterdaten.....	16
3 Ergebnisse der Langzeitsimulation 1951-2015	18
3.1 Auswertumfang	18
3.1.1 Wasserbilanz- und Zustandsgrößen.....	18
3.1.2 Darstellungsebenen	19
3.1.3 Übersicht der durchgeführten Auswertungen	20
3.2 Entwicklung der Wasserbilanz- und Zustandsgrößen im Untersuchungszeitraum 1951-2015.....	21
3.2.1 Lufttemperatur	21
3.2.2 Niederschlag	26
3.2.3 Tatsächliche Verdunstung	31
3.2.4 Gesamtabfluss	38
3.2.6 Direktabfluss.....	43
3.2.7 Grundwasserneubildung aus Niederschlag.....	47
3.2.7 Trockenheitsindex	53
3.2.8 Wasseräquivalent der Schneedecke	59
4 Entwicklung in der Vergangenheit und Perspektiven für die Zukunft	64
4.1 Lufttemperatur	64
4.2 Niederschlag	66
4.3 Tatsächliche Verdunstung	67
4.4 Gesamtabfluss	69
4.5 Direktabfluss	71
4.6 Grundwasserneubildung aus Niederschlag	72
4.7 Trockenheitsindex.....	74
4.8 Wasseräquivalent der Schneedecke	75
5 Sensitivität der Grundwasserneubildung in den Naturräumen - Auswirkungen auf die Grundwasserbewirtschaftung	78
5.1 Charakteristik der Wasserhaushaltskomponenten für nasse und trockene Dekaden	78
5.2 Klassifizierung der Variabilität der Grundwasserneubildung	80
5.3 Mögliche Konsequenzen für die Abschätzung des nutzbaren Grundwasserdargebotes	82
6 Hinweise und Handlungsempfehlungen für die Grundwasserbewirtschaftung in der nahen Zukunft	86
7 Ausblick	89
8 Literatur	90



Verwendete Abkürzungen	91
Verzeichnis der Abbildungen	92
Verzeichnis der Tabellen	95
Anhang	97
Digitaler Anhang (CD)	97
Bisher erschienene KLIWA-Berichte	101

„Wer in der Zukunft lesen will, muss in der Vergangenheit blättern“

André Malraux, französischer Schriftsteller, * 3.11.1901 † 23. 11. 1976

Zusammenfassung

Ziele und Umfang der Untersuchungen

Im Süden Deutschlands wird der überwiegende Teil des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen. Einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen kommt folglich eine besondere Bedeutung zu. Die Kenntnis über mögliche langfristige Entwicklungen der regionalen Grundwasserverhältnisse ist daher von grundlegendem Interesse.

In dem vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse von Simulationen des Bodenwasserhaushalts und der daraus resultierenden Grundwasserneubildung für die Vergangenheit (1951-2015) auf der Basis von Messdaten dargestellt. Die zugrunde liegenden Berechnungen und Auswertungen wurden im Rahmen des Vorhabens KLIWA für die Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und erstmalig für Hessen durchgeführt. Dabei sollte aufgezeigt werden, ob und inwieweit Veränderungen von Komponenten des Bodenwasserhaushalts und insbesondere der Grundwasserneubildung bereits in den vergangenen 65 Jahren (1951-2015) stattgefunden haben. Ergänzend werden anschließend Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen auf der Basis von regionalen Klimamodellen getätigt.

Die im Zuge dieser Studie durchgeführten Auswertungen schließen folgende Auswertegrößen mit ein, die allesamt in enger Beziehung zur Grundwasserneubildung stehen:

- **Lufttemperatur** als verdunstungsrelevante, regionalisierte Modelleingangsgröße;
- **Niederschlagshöhe** als regionalisierte Modelleingangsgröße und wichtigste Wasserbilanzkomponente;
- **Tatsächliche Verdunstung** als zentrales Simulationsergebnis und wichtigste Verlustgröße der Wasserbilanz;
- **Gesamtabflusshöhe** als Wasserbilanzkomponente, welche der Differenz zwischen Niederschlag und tatsächlicher Verdunstung entspricht;
- **Sickerwasserrate** als vertikale Sickerung aus dem Bodenspeicher;
- **Direktabflusshöhe** als Bilanzkomponente, welche der Summe aus Oberflächenabfluss und Interflow entspricht;
- **Grundwasserneubildung** als Bilanzkomponente, welche näherungsweise den Basisabfluss beschreibt und der Differenz zwischen Gesamtabfluss und Direktabfluss entspricht; die Grundwasserneubildung ist maximal so hoch wie die Sickerwasserrate;
- **Wasseräquivalent der Schneedecke** als Zustandsgröße zur Beschreibung des mittleren Schneedeckenverhaltens und damit von Änderungen des Niederschlags- und Temperaturregimes;
- **Trockenheitsindex** als Zustandsgröße zur Beschreibung der Bodenwasserverhältnisse, insbesondere hinsichtlich der Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers während Trockenperioden.

Methodische Aspekte

Das verwendete Simulationsmodell GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenzierendes Bodenwasserhaushaltsmodell zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung, des Bodenwasserhaushaltes sowie der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. Die berechnete Sickerwassermenge entspricht in ebenen Porengrundwasserleitern, in denen schnelle laterale Abflusskomponenten vernachlässigt werden kön-



nen, in der Regel der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. In Gebieten mit schnellen lateralen Abflusskomponenten, wie z. B. in den meisten Festgesteinsgrundwasserleitern, ist eine Reduktion mit dem sog. Baseflow-Index (BFI) erforderlich, um den neubildungsrelevanten Anteil der Sickerwasserrate bzw. der Gesamtabflusshöhe zu ermitteln.

Der meteorologische Antrieb für das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW besteht aus Tageswerten für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windstärke an Niederschlags- und Klimastationen. Alternativ zu den beiden letztgenannten Parametern können auch Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit als Modellinput verwendet werden. Ebenso wie die Verwendung von Stationsdaten ist auch die Vorgabe extern regionalisierter Daten, wie z. B. der REGNIE-Niederschlagsraster (DWD) möglich.

Die tatsächliche Verdunstung als zentrale Ergebnisgröße der Bodenwasserhaushaltsmodellierung ist vor allem von Temperatur, Niederschlag, Bodeneigenschaften und Landnutzung abhängig und von entscheidender Bedeutung für die Höhe und die jahreszeitliche Verteilung der verschiedenen Abflusskomponenten. Änderungen des Niederschlags, der Temperatur und weiterer Größen sind somit in unterschiedlichem Maße immer auch verdunstungsrelevant. Für die Verdunstungsberechnung wurden landnutzungsabhängige Parameter verwendet, welche eine witterungsabhängige Beschreibung der Eintrittszeitpunkte phänologischer Entwicklungsphasen erlauben („dynamisierte Vegetation“). Dabei werden die Zeitpunkte, zu denen die Vegetation einen bestimmten Entwicklungsstand erreicht, nicht mehr statisch höhenabhängig, sondern standort- und witterungsabhängig über Temperatursummen berechnet.

Datenbasis und -aufbereitung

Das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW benötigt physiographische Daten, die aus der Landnutzung, der Bodenkarte und dem Höhenmodell abgeleitet werden. Bei der Erstellung der physiographischen Eingangsdatensätze wurde darauf geachtet, eine weitgehend länderübergreifende Konsistenz hinsichtlich Datengrundlage und Methodik zu erreichen. So basieren die Grundflächen für alle drei Länder auf einer Verschneidung der CORINE-Landnutzung mit der jeweils am besten aufgelösten, landesweit verfügbaren Bodenkarte. Insgesamt entstanden somit 401 728 Grundflächen mit jeweils einheitlicher Landnutzungs-nFKWe (nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum)-Kombination, welche die vier Landesflächen mit insgesamt 147 286 km² abbilden.

Für die KLIWA-Langzeitsimulation wurde jeweils die höchste verfügbare Anzahl an Klima- und Niederschlagsstationen der vier Bundesländer sowie der benachbarten Bundesländer und Staaten verwendet. Da sich diese im Laufe der Zeit veränderte, kann keine genaue Aussage über die verwendete Stationsanzahl getätigt werden. So war beispielsweise die DWD-Stationsdichte in den 50er-Jahren noch recht gering, während Sie mit Beginn der 60er Jahre deutlich zugenommen hat und ihr Maximum in den 1990er Jahren erreichte. Seit der Jahrtausendwende ist die Stationsdichte wieder leicht rückläufig.

Für die KLIWA-Szenarienrechnung wurde der WETTREG2010 (ECHAM5/A1B)-Datensatz (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode) mit 250 Klima- und 1 827 Niederschlagsstationen verwendet. Dieser deckt das KLIWA-Untersuchungsgebiet, die angrenzenden Bundesländer sowie die Schweiz und Österreich teilweise ab. Die Berechnungen wurden für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) durchgeführt. Ergänzend werden ausgewählte Ergebnisse aus KLIWA-Heft 17 (KLIWA 2012) auf Basis der Klimaprojektion WETTREG2006 herangezogen.

Untersuchungsergebnisse

Als zentrale Untersuchungsergebnisse der Langzeitsimulation (1951-2015) liegen Absolutwerte aller Größen auf Monatsbasis vor. Je nach Bedarf können damit einzelne Zeitschritte (Monate, (hydrologische) Halbjahre und Jahre, Dekaden) hinsichtlich ihrer absoluten und relativen Änderung gegenüber einer beliebigen Vergleichsperiode betrachtet werden. Im Rahmen des vorliegenden Berichts wurden als Vergleichsperioden für die jeweils gewählten Zeitschritte die 60-jährige Periode 1951-2010 sowie die beiden 30-jährigen Perioden 1951-1980 und 1981-2010 verwendet.

Alle Ergebnisse wurden parameterspezifisch und differenziert nach Bundesländern und Naturräumen aufbereitet. Mit Hilfe von Karten, Säulen- und Ringdiagrammen sowie Trenddreiecken können sowohl Aussagen zur räumlichen Differenzierung als auch zu den statistischen Werteverteilungen und der innerjährlichen Dynamik getroffen werden. Insgesamt liegen mehr als 15 000 Diagramme und Karten vor, von denen eine Auswahl im vorliegenden Heft dargestellt ist. Auf die Gesamtheit aller vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann über den „digitalen Anhang“ auf beigefügter CD zugegriffen werden.

Die wesentlichen erzielten Ergebnisse für die Entwicklung der einzelnen Auswertegrößen in der Vergangenheit, basierend auf der Modellvariante mit REGNIE-Niederschlag, lassen sich für die Bundesländer wie folgt zusammenfassen:

Entwicklung der Lufttemperatur

Die mittlere Lufttemperatur im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt über alle vier Bundesländer bei 8.2°C und variiert von 7.8°C in Bayern bis 8.9°C in Rheinland-Pfalz. Im Vergleich hierzu war die 30-jährige Periode 1951-1980 durch kühlere Temperaturen (-0.4°C im Vergleich zum vieljährigen Mittel) geprägt, wohingegen die mittlere Temperatur der Dekade 1981-1990 in etwa der des vieljährigen Mittels entsprach. Mit Beginn der 1990er Jahre zeigt sich eine signifikante und räumlich einheitliche Erwärmung, so dass in der Dekade 2001-2010 die mittleren Temperaturen schließlich um 0.7°C über dem vieljährigen Mittel lagen. Insbesondere die Frühlings- und Sommermonate wiesen die deutlichste Erwärmung um ca. 1°C auf. Nur der Monat Dezember kühlte sich in allen Bundesländern geringfügig ab (-0.2 bis -0.4°C).

Im Zeitraum 2011-2015 lag die mittlere Temperatur um 1.1°C über dem vieljährigen Mittel. Mit einer Erwärmung um 1.4°C wiesen die Wintermonate dabei die stärkste Erwärmung auf, während sie in den Sommermonaten mit im Mittel 0.8°C geringer ausfiel. Einzig der Februar wies mit Änderungen zwischen 0.0°C und -0.6°C kühlere Temperaturen im Vergleich zum Zeitraum 1951-2010 auf.

Entwicklung des Niederschlags

Die jährliche Niederschlagsmenge im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt über alle vier Bundesländer bei 903 mm und variiert von 779 mm in Hessen bis 969 mm in Baden-Württemberg. Auf Jahresbasis zeigt der Niederschlag keine eindeutige Entwicklung. Vielmehr kam es zu deutlichen temporären Schwankungen der jährlichen Niederschlagsmengen. So wechselten sich mehrfach Nass- und Trockenperioden über Zeiträume von rd. 6 bis 10 Jahren ab. Dies betrifft vor allem die trockenen Dekaden 1951-1960, 1971-1980 und 2006-2015. Bei Betrachtung der Einzelmonate bzw. der hydrologischen Halbjahre zeigt sich, je nach betrachtetem Zeitraum, eine unterschiedliche Tendenz bei der Entwicklung der Winterniederschläge in allen Bundesländern.

So tritt über den Gesamtzeitraum 1951-2015 eine geringe Zunahme auf, welche vor allem auf sehr niedrigen Winterniederschlägen in den 1950er Jahren und hohen Winterniederschlägen in den 1990er und 2000er Jahren beruht. Bereits ab den Zeiträumen 1961-2015 und 1971-2015 ist dann eine geringe abnehmende Tendenz erkennbar, welche ab dem Zeitraum 1981-2015 deutlicher ausfällt. Die Entwicklung der Sommerniederschläge weist hingegen keinen eindeutigen Trend auf. Im Zeitraum 2011-2015 war das Winterhalbjahr in den KLIWA Ländern im Mittel zwischen 15 und 21 % trockener als im Zeitraum 1951-2010, das Sommerhalbjahr hingegen nur geringfügig trockener.



Entwicklung der tatsächlichen Verdunstung

Die jährliche tatsächliche Verdunstung 1951-2010 liegt gemittelt über alle vier Bundesländer bei 534 mm und variiert von 510 mm in Rheinland-Pfalz bis 567 mm in Baden-Württemberg. Die zeitliche Entwicklung zeigt einen deutlichen Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge und der Lufttemperatur. So ging die Verdunstungsmenge in den trockenen und relativ kühlen Dekaden 1951-1960 und 1971-1980 zurück, wohingegen seit Beginn der wärmeren 1990er Jahre ein Anstieg der tatsächlichen Verdunstung zu beobachten ist. Die höchsten Verdunstungsraten erfolgten dann in der Dekade 2001-2010. Diese basierten überwiegend auf steigenden Verdunstungsraten in den Frühlings- und Herbstmonaten. Während der Anstieg der Verdunstung in den trockeneren Bundesländern Hessen und Rheinland-Pfalz auf Grund des limitierten Wasserdargebots geringer ausfällt, ist der Anstieg in Bayern und Baden-Württemberg deutlicher ausgeprägt. Der Einfluss des limitierten Wasserdargebots zeigt sich sehr deutlich bei Betrachtung der potentiellen Verdunstung. In allen Bundesländern stieg der Verdunstungsbedarf mit Beginn der 1990er Jahre signifikant an. Im Zeitraum 2011-2015 nahm die tatsächliche Verdunstung in allen Bundesländern in den Wintermonaten zu, wohingegen sie im Sommerhalbjahr auf Grund temporären Wassermangels abnahm.

Entwicklung von Gesamtabfluss und Sickerwasserrate

Die jährliche Gesamtabflusshöhe im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt über alle vier Bundesländer bei 368 mm und variiert von 277 mm in Hessen bis 409 mm in Bayern. Entsprechend der Entwicklung der bisherigen Auswertegrößen zeigt sie einen deutlichen Rückgang in den trockenen Dekaden 1951-1960 und 1971-1980 sowie in der, von steigendem Verdunstungsbedarf gekennzeichneten Dekade 2001-2010 auf. Während sich auf Jahresbasis sowie für das hydrologische Sommerhalbjahr keine einheitlichen Trends ableiten lassen, weisen im Zeitraum 2000-2010 alle Bundesländer einen mehr oder weniger ausgeprägte Zunahme der Gesamtabflusshöhe während des hydrologischen Winterhalbjahres auf. Der Zeitraum 2011-2015 war dann durch eine deutliche Abnahme der Gesamtabflusshöhe bzw. Sickerwasserrate zwischen -13 % in Baden Württemberg und -26 % in Hessen gekennzeichnet. Diese Abnahme war, mit Ausnahme des Januars, in den Wintermonaten am stärksten ausgeprägt.

Entwicklung des Direktabfluss

Die jährliche Direktabflusshöhe im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt über alle vier Bundesländer bei 194 mm und variiert von 145 mm in Hessen bis 214 mm in Baden-Württemberg. Als direkte Bilanzgröße aus der Gesamtabflusshöhe weist die Direktabflusshöhe ein analoges Verhalten mit niedrigeren Raten während der trockenen Dekaden 1951-1960 und 1971-1980 sowie in der von steigenden Verdunstungsraten geprägten Dekade 2001-2010 auf. Bei Betrachtung der Kalenderjahre im Gesamtzeitraum zeigt sich keine einheitliche Entwicklung des Direktabflusses. Im Zeitraum 2011-2015 treten, im Vergleich zum vieljährigen Mittel, in allen Bundesländern geringere Direktabflusshöhen zwischen -12 % in Baden-Württemberg und -23 % in Hessen auf.

Entwicklung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Die jährliche Grundwasserneubildung im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt über alle vier Bundesländer bei 174 mm und variiert von 104 mm in Rheinland-Pfalz bis 206 mm in Bayern. Als direkte Bilanzgröße aus der Gesamtabflusshöhe bzw. der Sickerwasserrate weist die Grundwasserneubildung eine analoges Verhalten mit niedrigeren Raten während der trockenen Dekaden 1951-1960 und 1971-1980 sowie in der von steigenden Verdunstungsraten geprägten Dekade 2001-2010 auf. Bei Betrachtung der Kalenderjahre im Gesamtzeitraum zeigt sich keine einheitliche Entwicklung der Grundwasserneubildungsraten. Im Zeitraum 2011-2015 treten, im Vergleich zum vieljährigen Mittel, in allen Bundesländern geringere Grundwasserneubildungsraten zwischen -14 % in Baden-Württemberg und -31 % in Hessen auf.

Entwicklung des Trockenheitsindex

Der Trockenheitsindex nach WaBoA (2007) ist definiert als die Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers (< 30% der nutzbaren Feldkapazität). Der jährliche Trockenheitsindex im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt über alle vier Bundesländer bei 52 Tagen und variiert von 43 Tage in Baden-Württemberg bis 76 Tage in Rheinland-Pfalz. Der mittlere Trockenheitsindex lag in allen Bundesländern im Zeitraum 1951-1970 unter dem vieljährigen Mittel. Von 1971 bis 1990 gibt es keine einheitliche Entwicklung. Während der Trockenheitsindex in Baden-Württemberg und Hessen zunahm, zeigten Bayern und Rheinland-Pfalz eine Abnahme während der feuchten Dekade 1981-1990. Mit Beginn der 1990er Jahre erfolgte in allen Bundesländern eine Zunahme des Trockenheitsindex gegenüber dem vieljährigen Mittel. Diese ist, auf Grund des steigenden Verdunstungsbedarfs bei gleichbleibenden Sommerniederschlägen, seit Mitte der 1990er Jahre im hydrologischen Sommerhalbjahr in Rheinland-Pfalz signifikant. Im Zeitraum 2011-2015 stieg der Trockenheitsindex zwischen 7 Tage in Hessen bis 18 Tage in Rheinland-Pfalz gegenüber dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Während der überwiegende Anstieg im Sommerhalbjahr zu verzeichnen war, zeigt sich auf Grund der verlängerten Vegetationsperiode ebenfalls eine leichte Zunahme im November und April.

Veränderung des Wasseräquivalents der Schneedecke

Das mittlere Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März im Zeitraum 1951-2010 liegt, gemittelt über alle vier Bundesländer, bei 18 mm und variiert von 5 mm in Rheinland-Pfalz bis 26 mm in Bayern. Während im Zeitraum 1951-1990, mit Ausnahme der Dekade 1971-1980, das Wasseräquivalent der Schneedecke über dem langjährigen Mittel lag, reduzierte sich dieses mit Beginn der 1990er Jahre in allen Bundesländern spürbar. Diese Abnahme ist in allen Bundesländern bis auf das ohnehin nahezu schneefreie Bundesland Rheinland-Pfalz signifikant. Eine Zunahme des Wasseräquivalents der Schneedecke erfolgte in der Dekade 2001-2010 lediglich im Monat Dezember. Im Zeitraum 2011-2015 verringerte sich das mittlere Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010 zwischen -34 % in Bayern bis zu -55 % in Baden-Württemberg.



Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse deuten in einem überregionalen Kontext auf bereits stattgefundene Änderungstendenzen innerhalb des 65-jährigen Untersuchungszeitraums von 1951-2015 hin. Sie erlauben damit eine großräumige Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Bodenwasserhaushaltskomponenten und somit der Ressource Grundwasser im gesamten süddeutschen Raum als tatsächliche Auswirkungen des Klimawandels. Dies gilt insbesondere für die in allen Bundesländern stattgefundene gleichräumige Erwärmung der Lufttemperatur mit Beginn der 1990er Jahre und dem damit einhergehenden gestiegenen Verdunstungsbedarf, welcher sichtbare Auswirkungen auf weitere Wasserhaushaltsgrößen hat.

Auf Basis dieser Ergebnisse kann die mögliche zukünftige Entwicklung anhand der bereits gerechneten Klimaprojektionen WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) (KLIWA 2012) und WETTREG2010 (ECHAM5/A1B) nun besser eingeordnet werden.

Die Sensitivität der Grundwasserneubildung wurde auf der Basis von 30 Naturräumen in den vier Ländern bewertet, indem für jeden Naturraum die jeweils am stärksten ausgeprägte Trockendekade ermittelt wurde. Bei 60 % der Naturräume betrifft diese Trockendekade die jüngere Vergangenheit ab 2003 bzw. ab 2006. Anhand der klassifizierten Abweichung der Grundwasserneubildung in der Trockendekade vom vieljährigen Mittel 1951-2010, werden Orientierungswerte zur Reduktion der Grundwasserneubildung für gering ergebnisreiche und teilweise gering ergebnisreiche Naturräume vorgeschlagen. Die Identifikation möglicher Problemgebiete dient letztlich auch als Grundlage für vertiefte, räumlich höher auflösende Untersuchungen zur Ableitung regionaler Anpassungsmaßnahmen. Im Rahmen von KLIWA werden diese speziellen Fragestellungen in Form von Fallstudien bearbeitet.

Die aktuellen Emissionsszenarien und Globalmodelle liefern für die künftige Klimaentwicklung keine einheitliche Aussage, sondern eine Bandbreite möglicher Entwicklungen. Aufgrund der Unsicherheiten der globalen und regionalen Klimamodellierung dürfen Aussagen zu den Folgen des Klimawandels langfristig nicht mehr nur auf einzelne regionale Klimaprojektionen gestützt werden. Bei zukünftigen Impaktmodellierungen im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA wird zur Berücksichtigung der beschriebenen Bandbreite daher die gleichzeitige Betrachtung von mehreren regionalen Klimaprojektionen angestrebt.

Neben den oben erwähnten modellgestützten Untersuchungen wird auch die aktuelle Entwicklung auf Basis von Messdaten ein weiteres wichtiges Thema bleiben. Hierzu zählt neben der jährlichen Fortführung der Langzeitsimulation eine regelmäßige Aktualisierung der in KLIWA-Heft 16 erstmals dargestellten Ergebnisse zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen.

1 Einleitung

Unter den Bilanzgrößen des Wasserhaushalts kommt der flächenhaften Grundwasserneubildung eine große Bedeutung zu. So stellt die Grundwasserneubildung als „Bilanzrest“ eine regional besonders sensitive Größe im Hinblick auf Änderungen des Klimageschehens dar. Da die Wasserversorgung in Süddeutschland zum überwiegenden Teil auf der Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen basiert, spielt die Grundwasserneubildung eine wesentliche Rolle für die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung. Mögliche Änderungen der Grundwasserneubildungsrate als Folge des Klimawandels können daher direkte Auswirkungen auf die Grundwasservorkommen und damit auf die Versorgungssicherheit haben.

Für die Sicherstellung der öffentlichen Trinkwasserversorgung in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz sind rund 4 300 Wasserversorgungsunternehmen verantwortlich. Ihre Aufgabe ist es, Trinkwasser in ausreichender Menge und Qualität der Bevölkerung zur Verfügung zu stellen. Eine nachhaltige Nutzung der Ressource Grundwasser ist daher unumgänglich.

Das Kooperationsvorhaben KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hat zum Ziel, den Klimawandel in Süddeutschland und damit verbundene mögliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Ergänzend zu den in die Zukunft gerichteten, länderübergreifenden Szenariosimulationen (KLIWA 2012) wurde nun mit Beteiligung von Hessen eine Langzeitsimulation für die Vergangenheit (1951-2015) durchgeführt. Damit liegen erstmalig für den gesamten süddeutschen Raum methodisch vergleichbare und auf weitgehend einheitlicher physiografischer Datengrundlage (Landnutzung, Böden, etc.) basierende Ergebnisse für die wichtigsten Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts und der flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag vor. Im Mittelpunkt dieses Berichts steht die Darstellung der umfangreichen, auf den beiden Gliederungsebenen Bundesländer und Naturräume vorgenommenen Auswertungen, die Identifikation bereits eingetretener Veränderungen sowie die Interpretation der Simulationsergebnisse im Kontext mit möglichen klimabedingten Veränderungen in der Zukunft.



2 Simulation der Wasserhaushaltsgrößen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell

2.1 Kurzbeschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells

Das verwendete Simulationsmodell GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. In den einzelnen Teilmodulen (Abb. 2.1) kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Berechnung von tatsächlicher Verdunstung und Sickerwasserrate zur Anwendung. Die berechnete Sickerwasserrate entspricht in Gebieten mit vernachlässigbaren schnellen lateralen Abflusskomponenten (z. B. in den meist ebenen Porengrundwasserleitern) der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. In Gebieten mit nennenswerten schnellen lateralen Abflusskomponenten (z. B. in den Mittelgebirgen bzw. den meisten Festgesteinsgrundwasserleitern) ist eine Reduktion der Sickerwasserrate bzw. der Gesamtabflusshöhe mit dem sog. Baseflow-Index (BFI) erforderlich um die Grundwasserneubildung zu ermitteln (Abb. 2.2). Die Kurzbezeichnung GWN-BW (Grundwasserneubildung- Bodenwasserhaushalt) beschreibt den gesamten Prozess, also die zeitlich hochaufgelöste Simulation des Bodenwasserhaushalts mit der daraus resultierenden Abflussbildung und der anschließenden Ableitung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.

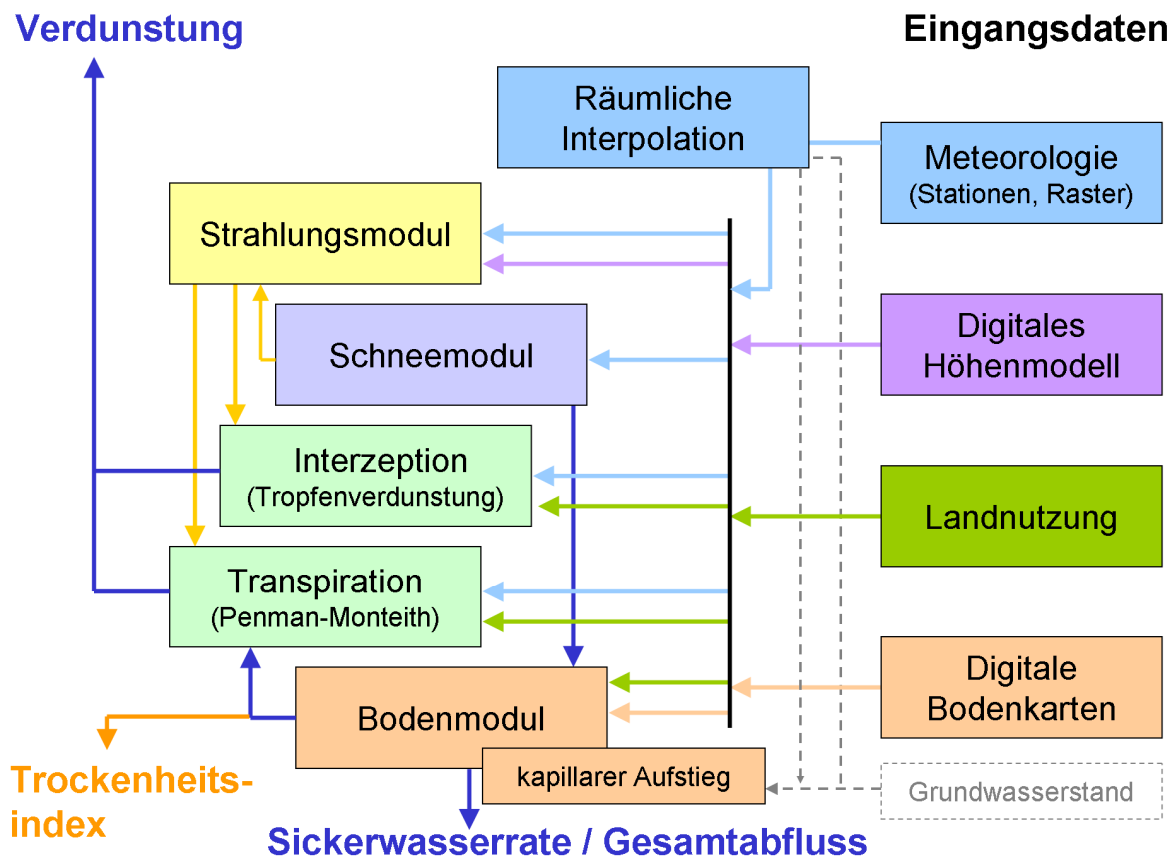


Abb. 2.1: Modularer Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und schematische Darstellung der benötigten Eingangsdaten.

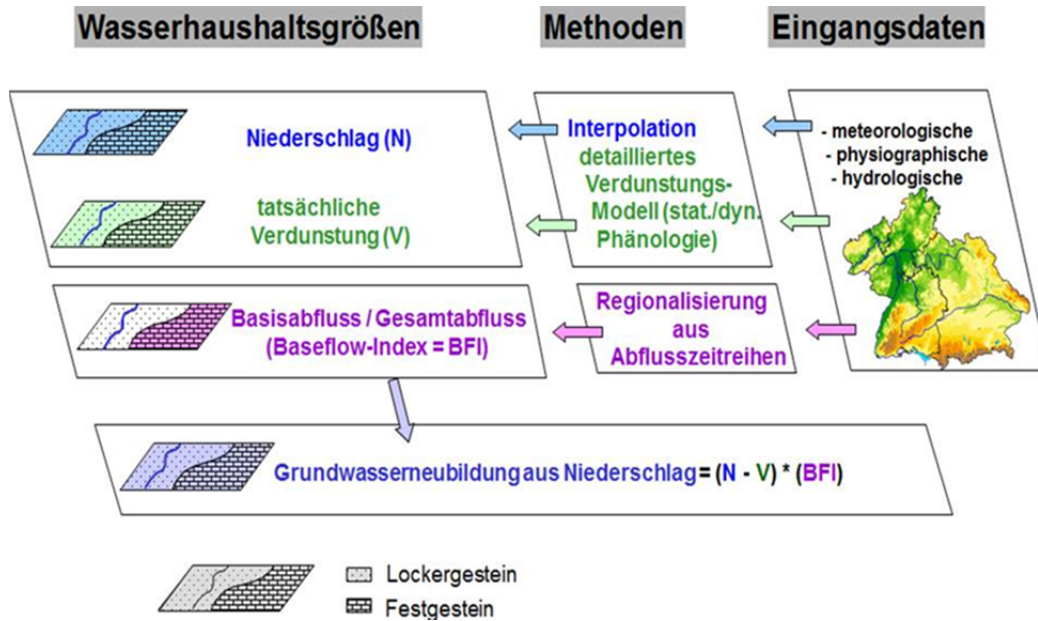


Abb. 2.2: Grundkonzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.

Eine nähere Beschreibung der Methodik zur Regionalisierung meteorologischer Eingangsparameter, des Schneedeckenauf- und -abbaus, der Interzeptions- und Evapotranspirationsberechnung sowie der Auffüllung und Entleerung des Bodenspeichers ist in KLIWA (2012) und GUDERA & MORHARD (2015) enthalten.

2.2 Physiographische Eingangsdaten

Das Modell GWN-BW benötigt für die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der Sickerwassermenge physiographische (naturräumliche) Daten, die aus dem Höhenmodell (Abb. 2.3), der Landnutzung (Abb. 2.4) und der Bodenkarte (Abb. 2.5) abgeleitet werden.

Die Langzeitsimulation 1951-2015 wurde mit den bereits im Rahmen von KLIWA (2012) erstellten physiographischen Eingangsdaten (Tab. 2.1) durchgeführt.

Tab. 2.1: Physiographische Datengrundlagen für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW in den vier Bundesländern.

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	BK1000 BGR	DHM50
Rheinland-Pfalz	19 856	34 816	CORINE 2000	BÜK200	DHM10
Hessen	21 116	196 352	CORINE 2006	BK50	DHM20

Die Grundflächendatensätze umfassen zusammen 205 376 Flächen für Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Im Unterschied zur WETTREG2006 Szenariosimulation (SPEKAT 2007; KLIWA 2012) wurde für Bayern ein räumlich höher aufgelöster Eingangsdatensatz verwendet, so dass die Ergebnisse der Langzeitsimulation für alle drei Länder in vergleichbarer räumlicher Auflösung vorliegen. Für Hessen wurde die Simulation ebenfalls auf dem höher aufgelösten der beiden für dieses Land vorliegenden Eingangsdatensätze durchgeführt, welcher die 21 116 km² große Landesfläche in 196 352 Grundflächen unterteilt. Die insgesamt 147 286 km² abdeckenden Landesflächen werden damit durch 401 728 Grundflächen mit jeweils einheitlicher Kombination aus Landnutzung und nutzbarer Feldkapazität (nFK) abgebildet.

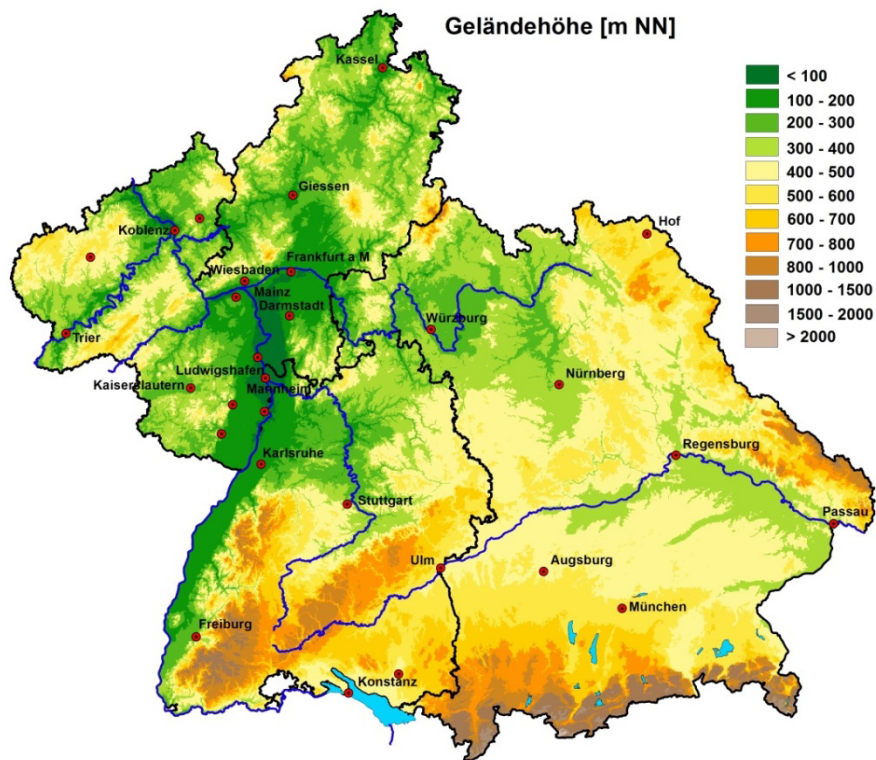


Abb. 2.3: Verteilung der Geländehöhen im Untersuchungsgebiet, Angaben in m NN.

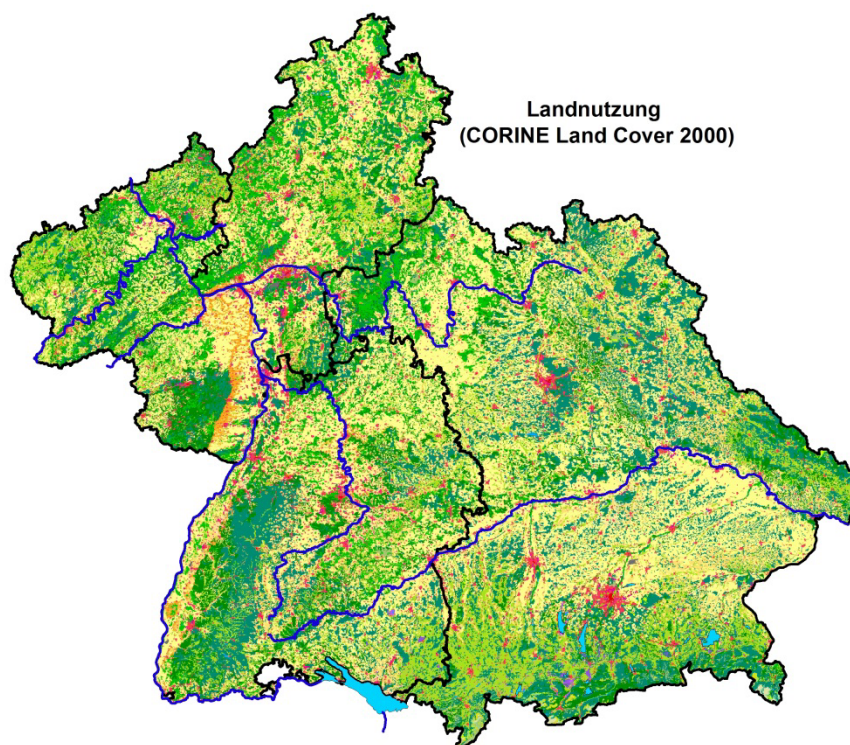


Abb. 2.4: Landnutzungsverteilung (CORINE Land Cover 2000) im Untersuchungsgebiet (DLR 2005).

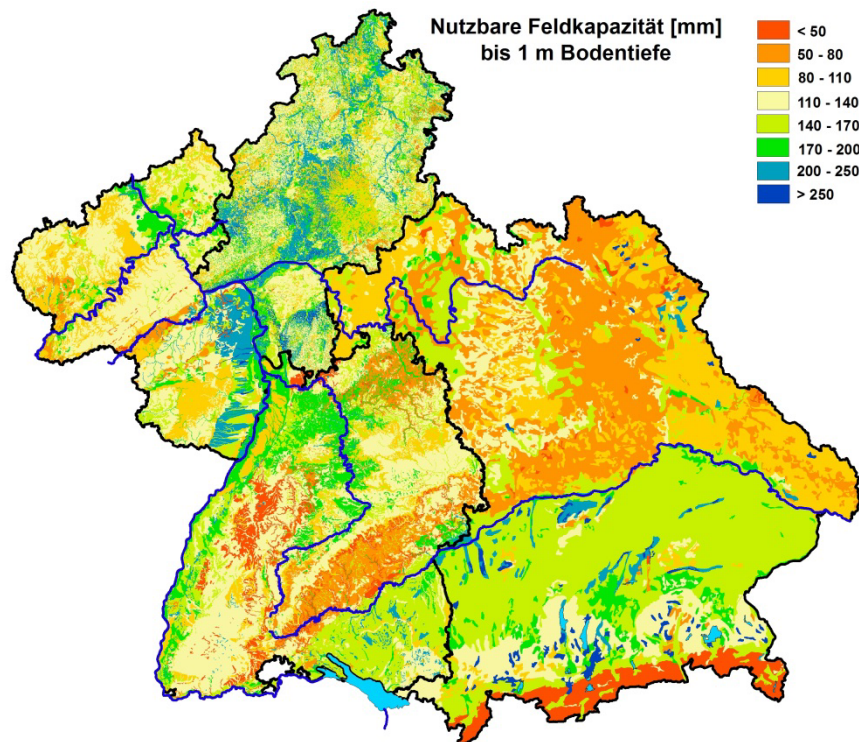


Abb. 2.5: Verteilung der nutzbaren Feldkapazität bis 1 m Bodentiefe nach Bodenübersichtskarten 1:200 000 für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, 1:1 Mio. für Bayern und 1:50 000 für Hessen. Angaben in mm.

2.3 Aufbereitung und Prüfung der Klimadaten

Der meteorologische Antrieb für das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW besteht aus Tageswerten für unkorrigierten Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windstärke der Periode 1951-2015. Alternativ zur modelleigenen Regionalisierung der täglichen Niederschlagshöhe wurden REGNIE-Daten verwendet. Die Methode REGNIE (Regionalisierung von Niederschlagshöhen) interpoliert die an den einzelnen Messstationen gemessenen Niederschlagshöhen auf ein Gitter von 1km². Das zu Grunde liegende Regionalisierungsverfahren basiert im Wesentlichen auf der Interpolation von Anomalien in Bezug auf langjährige Mittelwerte und beinhaltet die Berechnung von Hintergrundfeldern sowie die Berechnung von Niederschlagsfeldern (RAUTHE et al. 2013).

Vor der Durchführung der Langzeitsimulation 1951-2015 mussten die vom DWD bereitgestellten Stationsdaten (Tageswertreihen) für Rheinland-Pfalz und Bayern aufbereitet werden. Dies war erforderlich, da für die gewählte 65-jährige Periode in diesen beiden Ländern, im Unterschied zu Baden-Württemberg, noch kein Bestand an speziell aufbereiteten Stationsdaten vorlag. Im Zuge dieser Aufbereitung wurde auch eine umfangreiche Plausibilitätsprüfung der Tageswertreihen durchgeführt, um fehlerbehaftete Eingangsdaten bereits im Vorfeld der Simulation zu identifizieren. Als eindeutig unplausibel identifizierte Messwerte, meist durch Abgleich mit benachbarten Stationen, wurden aus dem aufbereiteten Datenbestand entfernt. Vorgehensweise und Ergebnis dieser Plausibilitätsprüfung sind im Bericht an die Arbeitsgruppe Grundwasser ausführlich erläutert und dokumentiert (MORHARD 2013). Gleiches gilt für die im Anschluss durchgeführte Aufbereitung und Prüfung der DWD Stationsdaten für Hessen.



2.4 Initialisierung von Schneedecke und Bodenspeicher

Zu Beginn einer Berechnung mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell ist ein plausibler Anfangszustand der verschiedenen Speicher (Bodenwassergehalt und Schneedecke) sicherzustellen, damit auch die Simulationsergebnisse in den ersten Jahren der betrachteten Zeitspanne interpretiert werden können. Da nicht für alle Länder meteorologische Zeitreihen vor 1951 vorlagen, erfolgte die Initialisierung der Speicherfüllung mit den berechneten Mittelwerten zum Jahresende der Jahre 1951-1960 aus einem vorab durchgeführten und mit Standardwerten initialisierten (Boden vollständig gesättigt, kein Schnee) Rechenlauf. Damit konnte insbesondere die Verteilung von Bereichen mit mehr oder weniger vollständiger Füllung des Bodenwasserspeichers und die in Bayern regional erhebliche Rücklage im Schneespeicher berücksichtigt werden.

2.5 Abgleich mit REGNIE-Rasterdaten

Wie bereits in Kap. 2.2 erläutert, wurde die Langzeitsimulation für die Periode 1951-2015 mit nicht korrigierten Stationsdaten des Niederschlags und alternativ mit den ebenfalls nicht korrigierten REGNIE-Rasterdaten (DWD 2009) angetrieben. Dadurch konnte eine systematische Analyse der Unterschiede zwischen der eigenen Niederschlagsregionalisierung und den REGNIE-Rasterdaten durchgeführt werden, welche insofern von großer Bedeutung ist, als sich die Datengrundlage für eine rein stationsgestützte Regionalisierung in der vergangenen Dekade aufgrund von Stationsstilllegungen regional deutlich verschlechtert hat. Zugleich ist der Gebietsniederschlag für die berechnete Sickerwasserrate und die daraus abgeleitete Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag die dominierende Eingangsgröße.

Folgende Ergebnisse lassen sich hierzu festhalten:

- Landesweit und über die Naturräume hinweg gemittelt ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen REGNIE und eigener Regionalisierung gegeben.
- Die Validierung lieferte gleichwertige Modellgüten für die jeweils simulierten Abflüsse aus den Einzugsgebieten.
- Mit beiden Niederschlagsverteilungen ergeben sich für ausgewählte Einzelgebiete (Größenordnung 30-250 km²) unbefriedigende Ergebnisse. Diese können zum großen Teil auf die Unsicherheit der Niederschlagsverteilung in Verbindung mit möglichen Fehlern der Niederschlagsmessung (i.d.R. mindestens 10 % bis 15 %) zurückgeführt werden.
- Die REGNIE-Rasterdaten weisen eine stärkere Anlehnung an die Topographie auf, womit auch flache Täler deutlich nachgezeichnet werden (vgl. Abb. 2.6 und Abb. 2.7).
- In einigen Bereichen (z.B. Südschwarzwald, Nordalpen und in Teilen von Rheinland-Pfalz) ist eine flächenhafte Abweichung zwischen REGNIE und eigener Regionalisierung auf Basis von Stationsdaten zu verzeichnen (Abb. 2.8).

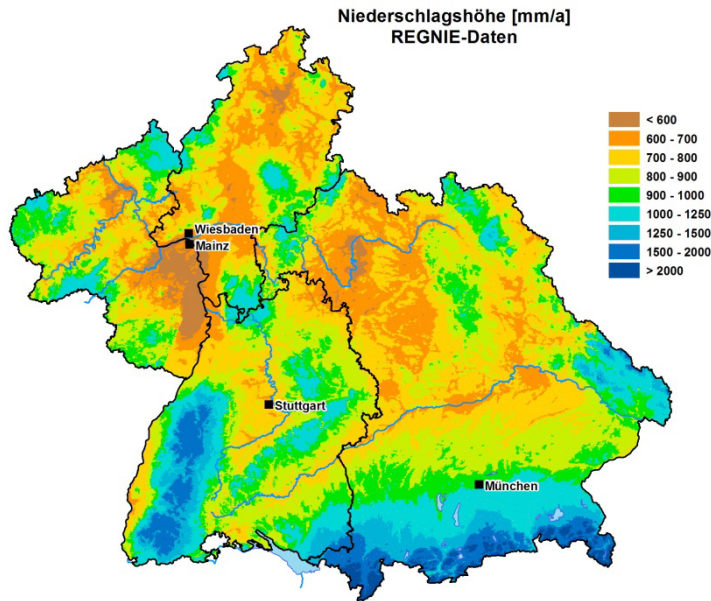


Abb. 2.6: Mittlerer jährlicher Niederschlag. Ermittelt auf Basis der unkorrigierten REGIE- Daten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

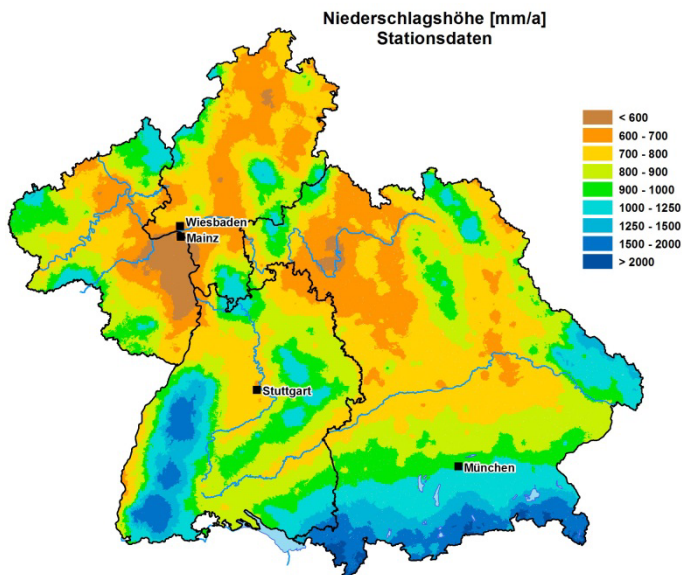


Abb. 2.7: Mittlerer jährlicher Niederschlag. Ermittelt auf Basis der unkorrigierten Stationsdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

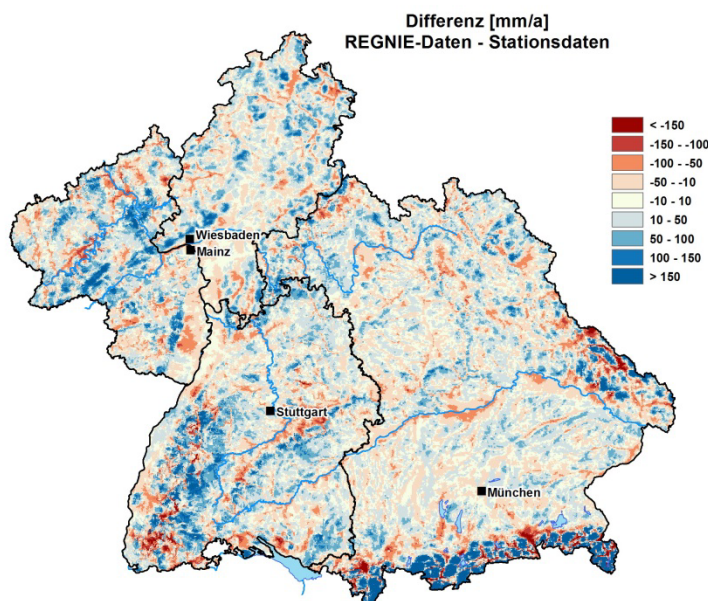


Abb. 2.8: Absolute Differenz des mittleren jährlichen Niederschlags für den Zeitraum 1971-2000. REGIE – Stationsdaten. Angaben in mm/a.



3 Ergebnisse der Langzeitsimulation 1951-2015

3.1 Auswertumfang

3.1.1 Wasserbilanz- und Zustandsgrößen

Mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW wurde auf der Basis von Klimaparametern (Zeitreihen) und physiografischen Daten (flächenhaften Standortfaktoren) der Bodenwasserhaushalt der vier Bundesländer in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung simuliert (vgl. Kap. 2).

Nachfolgend werden nun die verschiedenen Auswertegrößen vorgestellt. Dabei handelt es sich sowohl um aufbereitete Eingangsdaten des Modells, als auch um verschiedene Wasserbilanz- und Zustandsgrößen als Ergebnisse der Modellierung, die alle in enger Beziehung zur Grundwasserneubildung stehen. Im Einzelnen betrifft es die folgenden, flächenhaft ermittelten Parameter:

- **Lufttemperatur:** Regionalisierte Modelleingangsgröße, verdunstungsrelevant, wichtige Steuergröße für Niederschlagszustand (flüssig/fest) und Schneeschmelze als bilanzrelevante Faktoren;
- **Niederschlag:** Regionalisierte Modelleingangsgröße und wichtigste Wasserbilanzkomponente; hier als unkorrigierte Niederschlagshöhe berücksichtigt, d.h. ohne Korrektur um mögliche systematische Verluste bei der Messung;
- **Tatsächliche Verdunstung:** Zentrales Simulationsergebnis des Bodenwasserhaushaltsmodells, wichtigste Verlustgröße der Wasserbilanz;
- **Gesamtabfluss:** Simulationsergebnis, berechnete Wasserbilanzkomponente aus Niederschlag abzüglich tatsächlicher Verdunstung;
- **Sickerwasserrate:** Simulationsergebnis, entspricht vertikaler Sickerung aus dem Bodenspeicher; berechnete Wasserbilanzkomponente aus Niederschlag abzüglich tatsächlicher Verdunstung und Oberflächenabfluss (letzterer hier nur auf versiegelten Flächen und Wasserflächen berücksichtigt) sowie Auffüllung des Bodenspeichers;
- **Direktabfluss:** Entspricht der Summe aus Oberflächenabfluss und Interflow; berechnete Bilanzkomponente aus Gesamtabfluss (auf Basis der GWN- BW- Simulationen) abzüglich der mit Hilfe des regionalisierten Baseflow-Index ermittelten Grundwasserneubildung bzw. dem Basisabfluss;
- **Grundwasserneubildung:** Berechnete Bilanzkomponente, entspricht Gesamtabfluss bzw. Sickerwasserrate (auf Basis der GWN- BW- Simulationen) abzüglich Direktabfluss (der Direktabfluss wird mit Hilfe des regionalisierten Baseflow-Index berücksichtigt);
- **Wasseräquivalent der Schneedecke:** Simulierte Zustandsgröße zur Beschreibung des mittleren Schneedeckenverhaltens und damit von Änderungen des Niederschlags- und Temperaturregimes (s.o.);
- **Trockenheitsindex:** Zustandsgröße zur Beschreibung der Bodenwasserverhältnisse, insbesondere hinsichtlich der Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers (< 30% der nutzbaren Feldkapazität) in Trockenperioden.

3.1.2 Darstellungsebenen

Die Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsmodellierung sowie der BFI (Baseflow-Index) und die Grundwasserneubildung liegen auf Basis von Grundflächen vor. Die hoch aufgelösten Simulationsergebnisse wurden räumlich auf die folgenden beiden Darstellungsebenen aggregiert (Abb. 3.1):

- 4 Bundesländer,
- 30 Naturräume (naturräumlich-hydrogeologische Einheiten).

Sämtliche Auswertungen wurden für beide Darstellungsebenen vorgenommen. Die großräumigen KLIWA-Regionen wurden im Unterschied zu KLIWA (2012) nicht mehr als Raumgliederung zugrunde gelegt, da Naturräume in diesem Zusammenhang besser geeignet sind als Flussgebiete. Im weiteren Verlauf der Erläuterungen werden exemplarische Ergebnisse für die Bundesländer und die Naturräume vorgestellt.

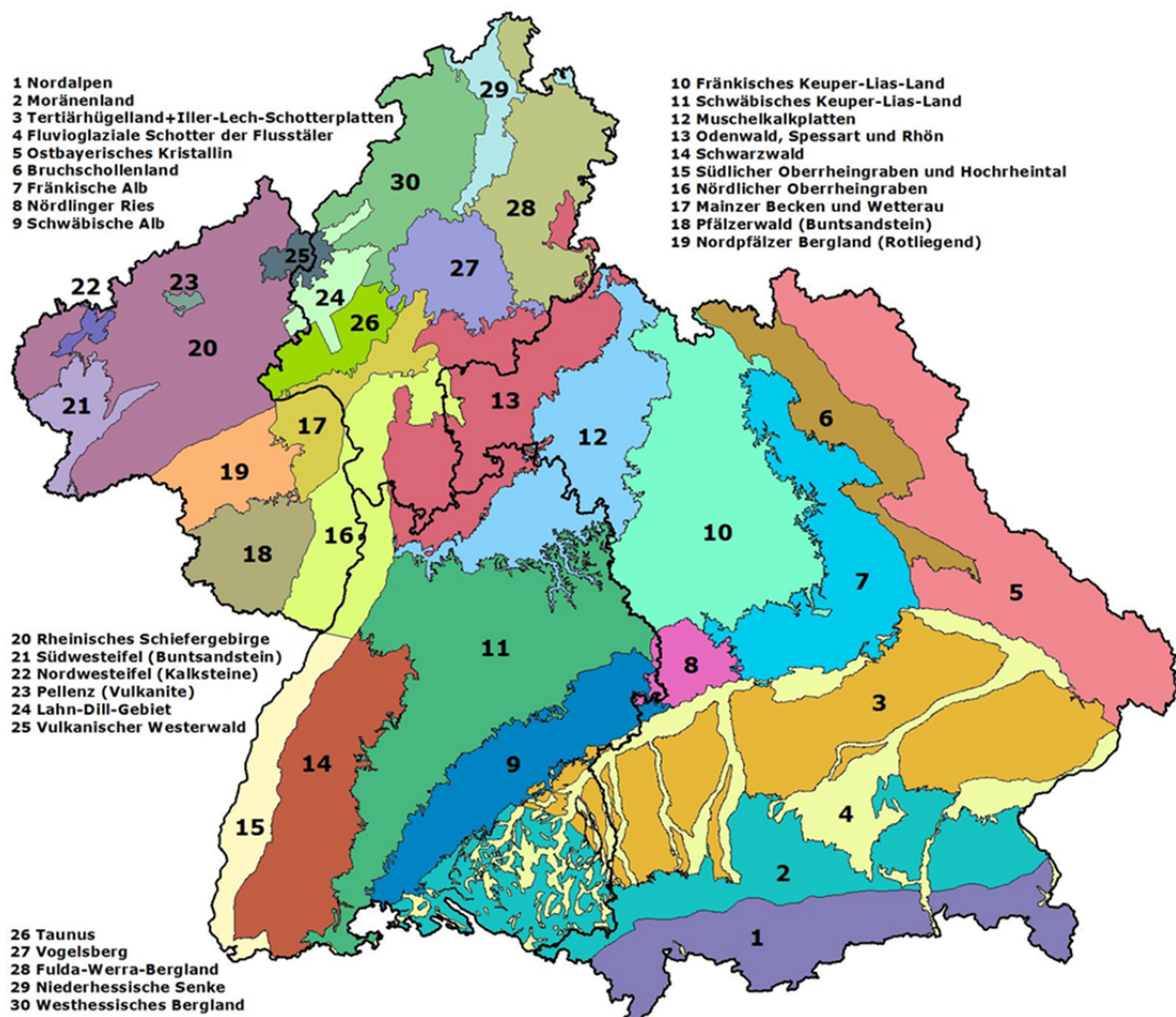


Abb. 3.1: Darstellungsebenen naturräumlich-hydrogeologische Einheiten (n=30) und Länder (n=4) für die räumliche Auswertung der GWN-BW-Simulationsergebnisse.



3.1.3 Übersicht der durchgeführten Auswertungen

Ziel der Auswertungen war die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Komponenten des Bodenwasserhaushaltes, insbesondere der Sickerwasserrate und der daraus resultierenden Grundwasserneubildung aus Niederschlag sowie des Trockenheitsindex. Hierzu wurden die Ergebnisse der Auswertungen wie folgt dargestellt:

- Tabellen mit statistischen Kenngrößen für die Länder und die naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten für Dekaden, 30-Jahresperioden, die Periode 1951-2010 und die letzten fünf Jahre auf Jahres-, Monats- und Halbjahresbasis (hydrologische Halbjahre)
- Säulendiagramme für die Gesamtperiode 1951-2015 auf Jahres-, Monats- und Halbjahresbasis (hydrologische Halbjahre)
- Ringdiagramme mit Absolutwerten für die Periode 1951-2010, für vier 30-Jahresperioden (1951-1980 bis 1981-2010), für sechs Dekaden, der Periode 1991-2010 und dem Zeitraum 2011-2015. Jeweils erfolgte auch eine Darstellung mit absoluten und relativen Unterschieden der Periode 1991-2010 zu den Perioden 1951-1990 und 1961-1990 sowie von Dekaden zur Periode 1951-2010
- Karten zur Darstellung der räumlichen Verteilung der genannten Größen auf Basis von REGNIE -Niederschlägen für Dekaden und die Periode 1951-2010
- „Briefmarkendarstellungen“ (Absolutwerte der 65 Einzeljahre und hydrologischen Halbjahre, relative Abweichung (Temperatur und Trockenheitsindex: absolute Abweichung) der Einzeljahre und hydrologischen Halbjahre vom vieljährigem Mittel 1951-2010)
- Trenddreiecke zur Darstellung des mittleren Trendverhaltens für die Gesamtperiode 1951-2015
- Steckbriefe für die Länder und die naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten mit Absolutwerten der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten für die Periode 1951-2010 und die jeweils markanteste Trocken- und Nassdekade.

Alle im Bericht gezeigten Abbildungen sowie eine Vielzahl weiterer Abbildungen können dem digitalen Anhang (CD) entnommen werden.

3.2 Entwicklung der Wasserbilanz- und Zustandsgrößen im Untersuchungszeitraum 1951-2015

3.2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist für den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung eine wesentliche Größe, da sie über das Sättigungsdefizit der Luft unmittelbar die tatsächliche Verdunstung beeinflusst. Sie steuert dadurch maßgeblich den Anteil des Niederschlags (effektiver Niederschlag), der regional für Gesamtabfluss, Sickerwasserrate und der daraus mit Hilfe des Baseflow-Index (BFI) (KLIWA 2012) abgeleiteten Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Des Weiteren steuert sie den Aggregatzustand des gefallenen Niederschlags (flüssig/fest) und damit Befüllung (Schneeakkumulation) und Entleerung des modell-internen Schneespeichers.

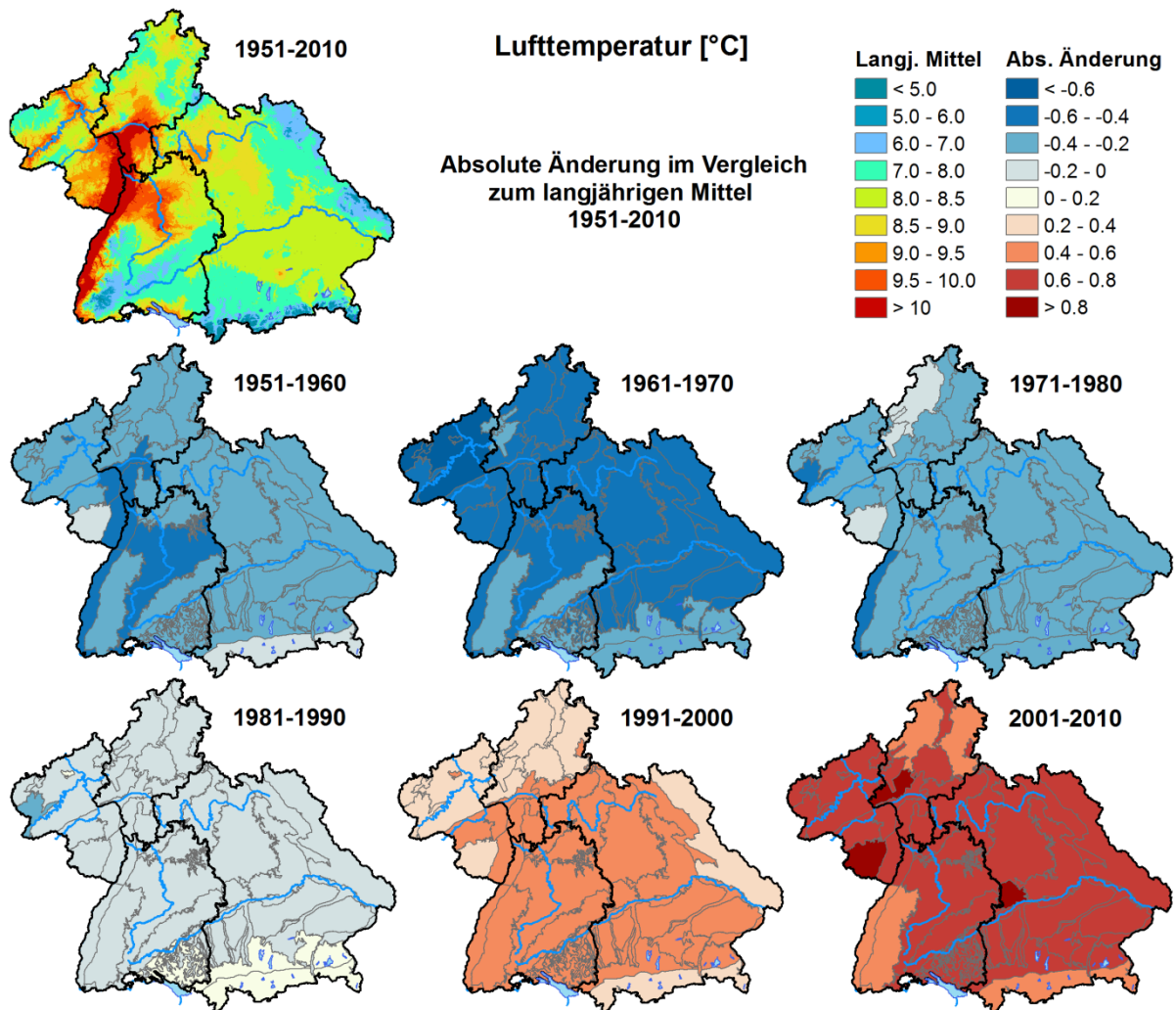


Abb. 3.2: Mittlere jährliche Lufttemperatur und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in °C.

Die über alle vier Bundesländer (Süddeutschland) gemittelte Lufttemperatur lag im 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 bei 8.2°C. Insgesamt zeigt sich dabei ein deutlicher Zusammenhang zwischen der mittleren Höhe des betrachteten Naturraumes und der mittleren Lufttemperatur. Diese variierte somit zwischen den höher gelegenen Naturräumen „Nordalpen“ (6.1°C), „Ostbayerisches Kristallin“ (7.0°C), „Schwäbische Alb“ (7.3°C) und „Schwarzwald“ (7.6°C) bis hin zu 10°C und mehr in den tiefer gelegenen Naturräumen längs des Rheins („nördlicher Oberrheingraben“, „südlicher Oberrheingraben und Hochrheintal“ sowie „Mainzer Becken und Wetterau“). Dieser Effekt wird verstärkt durch einen West-Ost Gradienten-



ten der Lufttemperatur, welcher vor allem durch mildere Winter auf Grund des stärker ozeanisch geprägten Klimas in den westlichen Regionen begründet ist (Abb. 3.4). Somit herrschen höhere Lufttemperaturen in den Bundesländern Rheinland-Pfalz (8.9°C), Hessen (8.5°C) und Baden-Württemberg (8.3°C), sowie niedrigere Lufttemperaturen im vergleichsweise kontinental geprägten Klima Bayerns (7.8°C) vor (Tab. 3.1). Im Jahresverlauf werden in allen Bundesländern und Naturräumen die Extremwerte im Januar (Minimum) sowie im Juli und August (Maximum) erreicht (Abb. 3.4).

Im Vergleich zum Zeitraum 1951-2010 war die 30-jährige Periode 1951-1980 durch kühlere Temperaturen (-0.4°C im Vergleich zum vieljährigen Mittel) geprägt, wohingegen die mittlere Temperatur der Dekade 1981-1990 in etwa dem des vieljährigen Mittels entsprach. Mit Beginn der 1990er Jahre zeigt sich eine durchgehende Erwärmung, so dass in der Dekade 2001-2010 die mittleren Temperaturen schließlich um 0.7°C über dem vieljährigen Mittel lagen (Abb. 3.2 und Tab 3.1). Generell erfolgten die beobachteten Temperaturänderungen über die vier betrachteten Länder relativ gleichmäßig; kein Bundesland hat sich verhältnismäßig stärker erwärmt als ein anderes.

Tab. 3.1: Mittlere Lufttemperatur in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in °C.

Zeitraum	Mittlere Lufttemperatur [°C]				
	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	8.2	8.3	7.8	8.5	8.9
Absolute Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010 [°C]					
1951-1960	-0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3
1961-1970	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
1971-1980	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3
1981-1990	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1
1991-2000	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
2001-2010	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2011-2015	1.1	1.2	1.2	1.0	1.0

Betrachtet man die Entwicklung der Lufttemperatur der vier Bundesländer im Gesamtzeitraum auf Jahresbasis (Abb. 3.3), so zeigt sich ein ähnliches Muster wie in Abb. 3.2 mit einer deutlichen Erwärmung ab dem Jahr 1988. Bis auf wenige Ausnahmen (z.B. 1996 und 2010), wies diese Periode nahezu durchgehend Temperaturen über dem vieljährigen Mittel auf, wobei eine Mehrheit der Jahre (65 %) sogar über dem 75-Perzentil lag. Vor dieser Periode, also von 1951-1987, waren bis auf wenige Ausnahmen (z.B. 1959, 1961 und 1983), alle Jahre durch durchschnittliche bis kühle (unter dem 25-Perzentil) Lufttemperaturen charakterisiert.

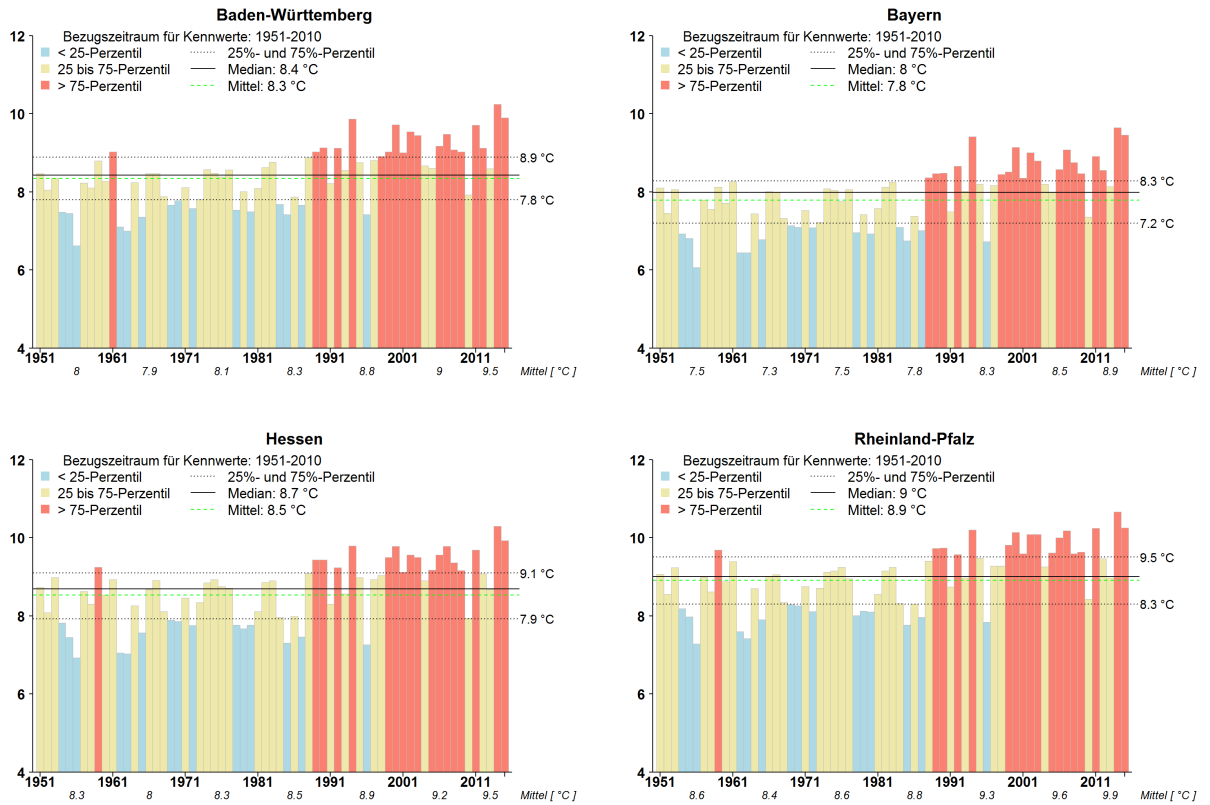


Abb. 3.3: Entwicklung der jährlichen Lufttemperatur auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in °C.

Die gemessene Erwärmung der Lufttemperatur seit Ende der 1980er Jahre erfolgte aber nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt. So wiesen in der vergangenen Dekade (2001-2010) vor allem die Frühlings- und Sommermonate steigende mittlere Temperaturen im Vergleich zum Zeitraum 1951-2010 (Abb. 3.4 und 3.5) auf. Die deutlichste Erwärmung zeigten dabei die Monate April bis Juli, die mit Werten von ca. 1.1°C über dem vieljährigen Mittel lagen. Lediglich der Dezember kühlte sich geringfügig ab (-0.2 bis -0.4°C im Vergleich zum vieljährigen Mittel).

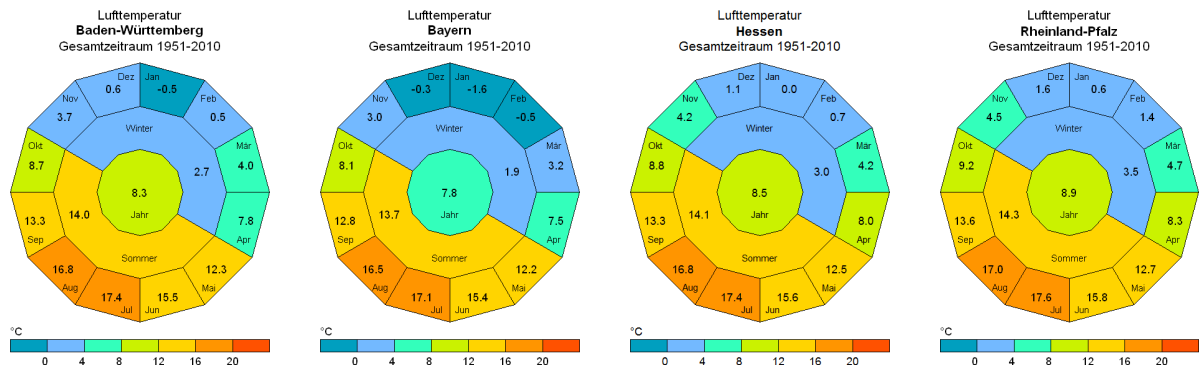


Abb. 3.4: Innerjährliche Verteilung der Lufttemperatur im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben in °C.

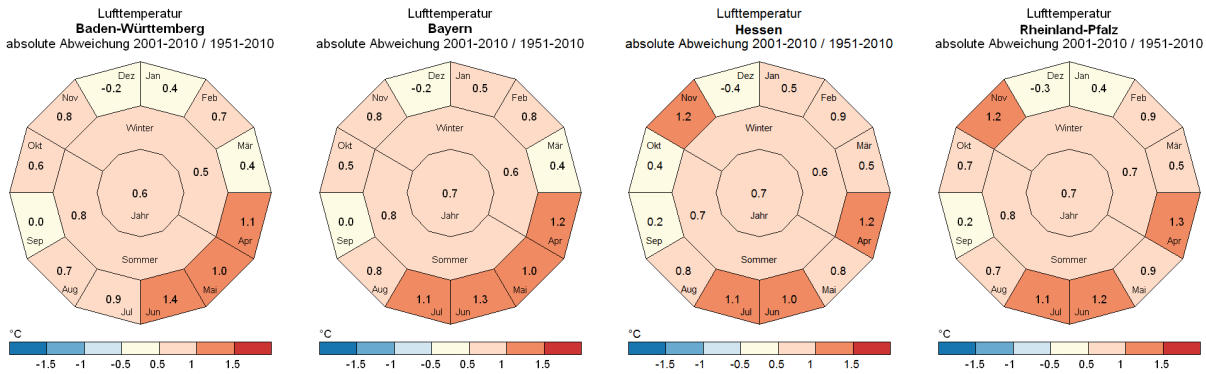


Abb. 3.5: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Lufttemperatur auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in °C.

Auch wenn die beobachtete Erwärmung auf Basis der Bundesländer in der Dekade 2001-2010 weitestgehend gleichförmig erfolgte (+0.7°C), so zeichnen sich auf Basis der Naturräume leichte Unterschiede ab (Abb. 3.2). Neben den im nördlichen Hessen gelegenen Naturräumen „Fulda-Werra-Bergland“, „Westhessisches Bergland“ und „Lahn-Dill-Gebiet“ weisen vor allem die südlich gelegenen Naturräume „Südlicher Oberrheingraben und Hochrheintal“, „Schwarzwald“ und das „Moränenland“ etwas geringere Temperaturerhöhungen (+0.6°C) auf. Die geringste Erwärmung war mit +0.5°C im Bereich der „Nordalpen“ zu verzeichnen. In den Naturräumen „Taunus“, „Pfälzerwald“ und „Nördlinger Ries“ fiel die Erwärmung mit 0.8°C hingegen geringfügig höher aus.

Im Zeitraum 2011-2015 lag die mittlere Lufttemperatur in den Bundesländern um 1.0°C bis 1.2°C über dem vieljährigen Mittel. Mit einer Erwärmung um 1.4°C wiesen die Wintermonate dabei die stärkste Erwärmung auf (Abb. 3.6). In den Sommermonaten betrug die Temperaturzunahme zwischen 0.6°C in Hessen und 0.9°C in Baden-Württemberg und Bayern. Lediglich der Monat Februar wies mit Änderungen zwischen 0.0°C in Hessen und -0.6°C in Baden-Württemberg kühlere Temperaturen im Vergleich zum Zeitraum 1951-2010 auf.

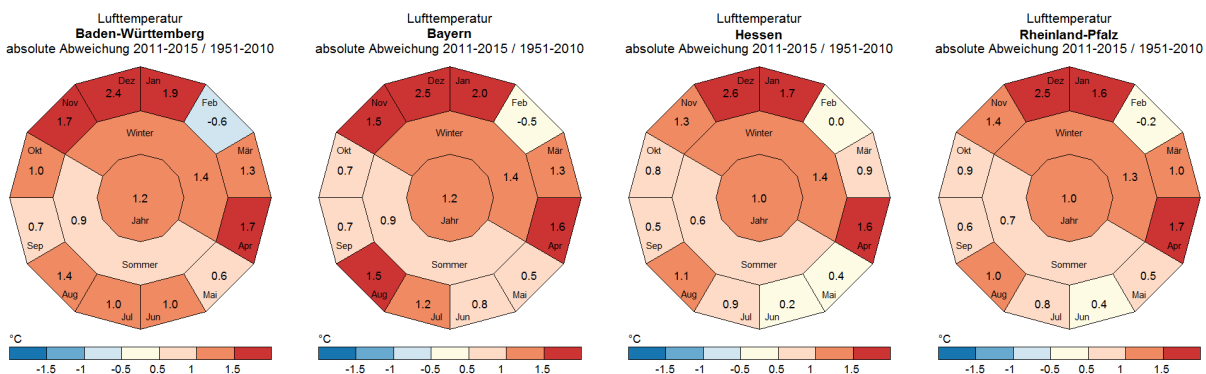


Abb. 3.6: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Lufttemperatur auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraumes 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in °C.

Die statistische Auswertung anhand des Mann-Kendall-Trendtest zeigt in allen Bundesländern einen einheitlichen Trend (Abb. 3.7). Seit Beginn der 1990er Jahre unterliegt die gemessene Jahrestemperatur einem statistisch signifikanten Trend. Dies bedeutet, in allen Bundesländern erfolgte eine statistisch abgesicherte Zunahme der Lufttemperatur mit Beginn der 1990er Jahre.

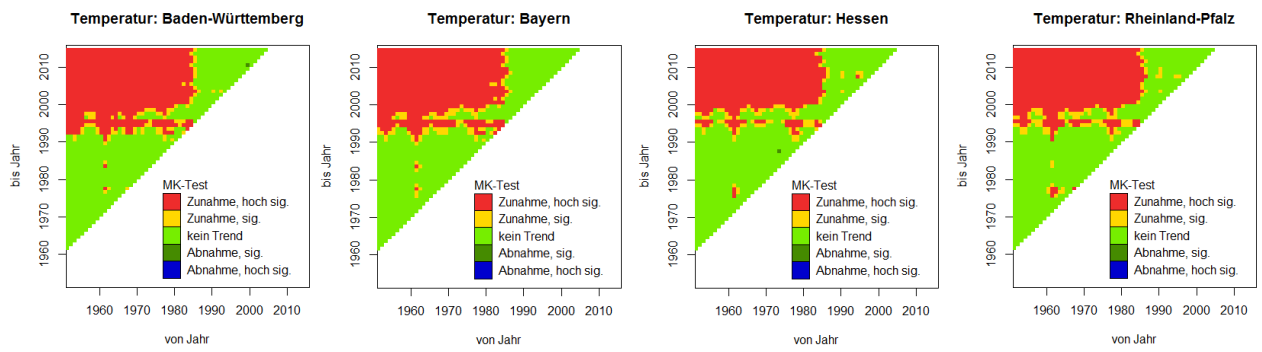


Abb. 3.7: Trenddreiecke für die Jahrestemperatur im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.



3.2.2 Niederschlag

Der Niederschlag steht in der Wasserbilanz auf der Einnahmeseite (positive Bilanzgröße) und bildet für die Wasserhaushaltsgrößen tatsächliche Verdunstung, Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung die wichtigste Steuergröße. Er reguliert somit das Wasserdargebot, das maximal für alle übrigen Prozesse zur Verfügung steht.

Änderungen von Niederschlagsmenge, -dauer, -intensität und -art (flüssig/fest) sowie der innerjährlichen Niederschlagsverteilung (Niederschlagsregime) haben damit immer auch deutliche Auswirkungen auf den gesamten Bodenwasserhaushalt. Der Niederschlag ist daher eine wesentliche Eingangsgröße für die Modellierung mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW und regelt die Befüllung der verschiedenen modellinternen Speicher (z.B. Interzeption, Boden, Schnee). Die folgenden Ergebnisse basieren auf der Modellvarianze mit REGNIE-Niederschlag.

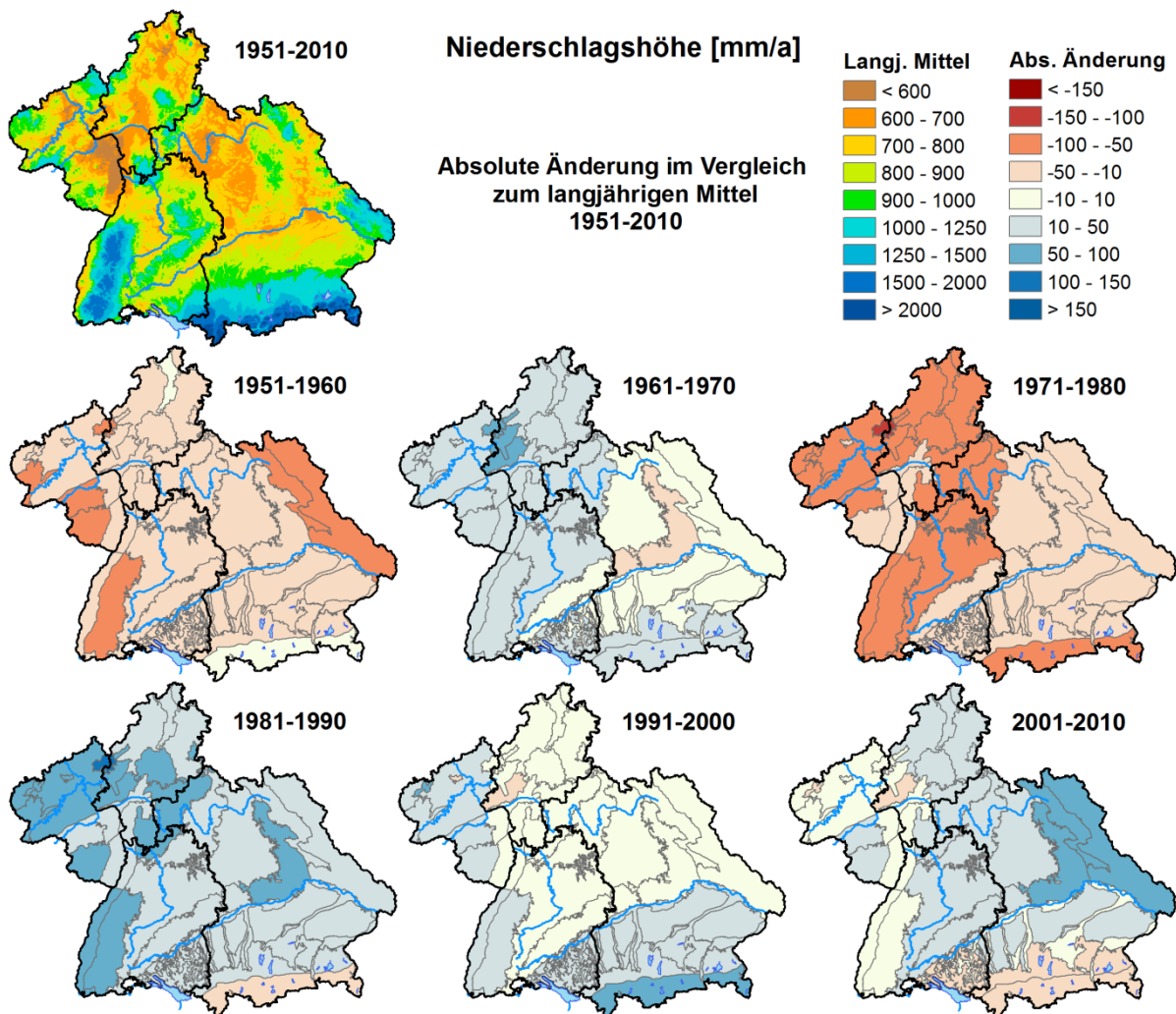


Abb. 3.8: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.

Das Niederschlagsmittel über alle vier Bundesländer (Süddeutschland) im 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 liegt bei etwa 900 mm/a. Es variiert zwischen 969 mm/a in Baden-Württemberg, 938 mm/a in Bayern sowie 788 mm/a in Rheinland-Pfalz und 779 mm/a in Hessen (Tab. 3.2). Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen den niederschlagsreicheren Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und den trockeneren Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen somit 18 %.

Analog zur Lufttemperatur zeigt sich auch hier ein deutlicher Zusammenhang zwischen der mittleren Niederschlagsmenge und der mittleren Höhe des betrachteten Naturraumes. So

variierten die mittleren jährlichen Niederschläge in den untersuchten Naturräumen im Gesamtzeitraum zwischen ca. 600 mm/a im „Mainzer Becken und Wetterau“ und rund 1 400 mm/a im „Schwarzwald“ sowie rd. 1 800 mm/a im Bereich der „Nordalpen“ (Abb. 3.8). Die übrigen Mittelgebirgslagen und das Alpenvorland zeichnen sich durch mittlere Jahresniederschläge von etwa 800 mm/a bis max. 1 150 mm/a aus. Zahlreiche weitere Naturräume, überwiegend in Hessen und Rheinland-Pfalz, sind durch vergleichsweise geringe Niederschlagswerte von etwa 700 mm/a und niedriger gekennzeichnet.

Betrachtet man das Niederschlagsregime, so zeigt sich, dass auf Länderebene und in den meisten Naturräumen die Sommerniederschläge über denen des Winterhalbjahres liegen. Der Quotient *Niederschlag Winterhalbjahr / Sommerhalbjahr* liegt im Mittel bei 0.8 und variiert zwischen 0.6 („Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“) und 1.0 („Pfälzerwald“). Lediglich in einigen Naturräumen der westlichen Mittelgebirge wie beispielsweise „Schwarzwald“, „Nordwesteifel“ sowie „Vulkanischer Westerwald“ fällt auf Grund des ozeanischen Klimas im Winter geringfügig mehr Niederschlag als im Sommer (Faktor 1.0 bis 1.1). Insgesamt verzeichneten im Jahresverlauf in allen Bundesländern die Monate Februar bis April die geringsten Niederschlagsmengen, während im Dezember sowie in den Sommermonaten Juni und Juli die höchsten Niederschlagsmengen gemessen wurden (Abb. 3.10).

Die zeitliche Entwicklung der mittleren Niederschlagshöhen zwischen den einzelnen Dekaden zeigt für den gesamten süddeutschen Raum eine deutliche Variabilität im Niederschlagsdargebot (Abb. 3.8 und Tab. 3.2). So treten die höchsten Unterschiede von rund 11 % beim Vergleich zwischen der Trocken- (1971-1980, -6.1 %) und der Nassdekade (1981-1990, +4.7 %) auf. Bei Betrachtung der einzelnen Bundesländer zeigen sich zum Teil noch ausgeprägtere heterogene Niederschlagsdynamiken über die Zeit. Während die dekadische Variabilität in Baden-Württemberg mit 11 % dem süddeutschen Mittel entspricht, liegen die maximalen Änderungen in Bayern mit 8 % darunter. In Hessen und Rheinland-Pfalz hingegen beträgt der Unterschied 16 % zwischen der Trocken- und Nassdekade. Einzelne Naturräume können von einer noch stärker ausgeprägten dekadischen Variabilität geprägt sein (20 % im „Taunus“, 22 % im „Lahn-Dill-Gebiet“ und 24 % im „Vulkanischen Westerwald“). Am stabilsten bezüglich des Niederschlagsdargebots, mit maximalen dekadischen Schwankungen zwischen lediglich 2 % und 5 %, zeigen sich die niederschlagsreichen südlichen Naturräume „Nordalpen“, „Moränenland“ sowie „Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“.

Tab. 3.2: Mittlere Niederschlagshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010, ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Niederschlagshöhe [mm/a]				
	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	903	969	938	779	788
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-35 / -3.9	-38 / -3.9	-33 / -3.5	-27 / -3.5	-46 / -5.8
1961-1970	19 / 2.2	23 / 2.3	7 / 0.7	46 / 5.9	23 / 2.9
1971-1980	-54 / -6.1	-56 / -5.7	-45 / -4.7	-76 / -9.7	-60 / -7.6
1981-1990	42 / 4.7	49 / 5.1	29 / 3.0	52 / 6.7	64 / 8.1
1991-2000	12 / 1.3	13 / 1.3	17 / 1.8	-6 / -0.7	16 / 2.0
2001-2010	16 / 1.8	10 / 1.0	25 / 2.7	10 / 1.3	4 / 0.4
2011-2015	-84 / -9.3	-88 / -9.1	-86 / -9.2	-77 / -9.9	-76 / -9.6

Die zeitliche Variabilität des Niederschlags ist bei Betrachtung der Dekadenwerte (Abb. 3.8, Tab. 3.2) somit klar erkennbar, jedoch können erheblichere zwischenjährliche Variabilitäten auftreten (Abb. 3.9). So beträgt die Differenz zwischen den beiden Extremjahren 2002 (1 224 mm) und 2003 (687 mm) in Bayern 44 % (Baden-Württemberg 43 %, Hessen 42 % und Rheinland-Pfalz 35 %). Insgesamt ist kein Trend bei den jährlichen Niederschlagsmen-



gen im Gesamtzeitraum erkennbar. Generell ist die Jahresniederschlagsverteilung aber zu einem hohen Grad von Zufälligkeiten geprägt. Das bedeutet, im Gegensatz zu anderen Wasserhaushaltgrößen, dass die Niederschlagsmenge eines Jahres unabhängig von der Niederschlagsmenge des Vorjahres ist. Deutlich erkennbar sind beispielsweise auch Nassjahre (> 75-Perzentil) innerhalb der trockenen Dekade 1971-1980.

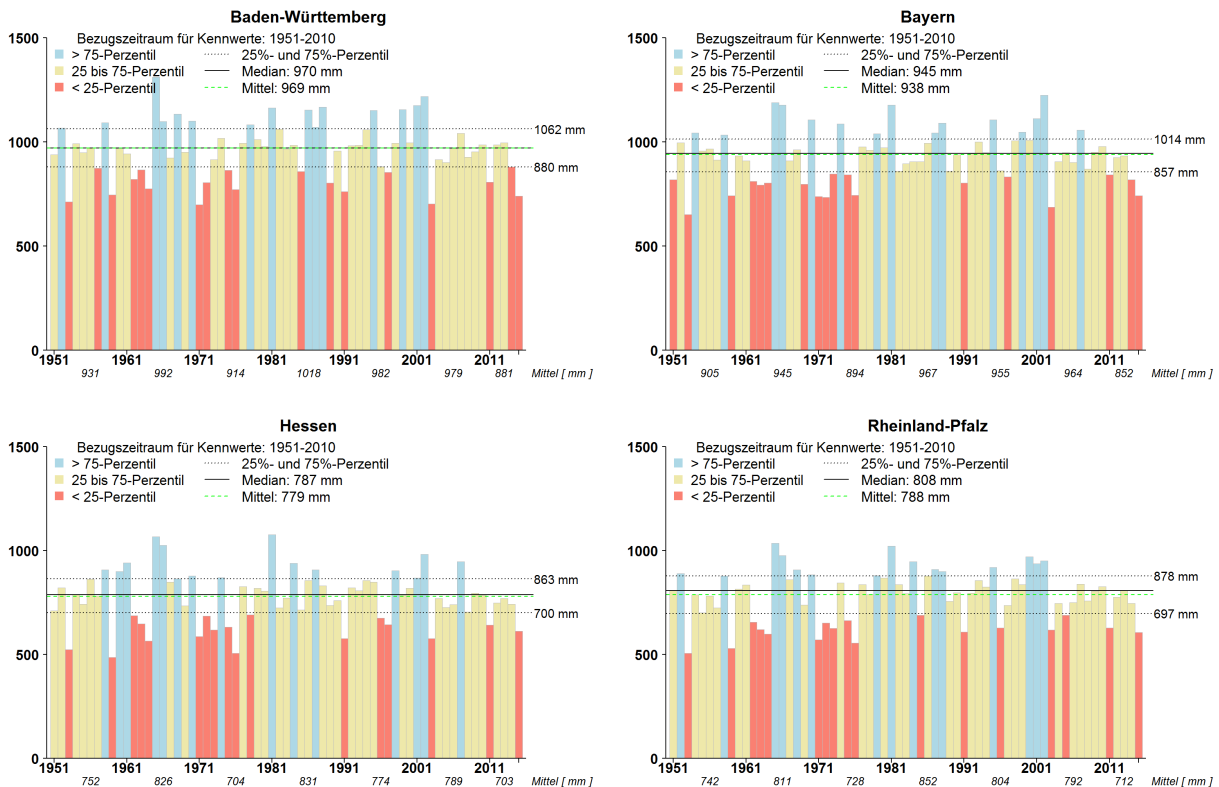


Abb. 3.9: Entwicklung des jährlichen Niederschlags auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.

In der Dekade 2001-2010 war im Vergleich zum 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 (Abb. 3.10) in allen Bundesländern ein geringer Anstieg der Niederschlagshöhe zu verzeichnen (Abb. 3.11). Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Dekade, in allen Bundesländern, außer Baden-Württemberg, vor allem die Winterniederschläge leicht zugenommen haben. Über das ganze Kalenderjahr fielen die Monate Februar, März, Mai, August und November durchgehend feuchter aus, während die Monate April, Juni und Dezember weniger Niederschlag brachten. Die deutlichste monatliche Zunahme ergab sich überwiegend im März (von +9 % in Hessen bis +24 % in Baden-Württemberg), wohingegen der Juni in allen vier Bundesländern die stärksten Rückgänge aufwies (-14 % in Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz und -22 % in Baden-Württemberg).

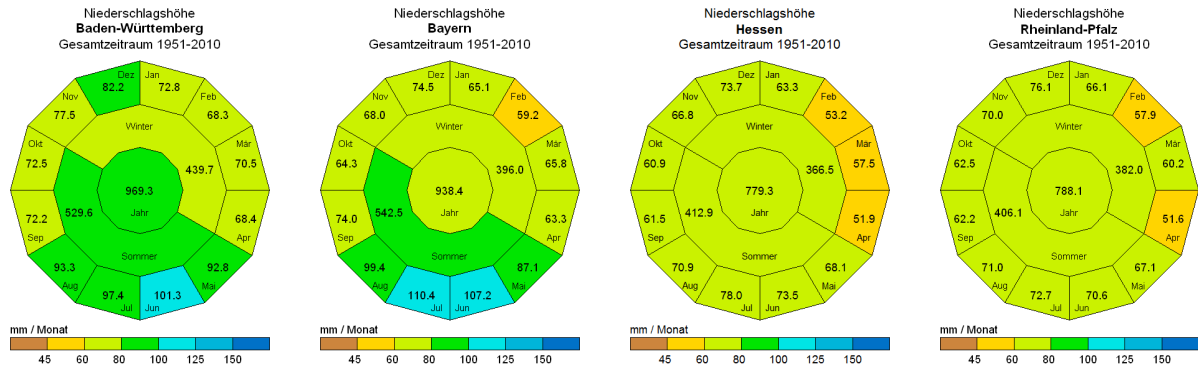


Abb. 3.10: Innerjährliche Verteilung der Niederschlagshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

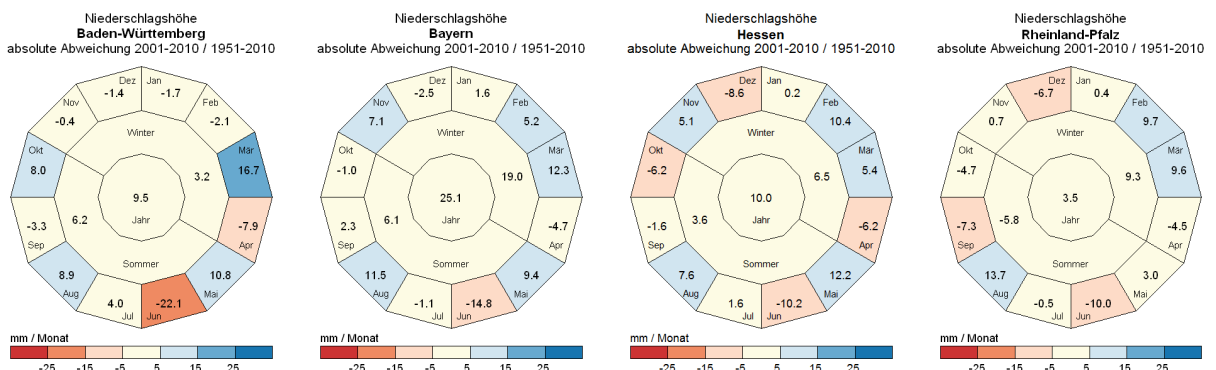


Abb. 3.11: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Niederschlagshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Analog zum Änderungssignal der Bundesländer mit ausgeprägten Schwankungen auf Dekaden- und Jahresbasis, variierten auch die jährlichen Niederschläge in den jeweiligen Naturräumen. In der vergangenen Dekade 2001-2010 waren die westlichen und südlichen Naturräume Süddeutschlands überwiegend durch unveränderte oder leicht sinkende Jahresniederschläge charakterisiert, während in den übrigen Naturräumen die Niederschläge zugenommen haben (Abb. 3.8). Die stärksten Zunahmen traten dabei in den nordöstlichen Naturräumen Bayerns auf (+50 mm „Fränkisches Keuper-Lias-Land“, +53 mm „Fränkische Alb“, +54 mm „Bruchschollenland“ und +55 mm „Ostbayerisches Kristallin“). Entsprechend der innerjährlichen Zunahme der Niederschläge für ganz Bayern (Abb. 3.11), beruhen die beobachteten erhöhten Niederschläge in den genannten Naturräumen vor allem auf leichten Zunahmen während der Wintermonate.

Im Zeitraum 2011-2015 war insbesondere das Winterhalbjahr im Mittel zwischen -15 % und -21 % (-65 mm in Baden-Württemberg bis -77 mm in Hessen) trockener als im Zeitraum 1951-2010 (Abb. 3.12). Das Sommerhalbjahr war hingegen nur geringfügig trockener (von ± 0 mm in Hessen und Rheinland-Pfalz bis -23 mm in Baden-Württemberg). In allen vier Bundesländern ist eine ausgeprägte Frühjahrestrockenheit mit einem Niederschlagsdefizit von Februar bis April zu erkennen, welche im März mit bis zu -38 mm am deutlichsten ausfiel.

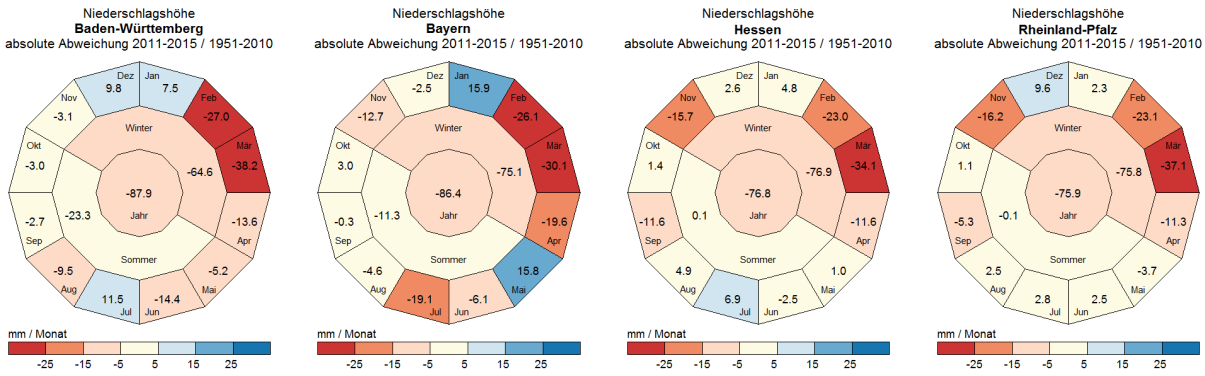


Abb. 3.12: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Niederschlagshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraums 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Die statistische Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Niederschläge anhand des Mann-Kendall-Trendtest zeigt für das Kalenderjahr sowie das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai - Oktober) keinen erkennbaren Trend im Zeitraum 1951 bis 2015. Eine zwischenzeitliche Zunahme der Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr (November - April) (Abb. 3.11) ist hingegen, je nach betrachtetem Bundesland, seit Mitte der 1990er Jahre bzw. in der feuchten Dekade 2001-2010 statistisch signifikant. Umgekehrt weisen die vergangenen 5 Jahre, mit Ausnahme von Baden-Württemberg, eine Abnahme der Winterniederschläge auf (Abb. 3.12 und Abb. 3.13).

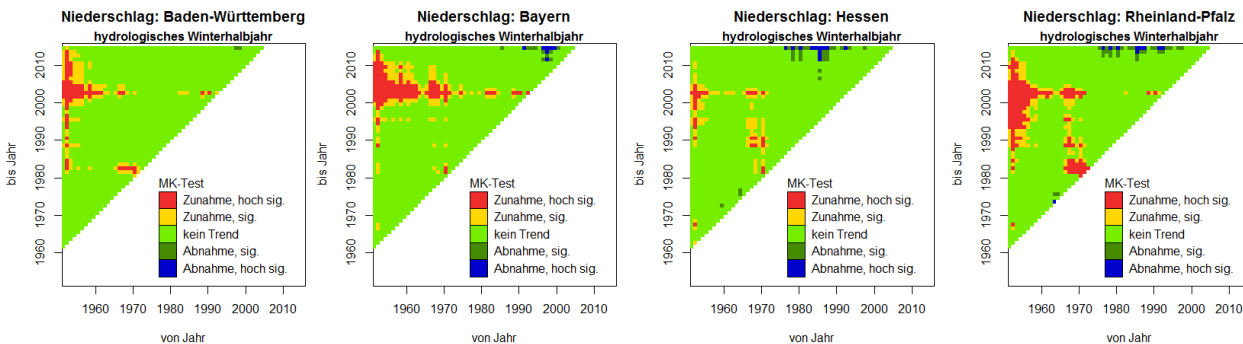


Abb. 3.13: Trenddreiecke für den Niederschlag im hydrologischen Winterhalbjahr im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.

3.2.3 Tatsächliche Verdunstung

Die tatsächliche oder aktuelle Verdunstung ist eine zentrale Ergebnisgröße der Bodenwasserhaushaltsmodellierung. Sie wird vor allem von Temperatur, Sonneneinstrahlung (Globalstrahlung), Niederschlagsdargebot, Bodeneigenschaften und Landnutzung gesteuert und ist von zentraler Bedeutung für die Höhe und jahreszeitliche Verteilung des Gesamtabflusses. Änderungen des Niederschlags, der Temperatur und weiterer Einflussfaktoren (z.B. Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit) sind somit in unterschiedlichem Maße immer auch verdunstungsrelevant. Im Modell wird verdunstendes Wasser dem Interzeptions- und Bodenspeicher entzogen. Der Bodenspeicher wird durch die nutzbare Feldkapazität beschrieben, über den Niederschlag aufgefüllt und durch die Verdunstung (Evaporation und Transpiration) sowie ggf. Versickerung entleert. In Auenbereichen mit direkter Grundwasseranbindung der Böden kann auch kapillarer Aufstieg zur Füllung des Bodenspeichers beitragen.

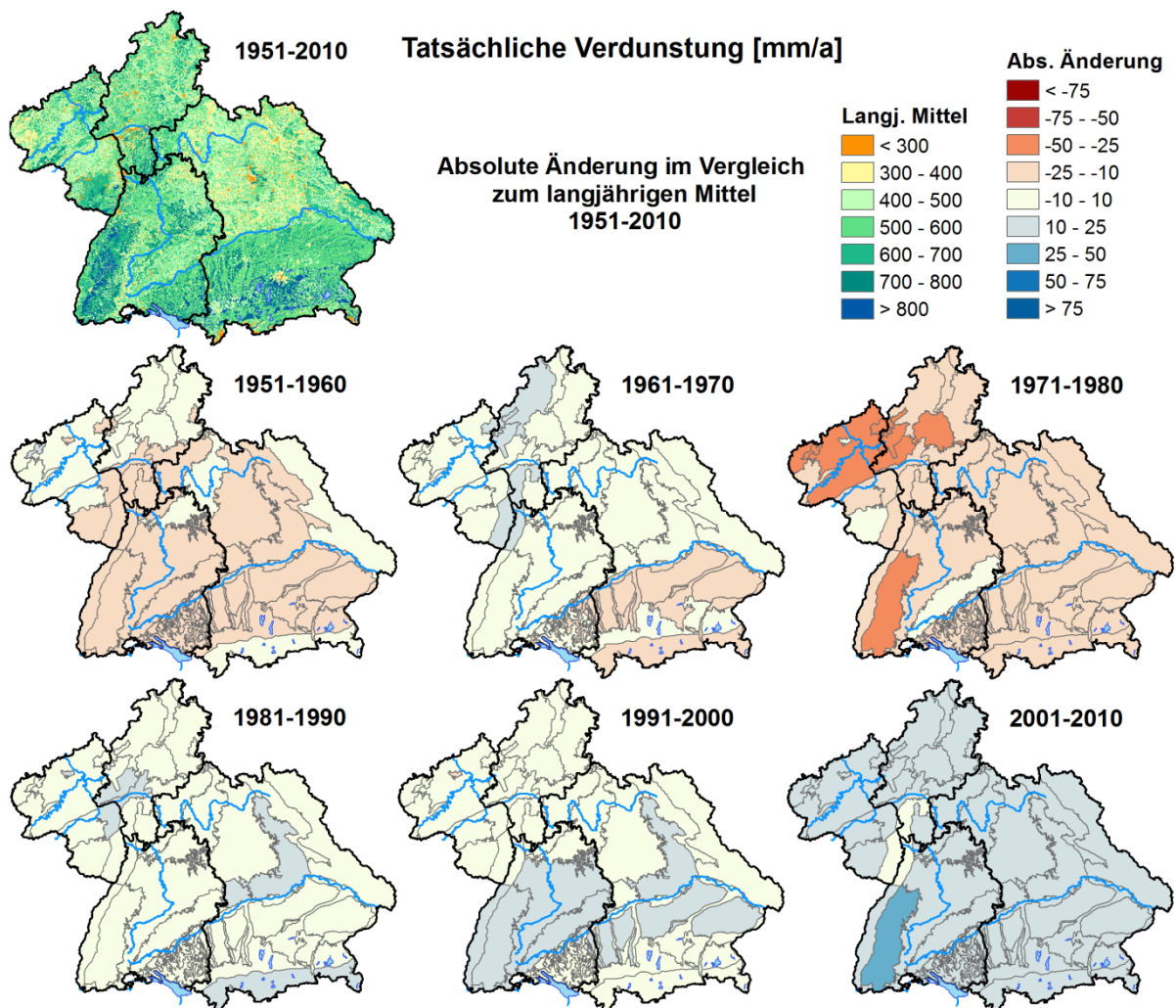


Abb. 3.14: Mittlere jährliche Verdunstungshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.

Die mittlere tatsächliche Verdunstung liegt über alle vier Bundesländer (Süddeutschland) im 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 bei 534 mm/a. Sie variiert zwischen 567 mm/a in Baden-Württemberg, 528 mm/a in Bayern, 521 mm/a in Hessen und 510 mm/a in Rheinland-Pfalz (Tab. 3.3). Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen dem niederschlagsreicheren Baden-Württemberg und den trockeneren Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen somit nur 6 %.



Die mittlere jährliche tatsächliche Verdunstungshöhe im Gesamtzeitraum betrug in den einzelnen Naturräumen zwischen 436 mm/a in der „Nordwesteifel“ und rund 630 mm/a im „Moränenland“ sowie 664 mm/a im „Schwarzwald“ (Abb. 3.14). Im Vergleich zu anderen Wasserhaushaltsgrößen zeigt die tatsächliche Verdunstung somit eine vergleichsweise geringe Bandbreite.

Die Verdunstung kann regional einen sehr unterschiedlichen Anteil an der Niederschlagshöhe ausmachen. So verdunsten in Baden-Württemberg und Bayern im 60-jährigen Mittel rund 55 – 60 % des Niederschlags wieder, so dass in etwa 40 – 45 % abflussrelevant werden. In den trockeneren Bundesländern Rheinland Pfalz und Hessen beträgt der Anteil des verdunstenden Wassers am Niederschlag rund 65 - 70 %, so dass nur noch 30 - 35 % für oberirdische (Direktabfluss) und unterirdische (Grundwasserneubildung) Abflusskomponenten verbleiben. Zwischen den Naturräumen werden diese Unterschiede noch deutlicher. Während im niederschlagsarmen „Mainzer Becken und Wetterau“ mehr als 75 % (466 mm/a) des Niederschlags wieder verdunstet, beträgt dieser Anteil im „Schwarzwald“ nur rund 50 % (664 mm/a) und in den Nordalpen sogar nur rund 30 % (562 mm/a).

Die Verdunstung ist vor allem temperatur- und vegetationsbedingt in den Sommermonaten sehr viel höher als im Winterhalbjahr (Abb. 3.16 und 3.17). So treten im Jahresverlauf in jedem Bundesland sowie in allen Naturräumen die höchsten Verdunstungsraten in den Monaten Mai bis Juli auf. Die geringsten Verdunstungsverluste sind in den Wintermonaten Dezember und Januar zu verzeichnen. Der Quotient *tatsächliche Verdunstung Winterhalbjahr / Sommerhalbjahr* liegt im Mittel bei 0.4 und variiert zwischen 0.3 („Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“) und 0.5 („Pfälzerwald“). In einzelnen Naturräumen mit ausreichender Wasserverfügbarkeit (z.B. „Moränenland“, „Schwarzwald“) kann die tatsächliche Verdunstung maximale Werte von bis zu 100 mm/Monat und mehr während der Sommermonate erreichen.

Dies zeigt deutlich die regionalen Unterschiede sowie die steuernde Funktion der Verdunstung innerhalb der Gesamtwasserbilanz und somit ihren Einfluss auf die übrigen Bilanzgrößen Gesamtabfluss, Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung.

Die zeitliche Entwicklung der tatsächlichen Verdunstungsraten zwischen den einzelnen Dekaden zeigt für den gesamten süddeutschen Raum eine relativ geringe Variabilität (Abb. 3.14 und Tab. 3.3). So treten die höchsten Unterschiede von rund 4 % beim Vergleich zwischen der Trocken- (1971-1980, -3.2 %) und der Nassdekade (1981-1990, +0.9 %) auf.

Bei Betrachtung der tatsächlichen Verdunstung in den einzelnen Bundesländern zeigt sich ein, in seiner regionalen Ausprägung variierender, potentieller Wassermangel. Dieser kann über das Verhältnis *tatsächliche Verdunstung / potentielle Verdunstung* beschrieben werden. Je größer das daraus resultierende Verhältnis, desto geringer ist der Wassermangel in der betrachteten Region. So beträgt dieses über den 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 während des Sommerhalbjahres 69 % in Baden-Württemberg, 68 % in Bayern, 62 % in Hessen und 56 % in Rheinland-Pfalz (Abb. 3.16 und 3.17). Mit Werten zwischen 51 % und 53 % weisen einzelne Naturräume einen nochmals stärker ausgeprägten Wassermangel auf („Fränkische Alb“, „Mainzer Becken und Wetterau“, „Pfälzerwald“ und „Nordpfälzer Bergland“). Die geringste Limitierung mit Werten > 80 % tritt erwartungsgemäß in den niederschlagsreichen Naturräumen Südbayerns auf („Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“, „Moränenland“ und „Nordalpen“).

Seit Beginn der 1990er Jahre wurde im gesamten süddeutschen Raum ein Anstieg der aktuellen sowie der potentiellen Verdunstungsmenge beobachtet. Dies ist vor allem durch den direkten Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Verdunstungshöhe zu erklären; die wärmeren Lufttemperaturen verursachen demnach eine Zunahme der Verdunstung. In der Dekade 2001-2010 sank, trotz steigender tatsächlicher Verdunstungsmengen (Abb. 3.14), das Verhältnis aus tatsächlicher Verdunstung / potentieller Verdunstung im Sommerhalbjahr auf 64 % in Baden-Württemberg, 65 % in Bayern, 61 % in Hessen und 53 % in Rheinland-Pfalz. Dieser Rückgang resultiert aus einer Abnahme des Wasserdargebots während des Sommerhalbjahres (siehe Kap. 3.2.7) und führt gegebenenfalls zu einer Verlänge-

rung der sommerlichen Niedrigwasserperiode. In den vier Naturräumen mit der stärksten Limitierung im Gesamtzeitraum („Fränkische Alb“, „Mainzer Becken und Wetterau“, „Pfälzerwald“ und „Nordpfälzer Bergland“) verdunstete in der jüngsten Dekade sogar weniger als die Hälfte der potentiellen Verdunstungsmenge, während die feuchten Naturräume Südbayerns eine nahezu unverändertes Verhältnis aus tatsächlicher Verdunstung / potentieller Verdunstung aufweisen.

Tab. 3.3: Mittlere tatsächliche Verdunstung in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Tatsächliche Verdunstung [mm/a]				
	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	534	567	528	521	510
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-11 / -2.0	-12 / -2.2	-12 / -2.2	-7 / -1.3	-8 / -1.6
1961-1970	-2 / -0.3	-1 / -0.1	-7 / -1.3	10 / 1.9	5 / 1.0
1971-1980	-17 / -3.2	-16 / -2.8	-15 / -2.8	-22 / -4.1	-20 / -4.0
1981-1990	5 / 0.9	0 / 0.0	7 / 1.3	4 / 0.7	7 / 1.3
1991-2000	7 / 1.2	11 / 1.9	9 / 1.6	-1 / -0.1	1 / 0.1
2001-2010	18 / 3.3	18 / 3.2	19 / 3.5	16 / 3.0	16 / 3.1
2011-2015	-7.6 / -1.4	-19 / -3.4	-7 / -1.4	4.4 / 0.8	-1 / 0.2

Obwohl über den Gesamtzeitraum nur relativ kleine jährliche Variabilitäten auftreten, (Abb. 3.15, Unterschied 25-Perzentil und 75-Perzentil) beträgt die Differenz zwischen den beiden Extremjahren 2002 (599 mm) und 2003 (470 mm) in Bayern dennoch 22 % (Baden-Württemberg 21 %, Hessen 16 % und Rheinland-Pfalz 14 %). Insgesamt ist seit Beginn der 1980er Jahre eine Tendenz hin zu steigenden aktuellen Verdunstungshöhen auf Jahresbasis zu erkennen.

Bei Betrachtung der absoluten Veränderung der monatlichen tatsächlichen Verdunstungshöhe in der Dekade 2001-2010 im Vergleich zum langjährigen Mittel (Abb. 3.18) zeigt sich sehr deutlich der Zusammenhang zwischen Verdunstungshöhe und Lufttemperatur. So traten in allen vier Bundesländern im Dezember niedrigere Werte auf, wohingegen insbesondere im Frühjahr bei bereits höheren Temperaturen der limitierende Einfluss der Lufttemperatur auf die Verdunstungshöhe abgenommen hat. Somit war für diese Monate ein Anstieg der tatsächlichen Verdunstungsmenge zu beobachten.

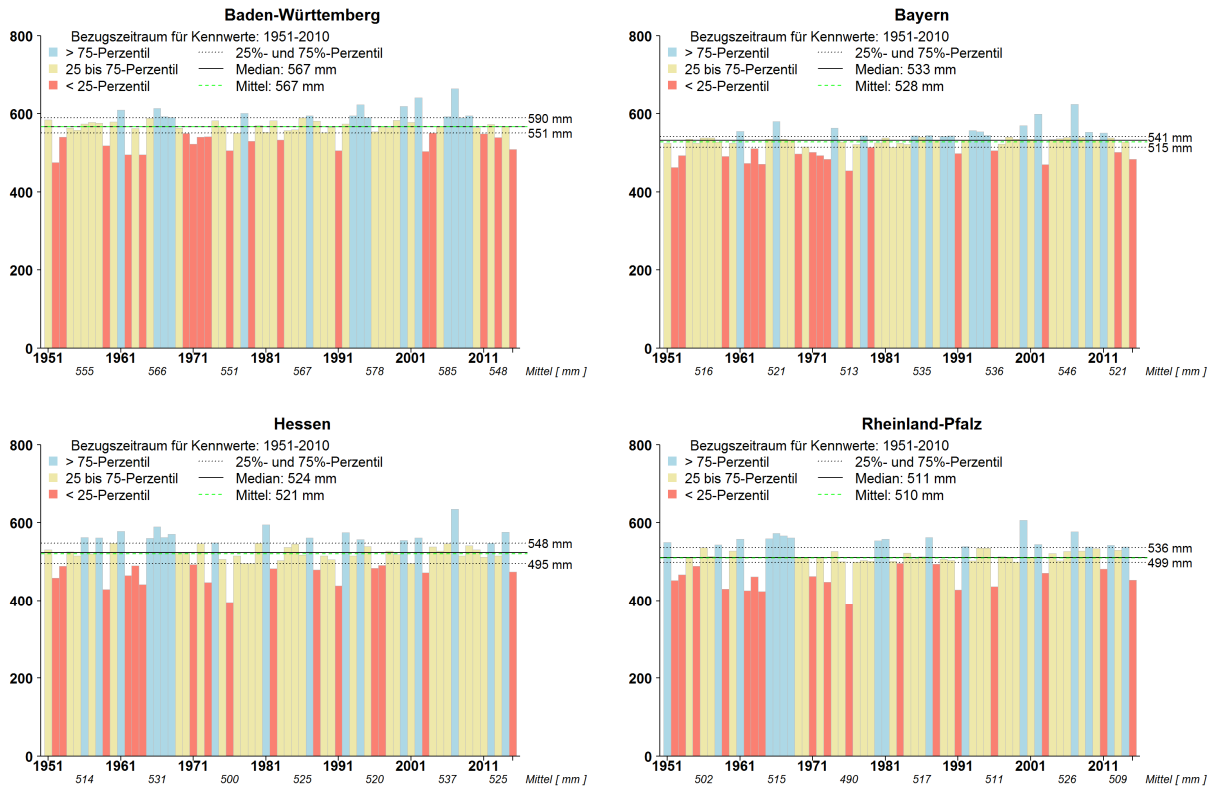


Abb. 3.15: Entwicklung der jährlichen tatsächlichen Verdunstung auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.

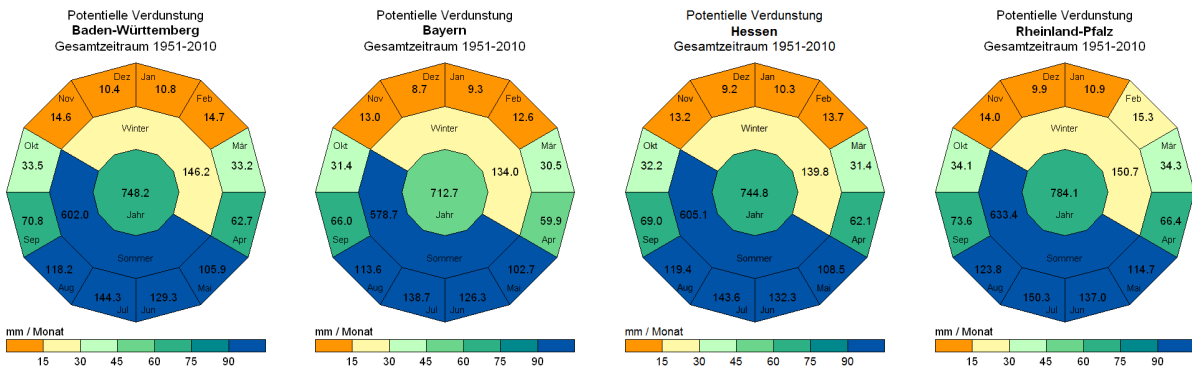


Abb. 3.16: Innerjährliche Verteilung der potentiellen Verdunstungshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

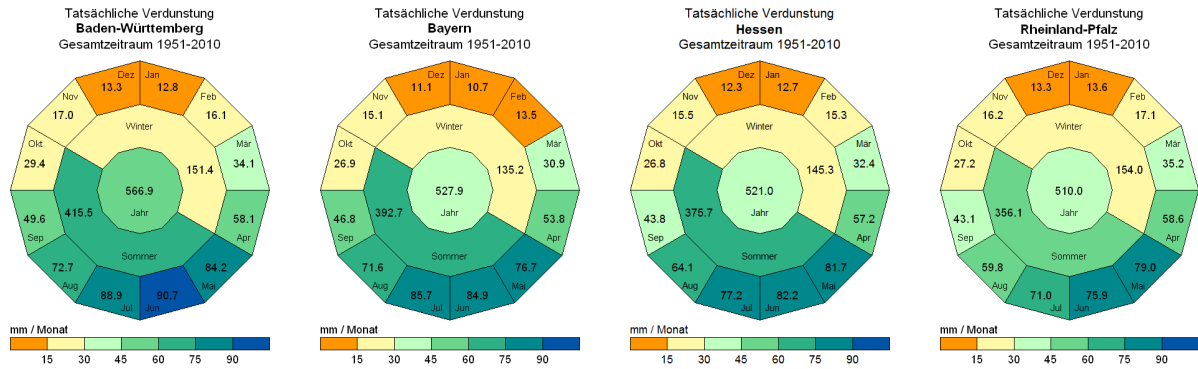


Abb. 3.17: Innerjährliche Verteilung der tatsächlichen Verdunstungshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

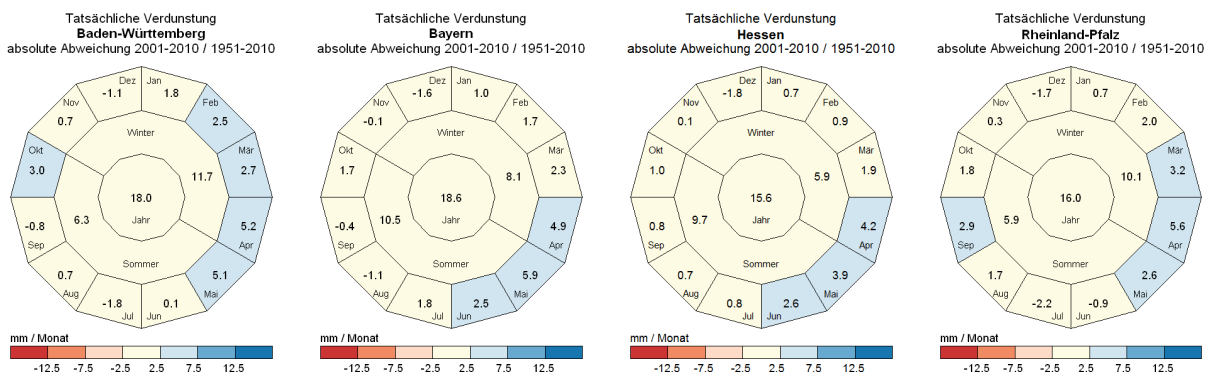


Abb. 3.18: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der tatsächlichen Verdunstungshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Analog dem Änderungssignal der Bundesländer waren in der vergangenen Dekade 2001-2010 durchgehend Zunahmen der tatsächlichen Verdunstung in sämtlichen betrachteten Naturräumen im Gesamtjahr zu verzeichnen. Dies ist vor allem, begünstigt durch entsprechend höhere Lufttemperaturen und ausreichender Wasserverfügbarkeit, auf steigende Verdunstungsraten in den Winter- und Frühjahrsmonaten zurückzuführen.

Die deutlichste Zunahme der tatsächlichen Verdunstung von 32 mm trat im „Schwarzwald“ auf. Auffallend ist auch ein deutlicher Anstieg der tatsächlichen Verdunstung von 20 bis 25 mm (dies entspricht einem Änderungssignal von rund +4 bis +5 %) in allen Naturräumen des Molassebeckens („Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“, „Moränenland“, „Tertiärhügelland und Iller-Lech-Schotterplatten“).

Trotz insgesamt steigender Verdunstungsraten kam es in einigen Naturräumen auf Grund der temporären Wasserlimitierung während der Sommermonate auch zu einem Rückgang der tatsächlichen Verdunstung (u.a. „Pfälzerwald“, „Nordpfälzer Bergland“, „Pellenz“, „Nördlicher Oberrheingraben“).

Im Zeitraum 2011-2015 nahm die tatsächliche Verdunstung in allen Bundesländern in den Wintermonaten zu, zwischen 6 mm in Baden-Württemberg und 9 mm in Hessen, wohingegen sie im Sommerhalbjahr auf Grund temporären Wassermangels zwischen -5 mm in Hessen und -25 mm in Baden-Württemberg abnahm (Abb. 3.19).

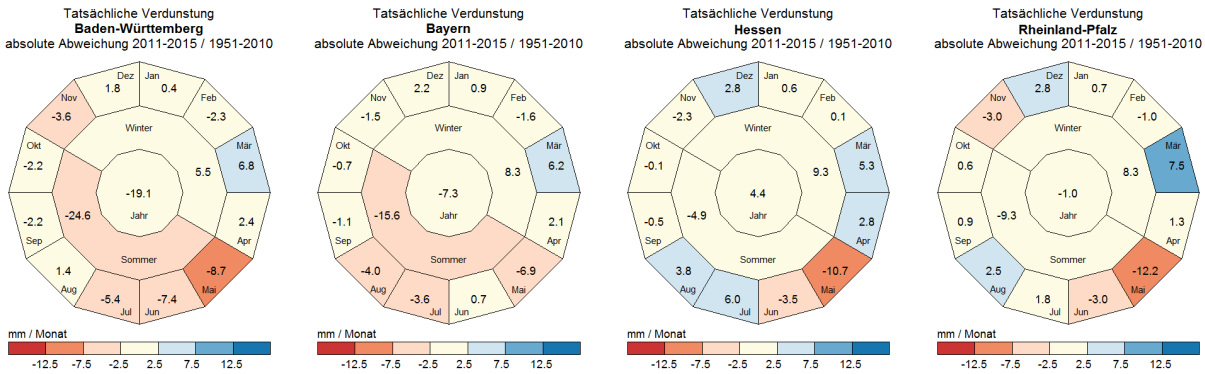


Abb. 3.19: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der tatsächlichen Verdunstungshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraums 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Die statistische Auswertung anhand des Mann-Kendall-Trendtest zeigt in allen Bundesländern einen einheitlichen Trend bei der zeitlichen Entwicklung der potentiellen Verdunstungshöhe auf Basis der Kalenderjahre (Abb. 3.20). Diese Zunahme ist in Bayern bereits seit Beginn der 1990er Jahre signifikant, während sie in Rheinland-Pfalz erst mit Beginn der 2000er Jahre einsetzt. Dies bedeutet, dass in allen Bundesländern, insbesondere während der letzten 20 bis 25 Jahre, eine statistisch abgesicherte Zunahme der potentiellen Verdunstungshöhe erfolgte.

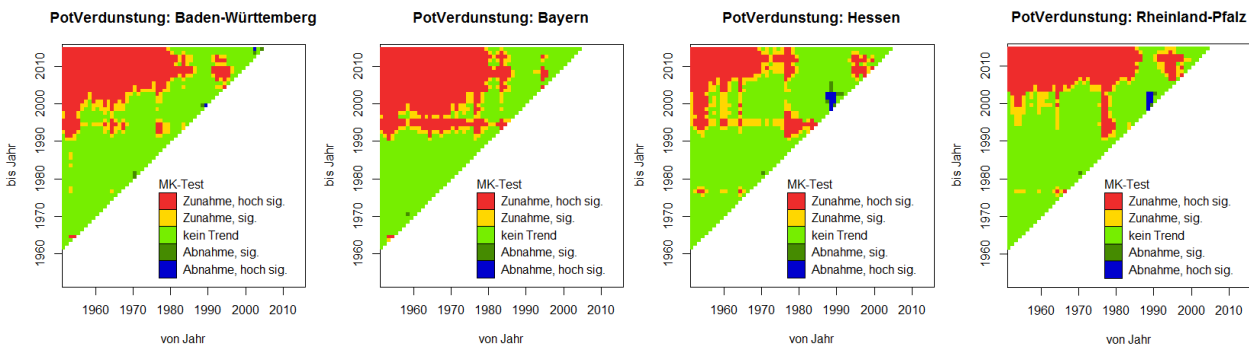


Abb. 3.20: Trenddreiecke für die potentielle Verdunstungshöhe im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.

Bei Betrachtung der Trenddreiecke der zeitlichen Entwicklung der aktuellen Verdunstungshöhe bestätigt sich der potentielle Wassermangel in Hessen und Rheinland-Pfalz auf Basis der Kalenderjahre (Abb. 3.21). Trotz gestiegener potentieller Verdunstungshöhen, ist somit auf Grund des insgesamt geringeren Wasserdargebots, kein weiterer Anstieg der aktuellen Verdunstungshöhe im Gesamtzeitraum zu erkennen. Vor allem in Bayern, aber auch in Baden-Württemberg, ist hingegen teilweise eine Zunahme der aktuellen Verdunstungshöhe im Zeitraum 1990 bis 2015 zu erkennen.

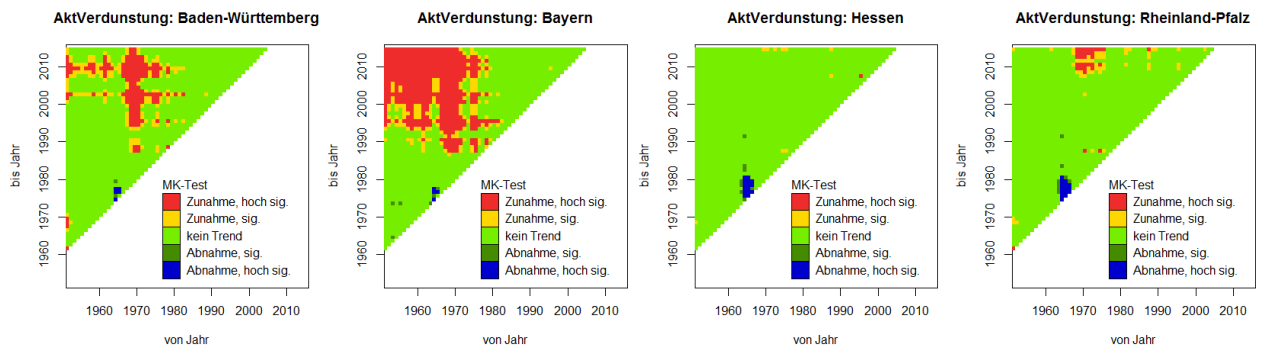


Abb. 3.21: Trenddreiecke für die tatsächliche Verdunstungshöhe im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.



3.2.4 Gesamtabfluss

Der Gesamtabfluss ist als Wasserbilanzgröße gleichbedeutend mit der Differenz aus Niederschlag und tatsächlicher Verdunstung und beschreibt somit den effektiven Niederschlag. Konkret bedeutet dies, dass Niederschlagswasser, das nicht verdunstet, prinzipiell abflussrelevant ist, unabhängig davon, über welche Fließwege (ober- und unterirdische Abflusskomponenten) dies tatsächlich erfolgt. Der Gesamtabfluss stellt die Summe der beiden Abflusskomponenten Direktabfluss (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss bzw. Interflow) und Basisabfluss (Grundwasserabfluss) dar. Auf ebenen, gut durchlässigen Standorten (ohne Direktabfluss) beschreibt der Gesamtabfluss die Sickerwasserrate, welche die maximal für die Grundwasserneubildung zur Verfügung stehende Wassermenge repräsentiert und dieser näherungsweise gleichgestellt werden kann.

Die Sickerwasserrate entspricht dem Wasservolumen, das den Bodenspeicher des Modells der Schwerkraft folgend in Richtung Grundwasser verlässt. Sickerwasserrate und Gesamtabfluss unterscheiden sich (im Mittel) somit nur durch den Oberflächenabfluss, der zusätzlich zur Gesamtabflusshöhe beiträgt. Im Rahmen der hier vorgestellten Modellierung wurde Oberflächenabfluss nur für Siedlungsbereiche und Wasserflächen und nicht für die Gesamfläche ausgewiesen. Die Unterschiede sind damit großräumig so gering, dass beide Größen (Sickerwasserrate und Gesamtabfluss) bezogen auf langjährige Verhältnisse und die hier zu Grunde gelegten Raumeinheiten nahezu gleichbedeutend sind.

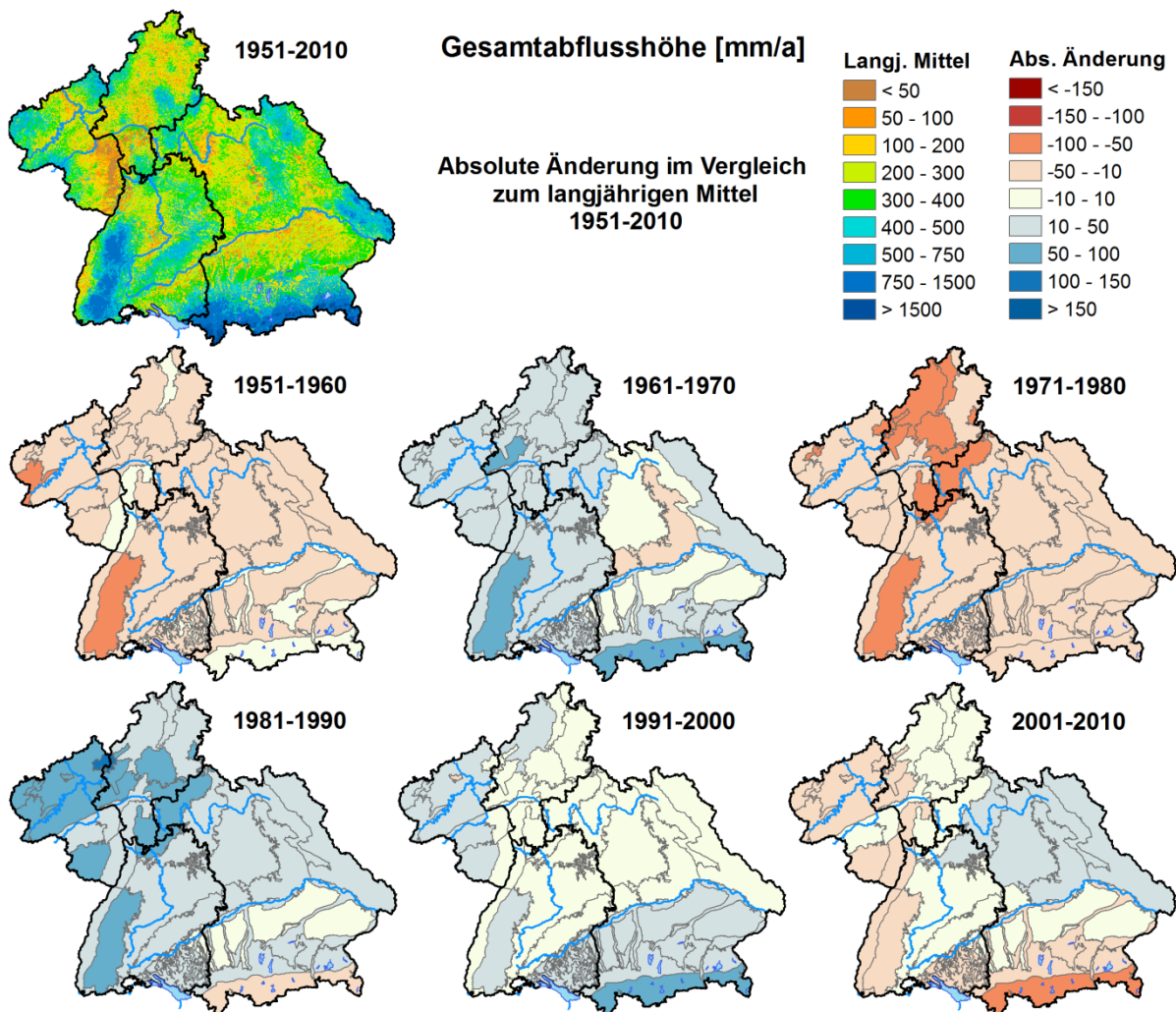


Abb. 3.22: Mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.

Die mittlere Gesamtabflusshöhe über alle vier Bundesländer (Süddeutschland) im 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 liegt bei 368 mm/a. Sie variiert zwischen 409 mm/a in Bayern, 401 mm/a in Baden-Württemberg, 277 mm/a in Rheinland-Pfalz und 258 mm/a in Hessen (Tab. 3.4). Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen den niederschlagsreicheren Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und den trockeneren Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen somit 34 %.

Auf Grund der größeren Niederschläge in topographisch höher gelegenen Regionen zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der mittleren Gesamtabflussmenge und der mittleren Höhe des betrachteten Naturraumes. Somit variierten die mittleren Gesamtabflüsse in den untersuchten Naturräumen im Gesamtzeitraum zwischen 1 205 mm/a in den „Nordalpen“, 723 mm/a im „Schwarzwald“ und 132 mm/a im „Mainzer Becken und Wetterau“ sowie 130 mm/a im „nördlichen Oberrheingraben“. Die Mittelgebirge sowie das „Moränenland“ mit Werten zwischen 402 mm/a und 511 mm/a weisen generell hohe Gesamtabflüsse auf, wohingegen vor allem der „Taunus“ (228 mm/a) und die nordöstlichen Naturräume Hessens (222 mm/a „Niederhessische Senke“ und 243 mm/a „Fulda-Werra-Bergland“) durch geringe Gesamtabflüsse charakterisiert sind (Abb. 3.22).

Entsprechend der innerjährlichen Verteilung der tatsächlichen Verdunstung treten, trotz höherer Sommerniederschläge, die höchsten Gesamtabflüsse während des Winterhalbjahres auf. Bei Betrachtung der einzelnen Bundesländer zeigen sich zwei unterschiedliche Charakteristika (Abb. 3.24): 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. Während in den kühleren Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern die Winterniederschläge häufiger als Schnee zwischengespeichert werden, spielt dieser Effekt in den wärmeren Bundesländern Hessen und Rheinland-Pfalz nur 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 *Gesamtabfluss Winterhalbjahr / Sommerhalbjahr* liegt im Mittel über alle Naturräume bei 3.5 und variiert zwischen 1.4 („Moränenland“) und 18.2 („Nördlicher Oberrheingraben“). Die einzige Ausnahme mit einem Faktor kleiner als 1 bildet der Naturraum „Nordalpen“ (Faktor 0.7). Die geringen Gesamtabflüsse während der Wintermonate in den „Nordalpen“ sind mit dem dort vorherrschenden nivalen Regime zu erklären.

Die zeitliche Entwicklung der Gesamtabflusshöhe zeigt ein ähnliches, aber insgesamt noch etwas ausgeprägteres Muster im Vergleich zum Niederschlag. So wird bei Betrachtung der einzelnen Dekaden die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschlagsmenge in verstärkter Form wiedergegeben (Abb. 3.22 und Tabelle 3.4). Dies zeigt sich in der Variabilität des Gesamtabflusses im süddeutschen Raum von rund 21 % zwischen der Trocken- (1971-1980, -10,7 %) und der Nassdekade (1981-1990, +10,7 %). Die zeitliche Variabilität ist aber nicht über alle vier Bundesländer gleich verteilt. Während die dekadische Variabilität in Baden-Württemberg dem süddeutschen Mittel entspricht, liegen die maximalen Unterschiede in Bayern mit 12 % deutlich niedriger. In Hessen und Rheinland-Pfalz treten hingegen deutliche Schwankungen von bis zu 39 % zwischen der Trocken- und Nassdekade auf.

Einzelne Naturräume können wiederum von einer noch stärker ausgeprägten dekadischen Variabilität geprägt sein (44 % in der „Niederhessischen Senke“, 45 % im „Oberrheingraben“, 47 % im „Taunus“ sowie 48 % im „Lahn-Dill-Gebiet“). Am stabilsten bezüglich der Gesamtabflussmengen, mit maximalen dekadischen Schwankungen zwischen lediglich 1 % und 9 %, zeigen sich erwartungsgemäß die niederschlagsreichen Naturräume Südbayerns („Nordalpen“, „Moränenland“, „Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“ und „Tertiärhügelland+Iller-Lech-Schotterplatten“).



Tab. 3.4: Mittlere Gesamtabflusshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in mm/a und %.

Gesamtabflusshöhe [mm/a]					
Zeitraum	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	368	401	409	258	277
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-25 / -7.1	-26 / -6.5	-22 / -5.3	-20 / -7.7	-39 / -14.1
1961-1970	23 / 6.7	26 / 6.5	16 / 3.9	40 / 15.3	21 / 7.7
1971-1980	-37 / -10.7	-41 / -10.1	-29 / -7.0	-54 / -20.7	-40 / -14.3
1981-1990	36 / 10.7	47 / 11.8	22 / 5.3	47 / 18.1	57 / 20.5
1991-2000	9 / 2.5	7.1 / 1.8	12 / 2.9	-3 / -1.2	17 / 6
2001-2010	-7 / -2.1	-14 / -3.5	1 / 0.3	-10 / -3.8	-17 / -6.1
2011-2015	-60 / -16.9	-52 / -12.9	-62 / -15.2	-67 / -26.1	-56 / -20.4

Da die Gesamtabflusshöhe die Bilanzgröße aus den jährlich hoch variablen Niederschlägen sowie den recht stabilen tatsächlichen Verdunstungsmengen beschreibt, wirkt sich die Variabilität des Niederschlagssignals in verstärkter Form auf die Gesamtabflusshöhe aus (Abb. 3.23). So beträgt die Differenz zwischen den beiden Extremjahren 2002 (656 mm) und 2003 (250 mm) in Bayern, Baden-Württemberg und Hessen jeweils 62 % und in Rheinland-Pfalz 54 %).

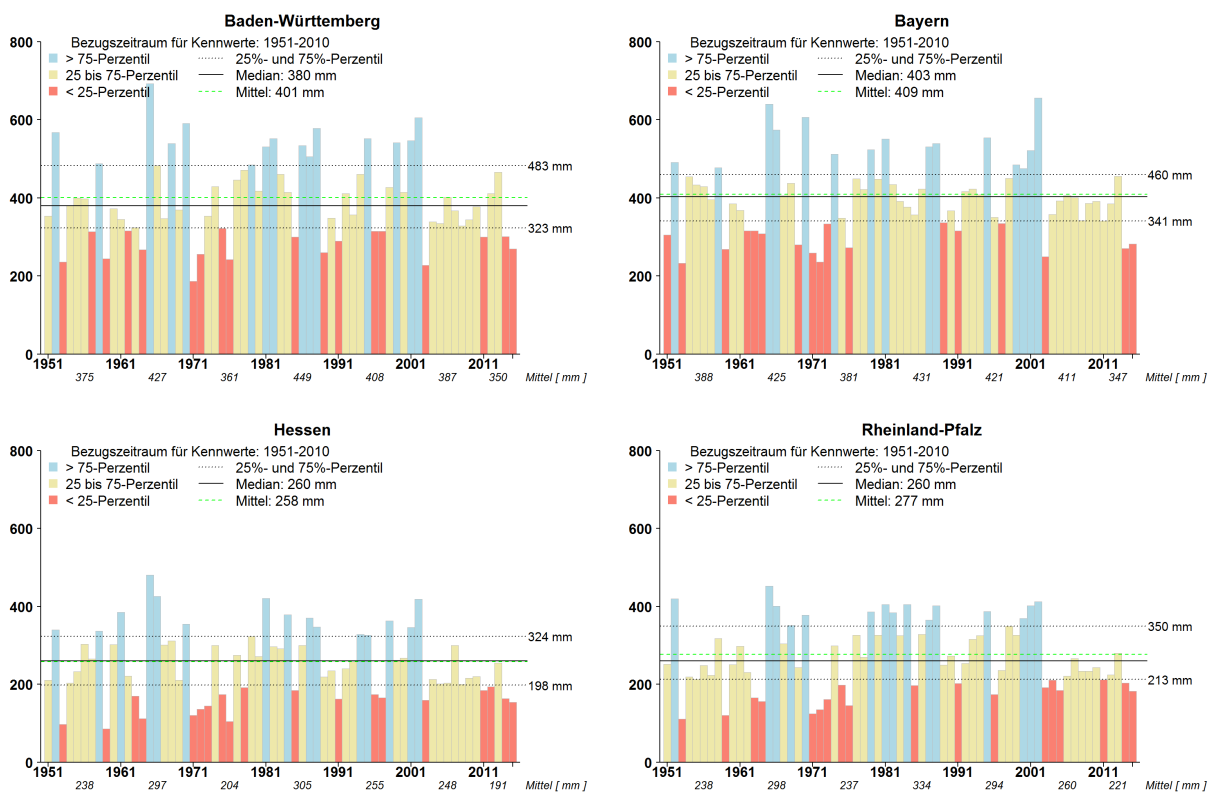


Abb. 3.23: Entwicklung der jährlichen Gesamtabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.

In der vergangenen trocken-warmen Dekade 2001-2010 ist im Vergleich zum vieljährigen Mittel in den betrachteten Bundesländern ein geringer ganzjähriger Rückgang (außer Bayern) des Gesamtabflusses zu verzeichnen (Abb. 3.22 und Tab. 3.4). Der Rückgang der Gesamtabflusshöhe war während der Sommermonate deutlicher ausgeprägt als während der Wintermonate (Abb. 3.25), was in einer Verstärkung der Jahresamplitude resultiert. Der

beschriebene erhöhte Niederschlag während der Wintermonate (Kap. 3.2.2) wird durch den Anstieg der tatsächlichen Verdunstung (Kap. 3.2.3) insgesamt kompensiert, auch wenn beispielsweise der Monat März in allen vier Bundesländern steigende Gesamtabflüsse aufwies. Der stärkste Rückgang erfolgte in den Monaten Juni und Juli, wobei insbesondere der Juni in allen Bundesländern durch sinkende Niederschlagsmengen sowie steigende Verdunstungshöhen am deutlichsten von einem Rückgang des Abflusses betroffen war (- 24 % in Bayern, -42 % in Baden-Württemberg, -50 % in Rheinland-Pfalz und -57 % in Hessen). Das in allen Bundesländern auftretende trocken-warme Sommerhalbjahr weist, mit Ausnahme des Monats August, somit durchgehend niedrigere Gesamtabflüsse auf.

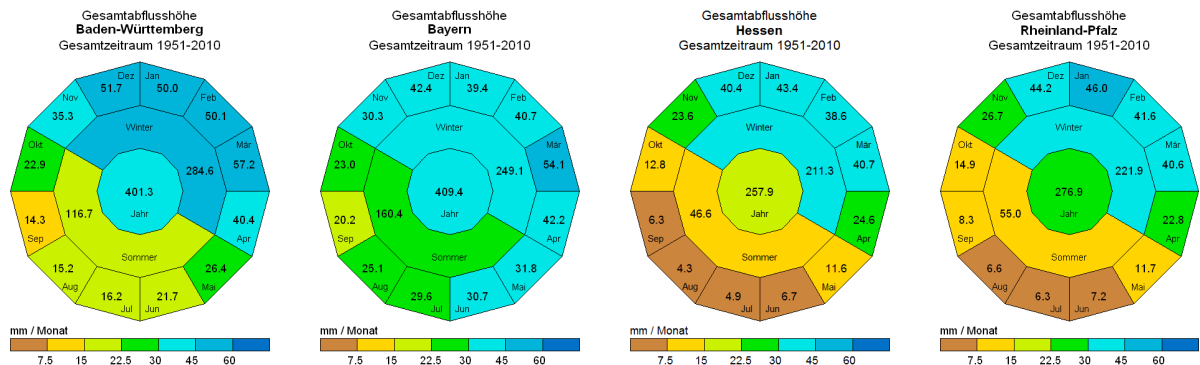


Abb. 3.24: Innerjährliche Verteilung der Gesamtabflusshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

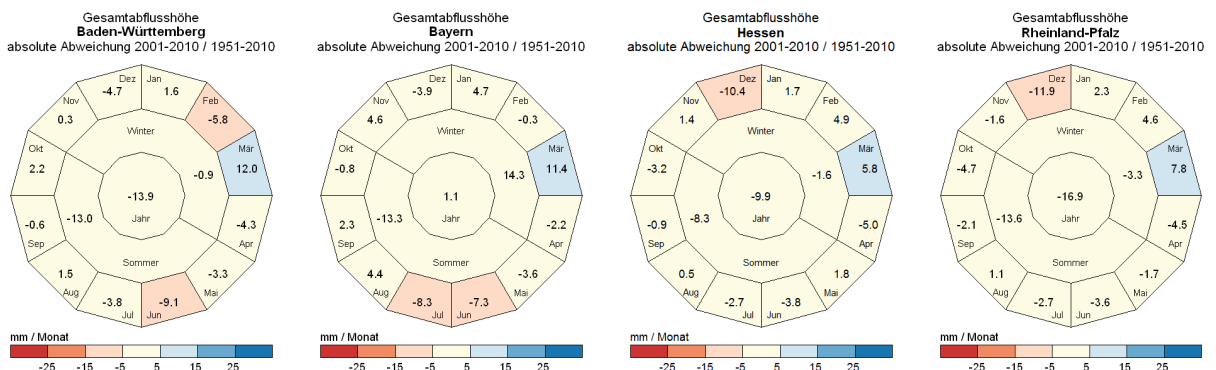


Abb. 3.25: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Gesamtabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Analog dem beobachteten Änderungssignal beim Niederschlag, welches durch die generelle Zunahme der tatsächlichen Verdunstung in allen Naturräumen verstärkt wird, bildete sich in der vergangenen Dekade 2001-2010 ein West-Ost Gradient über alle Bundesländer hinweg aus (Abb. 3.22). Demnach nahmen in allen Rheinland-Pfälzischen Naturräumen (-3 mm im „Nordpfälzer Bergland“ bis -38 mm in der „Nordwesteifel“) sowie in den westlichen Naturräumen Baden-Württembergs (-15 mm im „Nördlichen Oberrheingraben“ bis -50 mm im „Schwarzwald“) und Hessens (-15 mm im „Nördlichen Oberrheingraben“ bis -34 mm im „Taunus“) die mittleren Gesamtabflüsse ab. Östlich daran anschließend erstreckt sich ein Nord-Süd Streifen von Hessen („Westhessisches Bergland“, „Fulda-Werra-Bergland“) bis zur „Schwäbischen Alb“, welcher durch überwiegend gleichbleibende Gesamtabflüsse (± 10 mm) charakterisiert ist. Darauf folgen die nordöstlichen Naturräume Bayerns, für welche durchgehend deutliche Zunahmen simuliert wurden (+27 mm im „Fränkischen Keuper-Lias-Land“ bis +33 mm im „Ostbayerischen Kristallin“). Zusätzlich zum beschriebenen West-Ost Gradienten



bildete sich innerhalb Bayerns ein Nord-Süd Gradient im Änderungssignal aus. Dieser zeigt neben den bereits beschriebenen Zunahmen des Gesamtabflusses in den nördlichen Naturräumen geringe Abnahmen (-4 mm) für das „Tertiärhügelland und Iller-Lech-Schotterplatten“, deutliche Abnahmen im „Moränenland“ (-40 mm) sowie den stärksten Rückgang im Bereich der „Nordalpen“ (-64 mm).

Im Zeitraum 2011-2015 erfolgte eine ganzjährige Abnahme der Gesamtabflusshöhe von -52 mm in Baden-Württemberg bis -67 mm in Hessen, welche hauptsächlich aus dem Winterhalbjahr resultiert (-40 mm in Baden-Württemberg bis -57 mm in Hessen). Im März war dabei in allen vier Ländern ein gleichmäßig starker Rückgang zwischen -26 mm und -33 mm zu verzeichnen, während im Januar in allen Ländern die Gesamtabflusshöhe zunahm (14 mm in Hessen bis 26 mm in Bayern und Baden-Württemberg).

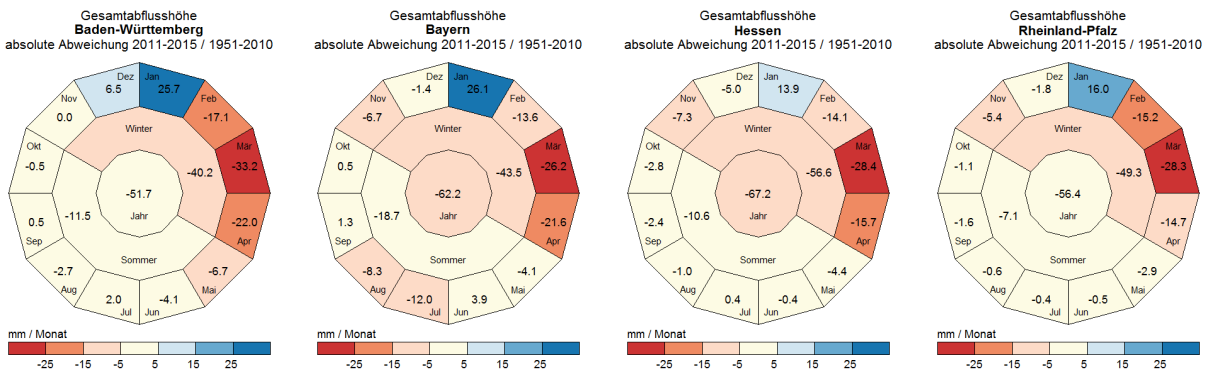


Abb. 3.26: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Gesamtabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraums 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Die statistische Auswertung anhand des Mann-Kendall-Trendtest zeigt in allen Bundesländern keinen einheitlichen Trend bei der zeitlichen Entwicklung der Gesamtabflusshöhe auf Basis der Kalenderjahre und des hydrologischen Sommerhalbjahres. Bei Betrachtung des hydrologischen Winterhalbjahres zeigt sich auf Grund der Zunahme der Winterniederschläge ebenfalls ein vorübergehender Anstieg der Gesamtabflusshöhe in der Dekade 2001-2010 (Abb. 3.27). Dieser erfolgte in Bayern und Rheinland-Pfalz bereits etwas früher. Zusätzlich zeigt sich die zwischenzeitliche Zunahme der Gesamtabflusshöhe während der feuchten 1980er Jahre.

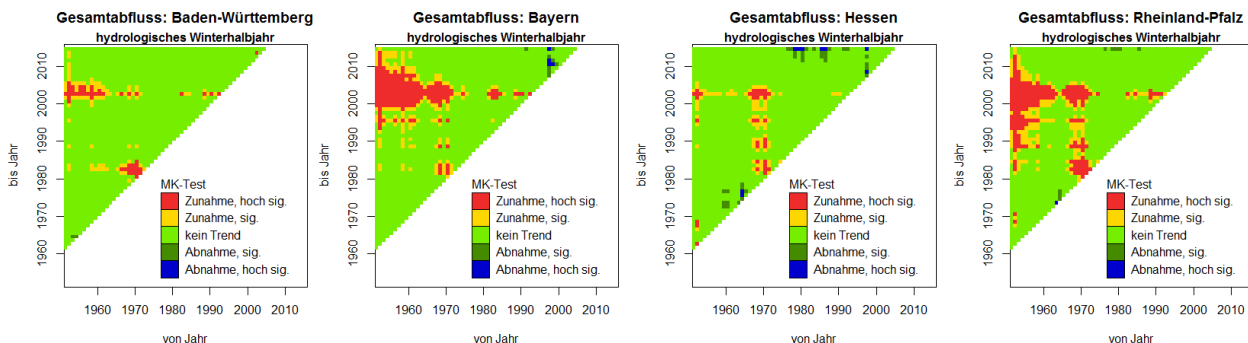


Abb. 3.27: Trenddreiecke für die Gesamtabflusshöhe im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.

3.2.6 Direktabfluss

Der Direktabfluss ist die Summe der schnell reagierenden Abflusskomponenten Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss (Interflow), die unmittelbar oder mit nur geringer Zeitverzögerung nach einem Niederschlagsereignis den Vorfluter erreichen. Er wird vor allem von Relief (Hangneigung), Versiegelungsgrad, Bodenbedeckung und Durchlässigkeit der Böden sowie der ungesättigten Gesteinszone gesteuert. Auf ebenen und gut durchlässigen Standorten findet somit kein nennenswerter Direktabfluss statt. In reliefierten und schlecht durchlässigen Gebieten bewirkt dagegen der Direktabfluss eine Reduktion der Grundwasserneubildung.

Im vorliegenden Fall entspricht der Direktabfluss der Differenz aus dem mit GWN-BW simulierten Gesamtabfluss und der auf Grundlage des regionalisierten Baseflow-Index ermittelten Grundwasserneubildung. Aus methodischen Gründen kann der Direktabfluss nur in Bezug auf vieljährige Mittelwerte ausgewertet werden. Deshalb wird, abweichend von den anderen Wasserbilanzgrößen, in diesem Kapitel auf eine Darstellung der innerjährlichen Änderungen (Ringdiagramme) verzichtet.

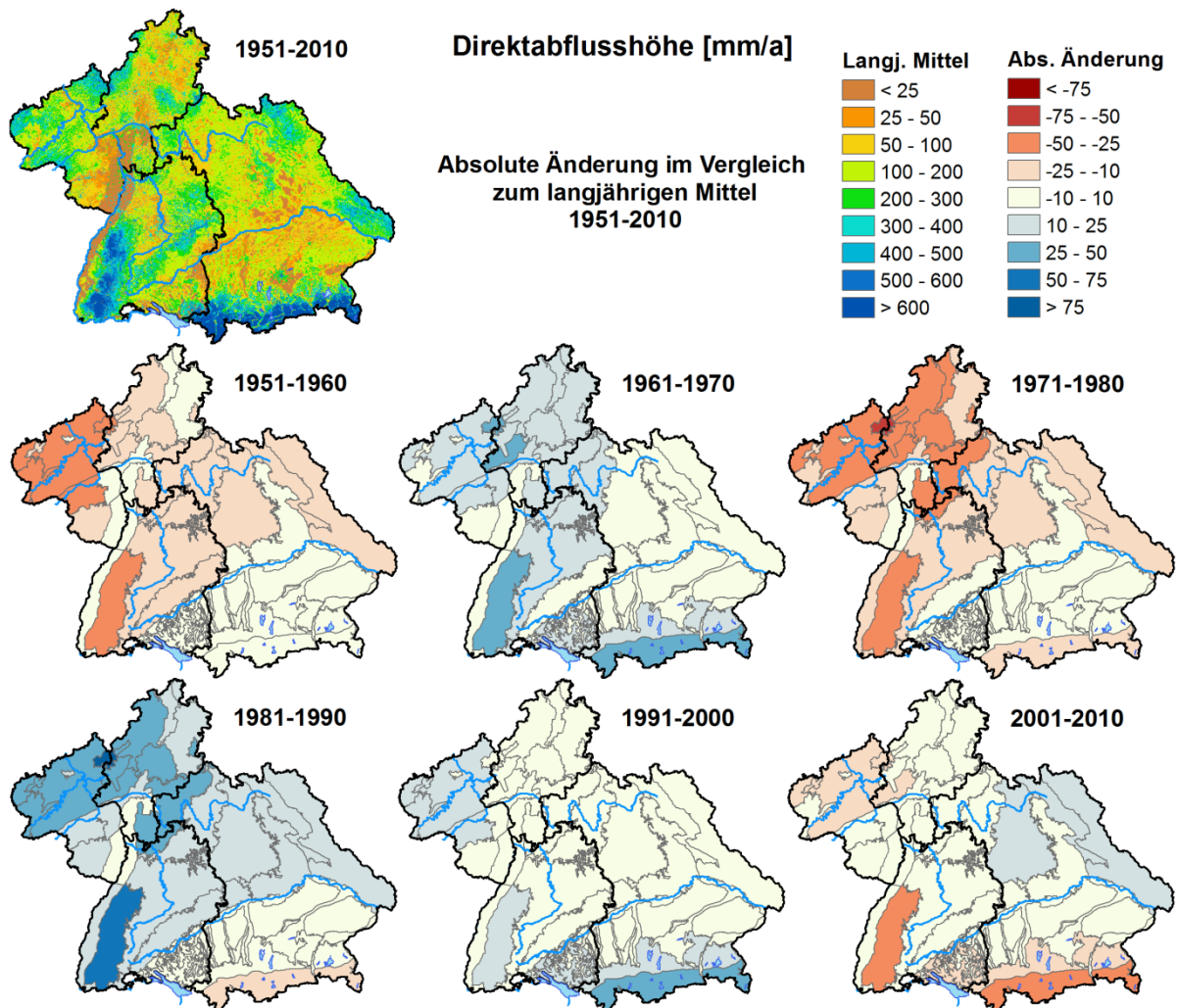


Abb. 3.28: Mittlere jährliche Direktabflusshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.

Die mittlere Direktabflusshöhe über alle vier Bundesländer (Süddeutschland) im 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 liegt bei 194 mm/a und beträgt somit rund 53 % des Gesamtabflusses. Sie variiert zwischen 214 mm/a in Baden-Württemberg, 204 mm/a in Bayern, 173 mm/a in Rheinland-Pfalz und 145 mm/a in Hessen (Tab. 3.5). Im Mittel beträgt der Unterschied



zwischen den niederschlagsreicheren Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und den trockeneren Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen somit rund 24 %.

In den einzelnen Naturräumen beeinflussen die regionalen klimatischen Verhältnisse, insbesondere das Niederschlagsdargebot, die Direktabflusshöhe am deutlichsten.

So weisen die drei niederschlagsreichsten Naturräume auch die höchsten Direktabflusshöhen auf: „Nordalpen“ (699 mm/a), „Schwarzwald“ (439 mm/a) und „Vulkanischer Westerwald“ (358 mm/a). Dementsprechend sind in den niederschlagsärmsten Regionen auch die niedrigsten Direktabflusshöhen zu verzeichnen. Diese erreichen mittlere Höhen von 85 mm/a im Naturraum „Pellenz“, 86 mm/a im „Mainzer Becken und Wetterau“ sowie 57 mm/a im „Nördlichen Oberrheingraben“.

Bereits im „Nördlichen Oberrheingraben“ zeigt sich neben der Niederschlagsmenge aber auch die steuernde Funktion der vorherrschenden Geologie auf den Direktabfluss. Auf Grund der porösen, meist quartären, Schotter in diesem weitestgehend reliefarmen Naturraum liegen die Direktabflüsse um 34 % unter denen der Naturräume „Pellenz“ und „Mainzer Becken und Wetterau“. Ein ähnliches Bild, mit vergleichsweise sehr niedrigen Direktabflüssen, zeigt sich auch im Naturraum „Fränkische Alb“. Trotz mittlerer Niederschläge von 801 mm/a werden nur 87 mm/a über den Direktabfluss an den Vorfluter abgegeben, der wesentliche Anteil des effektiven Niederschlags verbleibt somit als Grundwasserneubildung in dem zu einem hohen Grad verkarsteten und damit durch hohe hydraulische Leitfähigkeiten gekennzeichnetem Naturraum. Ebenfalls geringe Direktabflüsse (89 mm/a), bei hohen mittleren jährlichen Niederschlägen von 884 mm/a, prägen den Naturraum „Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“. Die hier vorherrschenden quartären Schotter weisen eine hohe Infiltrationskapazität auf, so dass nur geringe Anteile des Niederschlags den Vorflutern über den Direktabfluss zugeführt werden.

Das umgekehrte Bild zeigt sich im Naturraum „Rheinisches Schiefergebirge“. Trotz eines rund 25 % geringeren Niederschlags wie im Naturraum „Moränenland“ treten hier mit 229 mm/a vergleichbare Direktabflusshöhen auf. Auf Grund der geringmächtigen Böden sowie den niedrigen hydraulischen Leitfähigkeiten wird im „Rheinischen Schiefergebirge“ ein Großteil des effektiven Niederschlags über den Direktabfluss den Vorflutern zugeleitet, während im Moränenland der Großteil des effektiven Niederschlags (Gesamtabfluss) über die generell gut leitenden Schotter dem Grundwasser zugeführt wird und somit in geringeren Direktabflüssen resultiert.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Direktabflusshöhe im gesamten Süddeutschen Raum zwischen 1951-2010, so zeigt sich eine deutliche dekadische Variabilität von rund 20 % zwischen den einzelnen Dekaden (Abb. 3.28 und Tab. 3.5). So waren in der Trockendekade 1971-1980 (-19 mm/a oder -10 %) sowie in der Nassdekade 1981-1990 (+19 mm/a oder +10 %) die extremsten Änderungen der Direktabflusshöhe zu beobachten. Bereits auf Basis der Bundesländer zeigen sich noch stärkere heterogene Direktabflussdynamiken über die Zeit. Während die maximalen Änderungen in Bayern unter dem süddeutschen Mittel liegen, treten in Baden-Württemberg mit 21 % ähnliche Werte wie in Süddeutschland auf, wohingegen in Rheinland-Pfalz und insbesondere Hessen deutliche Schwankungen von bis zu 35 % zwischen den Dekaden simuliert werden. Einzelne Naturräume können noch einmal ausgeprägtere Bandbreiten zwischen den beiden Extremdekaden aufweisen (jeweils 43 % im „Lahn-Dill-Gebiet“ und „Taunus“).

Tab. 3.5: Mittlere Direktabflusshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm/a und %.

Direktabflusshöhe [mm/a]					
Zeitraum	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	194	214	204	149	173
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-13 / -7.0	-14 / -6.5	-11 / -5.5	-11 / -7.4	-22 / -12.9
1961-1970	11 / 6.2	13 / 6.1	8 / 4.0	19 / 12.7	11 / 6.6
1971-1980	-19 / -10.1	-20 / -9.6	-14 / -7.0	-27 / -18.3	-23 / -13.1
1981-1990	19 / 10.0	24 / 11.1	10 / 5.0	24 / 16.2	33 / 19.1
1991-2000	5 / 2.5	4 / 1.6	6 / 3.0	-1 / -0.5	10 / 5.7
2001-2010	-3 / -1.6	-6 / -1.4	1 / 0.5	-4 / -2.8	-9 / -5.3
2011-2015	-30 / -15.7	-26 / -12.1	-29 / 14.3	-34 / -22.8	-33 / -19.0

Entsprechend der Gesamtabflusshöhe reagiert auch die Direktabflusshöhe stark sensitiv auf Änderungen der anderen Bilanzkomponenten. Dies wird neben der Darstellung der Dekadenwerte insbesondere bei der Darstellung der Jahreswerte deutlich (Abb. 3.29). So beträgt die Differenz zwischen den beiden Extremjahren 2002 (319 mm) und 2003 (129 mm) in Bayern 60 % (Baden-Württemberg 60 %, Hessen 56 % und Rheinland-Pfalz 51 %).

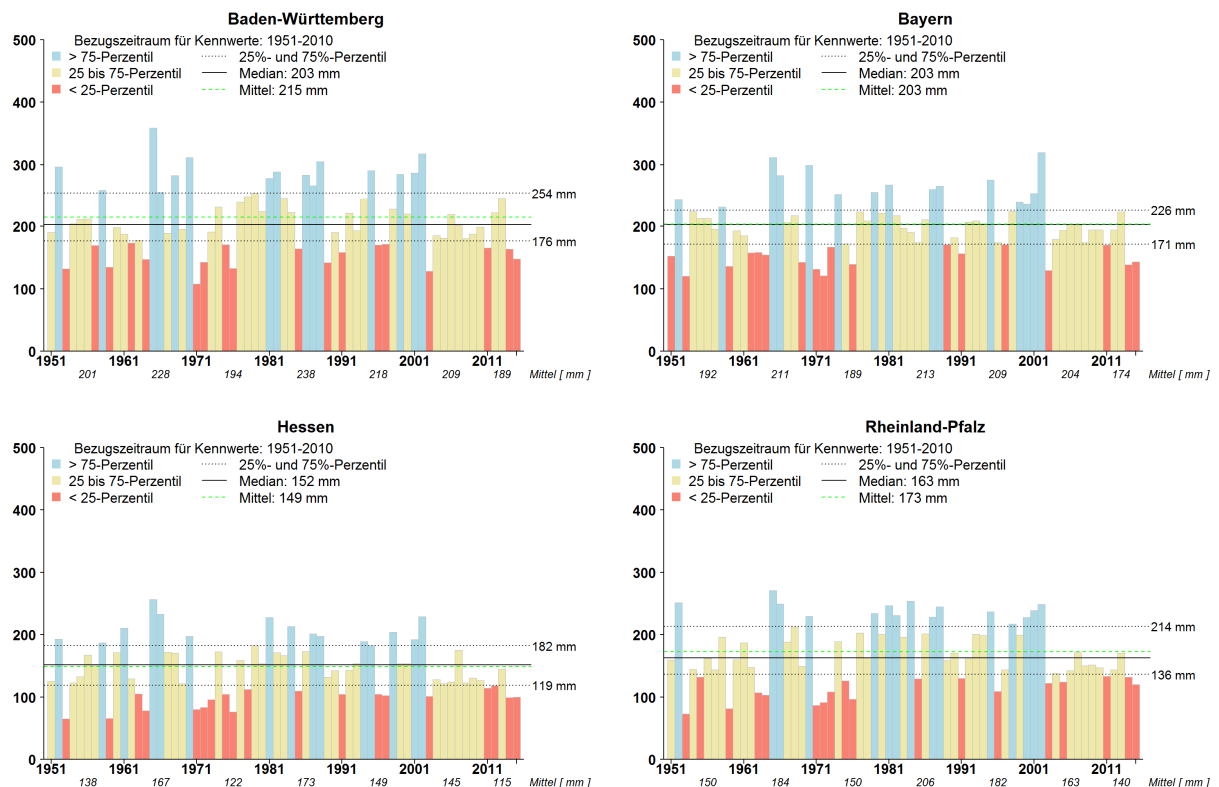


Abb. 3.29: Entwicklung der jährlichen Direktabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.

Analog dem beschriebenen Änderungssignal für den Gesamtabfluss bildete sich für den Direktabfluss in der vergangenen Dekade 2001-2010 mit einem erkennbaren West-Ost Gradient ein im Wesentlichen ähnliches Änderungssignal auf Basis der Naturräume aus (Abb. 3.24). Demnach nahmen in den nordwestlichen Naturräumen von Rheinland-Pfalz (-16 mm in der „Nordwesteifel“ und -15 mm im „Rheinischen Schiefergebirge“) sowie dem im Westen von Hessen gelegenen Naturraum „Taunus“ (-20 mm) und im westlichen Baden-



Württemberg gelegenen Naturraum „Schwarzwald“ (-28 mm) die Direktabflüsse am deutlichsten ab. Demgegenüber sind die stärksten Zunahmen der Direktabflusshöhe in den nördlichen Naturräumen Bayerns zu verzeichnen (+16 mm im „Fränkischen Keuper-Lias-Land“, +19 mm im „Bruchschollenland“ und +18 mm im „Ostbayerischen Kristallin“).

Zusätzlich zum beschriebenen West-Ost Gradienten bildete sich innerhalb Bayerns wieder der bereits für den Gesamtabfluss beschriebene Nord-Süd Gradient im Änderungssignal aus. Dieser charakterisiert neben den bereits genannten Zunahmen in den nördlichen Naturräumen geringe Abnahmen (-3 mm) in den „Fluvioglazialen Schottern der Flusstäler“, deutliche Abnahmen im „Moränenland“ (-19 mm) sowie den stärksten Rückgang der Direktabflüsse im Bereich der „Nordalpen“ (-38 mm).

Da im Zeitraum 2011-2015 die Niederschlagsmenge gegenüber dem Gesamtzeitraum deutlich zurückgegangen und die tatsächliche Verdunstung in den letzten fünf Jahren nahezu unverändert geblieben ist, reduzierte sich der Direktabfluss spürbar (-30 mm). Der Rückgang ist in den niederschlagsärmeren Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen ausgeprägter (-19% bzw. -23%) als in den niederschlagsreicheren Bundesländern Baden Württemberg und Bayern (-12% bzw. -14%).

Analog zur Gesamtabflusshöhe zeigt die statistische Auswertung anhand des Mann-Kendall-Trendtest in allen Bundesländern keinen einheitlichen Trend bei der zeitlichen Entwicklung der Direktabflusshöhe auf Kalenderjahrbasis (Abb. 3.30). In Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz erfolgte vorübergehend eine Zunahme der Direktabflusshöhe während der feuchten 1980er Jahre. In Hessen und Rheinland-Pfalz zeigt sich ab dem Jahr 2010 eine deutliche Abnahme.

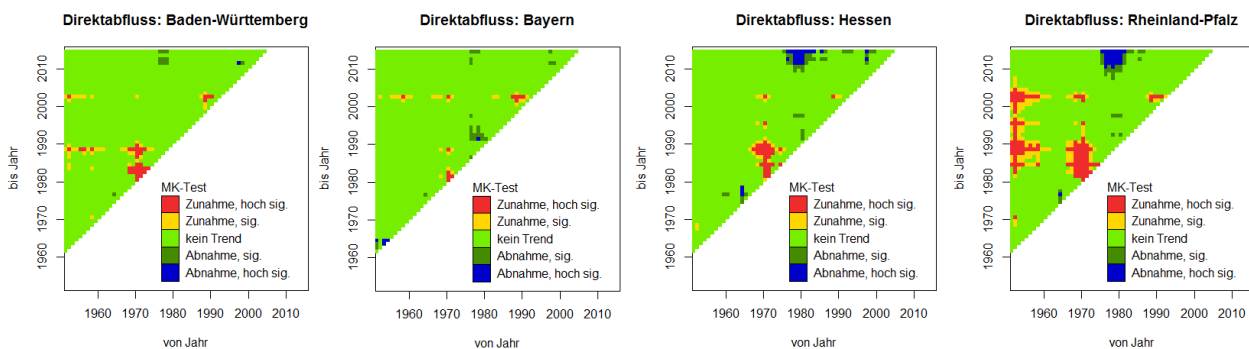


Abb. 3.30: Trenddreiecke für die Direktabflusshöhe im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.

3.2.7 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Die Grundwasserneubildung ist wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung und ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen. Als meist kleinste Bilanzgröße reagiert die Grundwasserneubildung aus Niederschlag besonders empfindlich auf Änderungen aller weiterer Wasserbilanzgrößen. Im vorliegenden Fall wurde auf Grundlage der mit GWN-BW simulierten Sickerwasserrate (bzw. des Gesamtabflusses) die Grundwasserneubildung aus Niederschlag berechnet. Hierbei dient der regionalisierte BFI (Baseflow-Index) zur Berücksichtigung der schnellen lateralen Abflusskomponenten (KLIWA 2012). Die betrachtete Grundwasserneubildung ist (damit) nicht gleichbedeutend mit dem regional verfügbaren Grundwasserdargebot, das zusätzlich von weiteren Faktoren, wie z.B. der Ergiebigkeit des Grundwasservorkommens beeinflusst wird. Aus methodischen Gründen kann die Grundwasserneubildung nur in Bezug auf vieljährige Mittelwerte ausgewertet werden. Deshalb wird, analog zum Direktabfluss, in diesem Kapitel auf eine Darstellung der innerjährlichen Änderungen (Ringdiagramme) verzichtet.

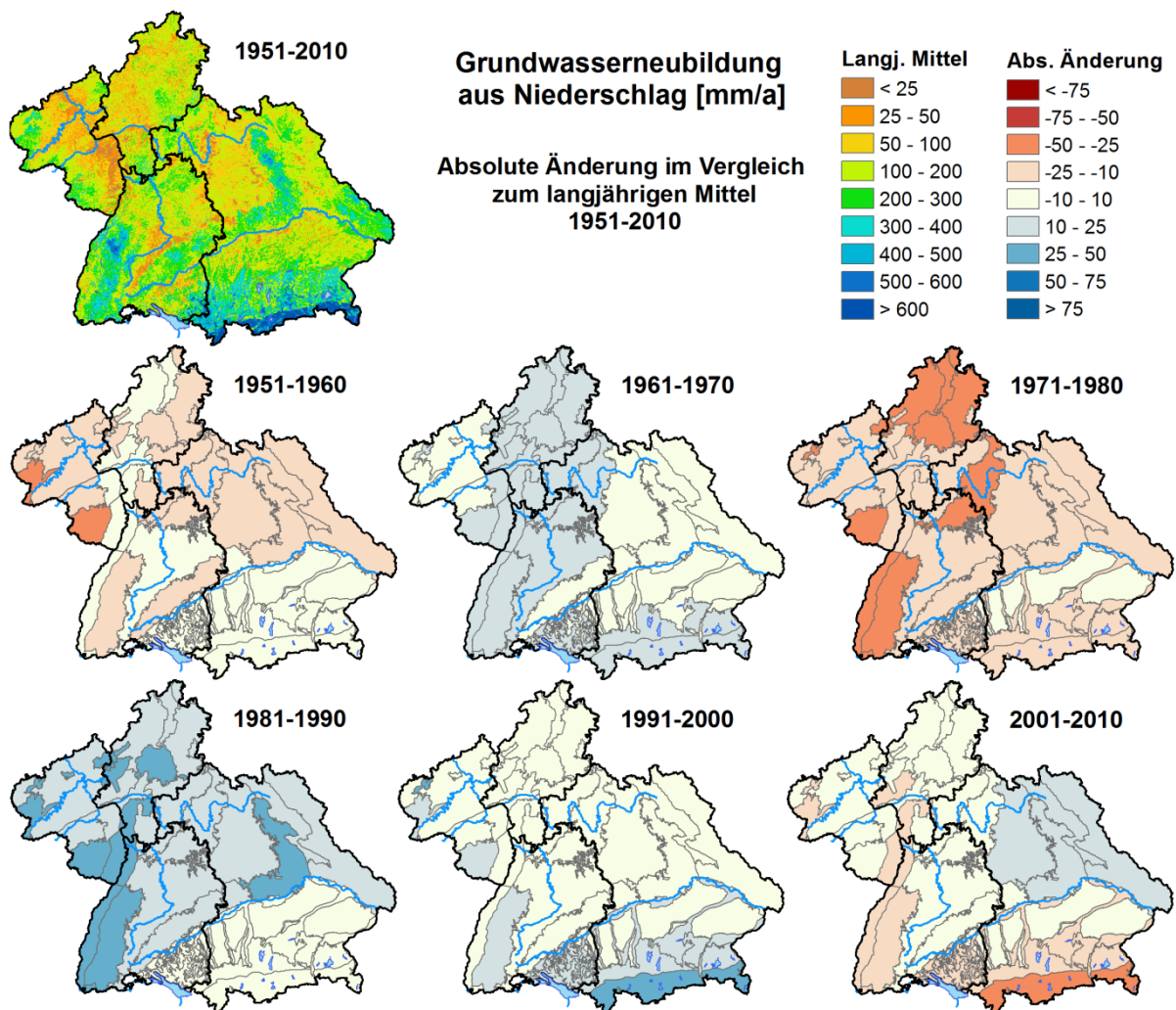


Abb. 3.31: Mittlere jährliche Grundwasserneubildungshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.

Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung über alle vier Bundesländer (Süddeutschland) im 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 beträgt 174 mm/a. Somit verbleiben im gesamten Süddeutschen Raum im Mittel lediglich ca. 20 % der jährlichen Gesamtniederschlagshöhe für die Regeneration der Grundwasservorräte.

Die Grundwasserneubildung variiert zwischen 206 mm/a in Bayern, 187 mm/a in Baden-Württemberg sowie 113 mm/a in Hessen und 104 mm/a in Rheinland-Pfalz (Tab. 3.6). Im



Mittel beträgt der Unterschied zwischen den niederschlagsreicheren Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und den trockeneren Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen somit 45 %.

Analog dem Direktabfluss beeinflussen in den einzelnen Naturräumen die regionalen klimatischen Verhältnisse die Grundwasserneubildung deutlich (Abb. 3.31). So zeichnen sich beispielsweise die niederschlagsreichen „Nordalpen“ (505 mm/a) und das „Moränenland“ (225 mm/a) sowie die Mittelgebirgsregionen der Eifel (260 mm/a in der „Nordwesteifel“ und 201 mm/a in der „Südwesteifel“) und der „Schwarzwald“ (284 mm) durch hohe Grundwasserneubildungsraten aus. Dem stehen viele Naturräume (meist in Hessen und Rheinland-Pfalz) gegenüber, die niederschlags- und verdunstungsbedingt eine nur sehr geringe Grundwasserneubildung aufweisen. Als Extrembeispiele sind hier insbesondere die Naturräume „Taunus“ und „Nördlicher Oberrheingraben“ (73-74 mm/a) sowie „Mainzer Becken und Wetterau“ (46 mm/a) zu nennen.

Regional sind auch neubildungsrelevante Effekte von Boden, Landnutzung, Relief und der hydrogeologischen Gegebenheiten erkennbar. Als Beispiel sei auf die zu einem hohen Grad verkarsteten Naturräume „Fränkische Alb“ (257 mm/a) und „Schwäbische Alb“ (209 mm/a) hingewiesen. Diese Naturräume heben sich trotz ähnlicher Niederschläge vom jeweils nordwestlich liegenden Fränkischen bzw. Schwäbischen Keuper-Lias Land mit den dort vorherrschenden geringeren Grundwasserneubildungsraten von 100 - 130 mm/a deutlich ab. Auch das „Rheinische Schiefergebirge“ weist, trotz ähnlich hoher jährlicher Niederschläge wie in den Naturräumen der Eifel („Südwesteifel“ und „Nordwesteifel“), vergleichsweise niedrige Neubildungshöhen von 90 mm/a auf. Der Grund hierfür liegt in den ungünstigen Speichereigenschaften des anstehenden Schiefergesteins, welche durch niedrige BFI-Werte für diesen Naturraum abgebildet werden. Die genannten Beispiele veranschaulichen, in welcher Weise, je nach Standort, die Bilanzkomponente „Grundwasserneubildung“ von Niederschlag, Verdunstung und schnellen Abflusskomponenten (Direktabfluss) in unterschiedlichem Maße beeinflusst wird.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildungshöhe im Süddeutschen Raum, so zeigt sich eine deutliche dekadische Variabilität von bis zu 23 % beim Vergleich zwischen den einzelnen Dekaden (Abb. 3.31 und Tab. 3.6). So sind, beim Vergleich der Trockendekade 1971-1980 (-18 mm/a oder -11.4 %) mit der Nassdekade 1981-1990 (+17 mm/a oder +11.5 %) ausgeprägte Unterschiede der Grundwasserneubildungsmenge zu beobachten.

Bereits auf Basis der einzelnen Bundesländer zeigen sich deutlichere Grundwasserneubildungsdynamiken über die Zeit. Während die maximalen Änderungen in Bayern mit 11 % unter dem süddeutschen Mittel liegen, treten in Baden-Württemberg mit 18 % ähnliche Werte wie für Süddeutschland auf, wohingegen in Rheinland-Pfalz und insbesondere Hessen sehr hohe Schwankungen von bis zu 43 % zwischen den Dekaden simuliert werden. Einzelne Naturräume weisen noch stärkere Schwankungen zwischen den beiden Extremdekaden auf (54 % im „Mainzer Becken und Wetterau“, 56 % im „Taunus“, 59 % im „Lahn-Dill-Gebiet“ und 66 % im „Nördlichen Oberrheingraben“).

Tab. 3.6: Mittlere Grundwasserneubildungshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm/a und %.

Grundwasserneubildung aus Niederschlag [mm/a]					
Zeitraum	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	174	187	206	109	104
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-12 / -7.3	-12 / -6.4	-11 / -5.2	-9 / -8.2	-17 / -15.9
1961-1970	11 / 7.3	13 / 6.9	8 / 3.8	20 / 18.6	10 / 9.3
1971-1980	-18 / -11.4	-20 / -10.7	-14 / -7.0	-26 / -23.8	-17 / -15.9
1981-1990	17 / 11.5	23 / 12.5	11 / 5.5	22 / 20.5	23 / 22.5
1991-2000	4 / 2.5	4 / 1.9	6 / 2.9	-2 / -2.0	8 / 7.3
2001-2010	-4 / -3	-8 / -4.2	0 / 0.0	-6 / -5.1	-7 / -7.1
2011-2015	-30 / -18.4	-26 / -13.9	-33 / -16.0	-33 / -30.3	-23 / -22.1

Von allen Bilanzgrößen reagiert die Grundwasserneubildung aus Niederschlag am sensitivsten auf Änderungen der anderen Wasserhaushaltskomponenten. Dies wird neben der Darstellung der Dekadenwerte insbesondere bei der Darstellung der Jahreswerte deutlich (Abb. 3.32). So beträgt die Differenz zwischen den beiden Extremjahren 2002 (336 mm) und 2003 (121 mm) in Bayern 64 % (Baden-Württemberg 65 %, Hessen 69 % und Rheinland-Pfalz 57 %).

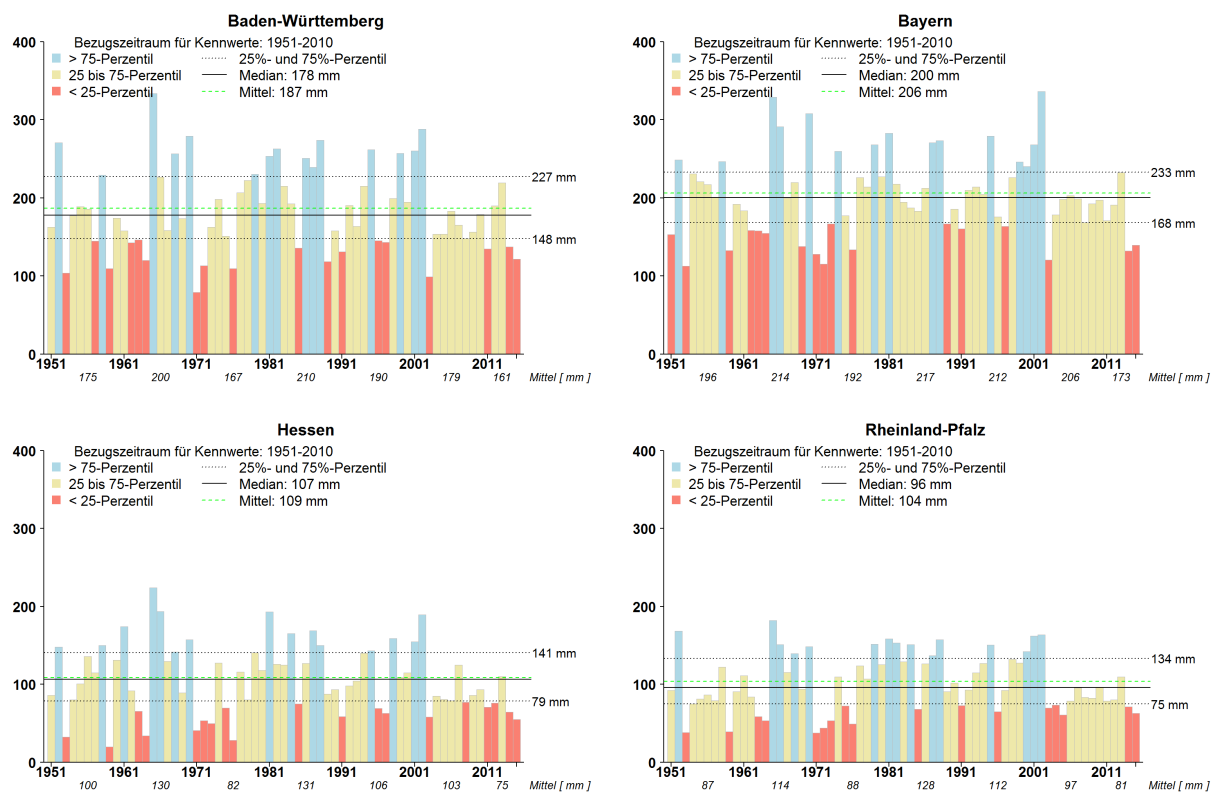


Abb. 3.32: Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.

Analog dem beschriebenen Änderungssignal für den Niederschlag, und den daraus resultierenden Gesamt- und Direktabflüssen, bildete sich in der vergangenen Dekade 2001-2010 im Wesentlichen ein ähnliches Änderungssignal der Grundwasserneubildungshöhen auf Basis der Naturräume aus (Abb. 3.31). Auf Grund der unterschiedlichen Gewichtung des Gesamtabflusses, durch die Berücksichtigung des regionalisierten BFI, als Ausgangsgröße für die



Berechnung der Grundwasserneubildungshöhe kann dieses aber für einzelne Naturräume abweichen. Somit zeigt sich überwiegend ein Rückgang der Grundwasserneubildung in den Naturräumen um -1 mm bis -26 mm, jedoch ist der zuvor beschriebene West-Ost Gradient kaum ausgebildet. Die deutlichsten Rückgänge treten vor allem in den südlichen Naturräumen auf (-26 mm in den „Nordalpen“, -22 mm im „Moränenland“ und -21 mm im „Schwarzwald“). Eine Ausnahme bildet hier mit -22 mm die „Nordwesteifel“. Auf Grund der Grundwasserneubildungszunahmen in den nördlichen Naturräumen Bayerns (von +11 mm im „Fränkischen Keuper-Lias-Land“ bis zu +25 mm in der „Fränkischen Alb“) bildet sich der bereits für den Gesamtabfluss beschriebene Nord-Süd Gradient innerhalb Bayerns weiterhin ab.

Die unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen während der Winterhalbjahre im Zeitraum 2011-2015 gegenüber dem Gesamtzeitraum führten in den letzten fünf Jahren zu einem deutlichen Rückgang der Grundwasserneubildung im Modellgebiet. Der Rückgang der Neubildung um durchschnittlich -30 mm zeigt sich in den grundwasserärmeren Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen dramatischer (-22% bzw. -30%) als in den südlichen Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern (-14% bzw. -16%).

Analog zur Gesamt- und Direktabflusshöhe zeigt die statistische Auswertung anhand des Mann-Kendall-Trendtest in allen Bundesländern keinen einheitlichen Trend bei der zeitlichen Entwicklung der Grundwasserneubildung (Abb. 3.33). In Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz erfolgte vorübergehend eine der Grundwasserneubildung während der feuchten 1980er Jahre. Insbesondere in Hessen und Rheinland-Pfalz, aber auch zu einem geringeren Grad in Baden-Württemberg und Bayern, sind im Laufe der letzten Jahre (2010-2015) abnehmende Grundwasserneubildungsraten gegenüber den neubildungsreichen 1980er Jahren zu verzeichnen.

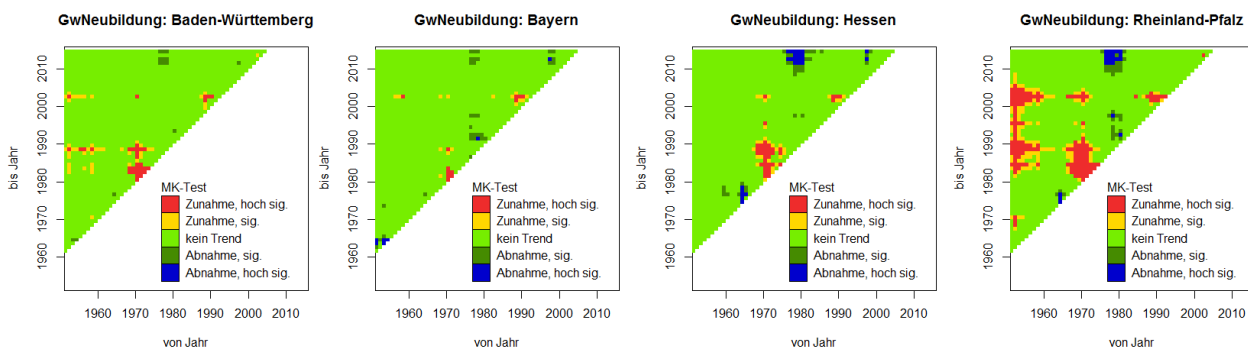


Abb. 3.33: Trenddreiecke für die Grundwasserneubildung im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.

Vergleich der simulierten Grundwasserneubildung mit gemessenen Grundwasserständen an ausgesuchten Messstellen

Der Vergleich der mit GWN-BW simulierten zeitlichen Dynamik der Grundwasserneubildung gegen gemessene Grundwasserstände sowie Quellschüttungen stellt in erster Linie ein qualitatives Maß für die Validierung der Modellergebnisse dar (Abb. 3.34).

Die ausgewählten Grundwassermessstellen (GWM) liegen in Bereichen die durch BFI Werte nahe 1 charakterisiert sind. Somit entspricht die simulierte Sickerwasserrate im Wesentlichen der Grundwasserneubildung, weshalb im weiteren Verlauf des Abschnitts ausschließlich auf die Grundwasserneubildung Bezug genommen wird. Die berechnete lokale Grundwasserneubildungsrate im Umfeld der jeweiligen Grundwassermessstelle (GWM) bzw. Quelle basiert dabei, wie bereits zu Beginn von Kap. 3.2 erwähnt, auf der Modellvariante mit REGNIE-Niederschlag. Sie beschreibt im Wesentlichen den vertikalen Weg des Niederschlags von der Oberfläche in den Boden und damit in den darunterliegenden Grundwasserkörper.

Des Weiteren weisen die GWM relativ geringe Flurabstände auf und sind in ihrer Dynamik nicht, oder nur kaum, durch Störungen (z.B. Entnahmen, Gewässer) beeinflusst. Das heißt, es wirkt erkennbarer Weise kein weiterer Einflussfaktor in der näheren Umgebung der GWM mit, der die Dynamik der Grundwasserstände / Quellschüttungen neben der lokalen Grundwasserneubildung bestimmt. Nicht berücksichtigt werden im dargestellten Vergleich abweichende Neubildungsraten bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen in oberstromigen Bereichen der untersuchten GWM. Das bedeutet, Signale aus diesen Bereichen des Einzugsgebietes können die lokale Neubildung überlagern, was zu einer abweichenden Reaktion der beobachteten Grundwasserstände im Vergleich zu den simulierten Eintragsmengen führen kann und somit durch die simulierten Grundwasserneubildungsraten nicht erklärt wird.

Auf Grund der Tatsache, dass die größten Neubildungsraten in den Wintermonaten auftreten, die Messstellen aber oftmals verzögert sowie gedämpft auf Neubildungsereignisse reagieren, erfolgt die Darstellung anhand des Jahresmittels des hydrologischen Jahres (1. November bis 31. Oktober). Insgesamt ergibt sich ein durchweg enger Zusammenhang zwischen simulierter Sickerwasserrate der Einzeljahre und dem beobachtetem Grundwasserstand bzw. der Quellschüttung.

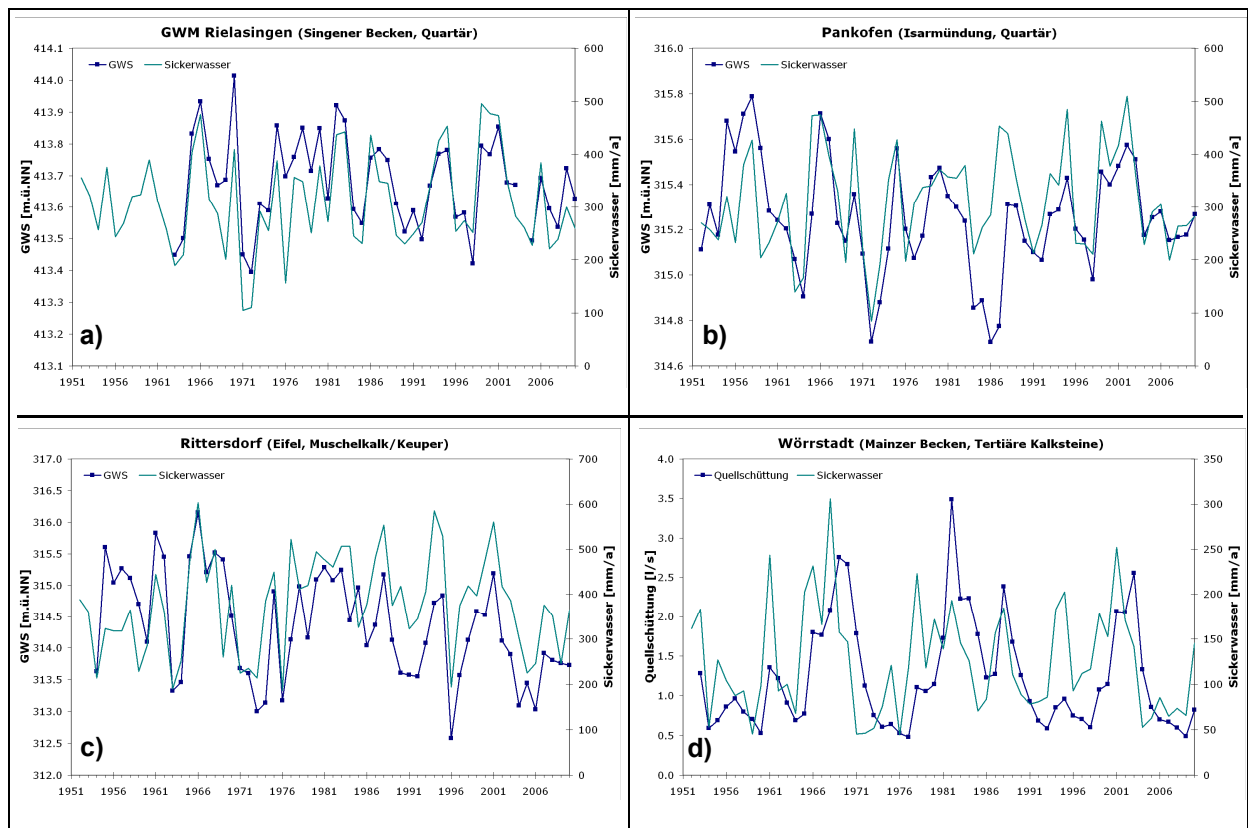


Abb. 3.34: Beispiel für den Abgleich zwischen simulierter Grundwasserneubildung (Sickerwasserrate) [mm/a] und Grundwasserstand [m NN] bzw. Quellschüttung [l/s]. Dargestellt sind die GWM Rielasingen (a) die GWM Pankofen (b), die GWM Rittersdorf (c) sowie die Quelle Wörrstadt (d).

Für die GWM Rielasingen (Abb. 3.34 a) im Süden Baden-Württembergs zeigt sich ein sehr enger Zusammenhang zwischen simulierter Grundwasserneubildungsraten und dem beobachtetem Grundwasserstand. Lediglich in den Jahren 1969, 1976 und 1979 fällt der Grundwasserstand weniger deutlich ab, als anhand der geringen Neubildungsraten zu erwarten wäre.

Die GWM Pankofen (Abb. 3.34 b) im Osten Bayerns ist ebenfalls durch einen sehr engen Zusammenhang zwischen der simulierten Neubildungsraten sowie dem beobachtetem Grund-



wasserstand charakterisiert. Abweichend von den Neubildungsraten treten hohe Grundwasserstände in den eher trockenen 1950er Jahren sowie deutlich abfallende Grundwasserstände in der Nassperiode Mitte der 1980er Jahre auf.

Die GWM Rittersdorf (Abb. 3.34 c) im Westen von Rheinland-Pfalz zeigt ebenfalls einen engen Zusammenhang zwischen der simulierten Grundwasserneubildungsrate sowie dem beobachteten Grundwasserstand. Seit Beginn der 1970er Jahre bis 2010 sind hier absinkende Grundwasserstände zu beobachten, welche durch die simulierten Neubildungen gut abgebildet werden.

Abweichend zu den betrachteten GWM, weist die Ganglinie der Quelle Wörrstadt (Abb. 3.34 d) im Osten von Rheinland-Pfalz eine stark verzögerte Reaktion von 2 bis 4 Jahren auf die simulierten Grundwasserneubildungsraten auf. Demnach resultieren einzelne feuchtere Jahre (1974) in einem nur sehr geringen Anstieg der Quellschüttungen. Gut erkennbar ist aber das Verhalten auf langjährige Signale. Während der Trockenperioden 1951-1960 und 1971-1980 treten überwiegend geringe mittlere jährliche Quellschüttungen ≤ 1 l/s auf, während in der Nassperiode 1981-1990 mittlere jährliche Quellschüttungen ≥ 1.5 l/s auftraten (max. 3.5 l/s).

Insgesamt wird die Dynamik der gemessenen Grundwasserstände durch die simulierten Neubildungsraten in der unmittelbaren Umgebung der Messstellen gut wiedergegeben (Abb. 3.34 a – 3.34 c). Die mit GWN-BW simulierten Ergebnisse der Grundwasserneubildungsrate entsprechen damit im Wesentlichen den lokalen Sickerwassermengen. Als Rückschluss daraus geben die weiteren simulierten Wasserhaushaltsgrößen, wie die tatsächliche Verdunstung, welche auf Grund der hohen lokalen Baseflow-Index Werte im Bereich der Messstellen im Wesentlichen direkt in die Berechnung der Grundwasserneubildungsrate (und damit der lokalen Sickerwasserrate) eingeht, die realen Verdunstungsmengen offensichtlich gut wieder.

Die verzögerte Reaktion zwischen Quellschüttung und Grundwasserneubildung (Abb. 3.34 d) kann, aufgrund von lokalen geologischen Bedingungen, beispielsweise durch verzögerte Fließwege von Sickerwasser über den lokalen Grundwasserleiter bis zum Quellaustritt, begründet sein.

3.2.7 Trockenheitsindex

Der Trockenheitsindex nach WaBoA (2007) wird definiert als die Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers ($< 30\%$ der nutzbaren Feldkapazität). Er wird maßgeblich durch die standortabhängige Größe des Bodenwasserspeichers in Verbindung mit der Menge des für die Befüllung zur Verfügung stehenden Niederschlagswassers beeinflusst. Das bedeutet, dass vergleichsweise niederschlagsarme Regionen nur dann keine hohen Werte für den Trockenheitsindex zeigen, wenn hier ein ausreichend großer Bodenspeicher zur Verfügung steht. Umgekehrt treten in niederschlagsreichen Regionen nur dann geringe Werte auf, wenn besonders geringmächtige, also wenig speicherfähige, Böden zur Verfügung stehen. Genau diese räumliche Differenzierung wird im Gesamttraum bzw. in den Naturräumen deutlich (Abb. 3.35).

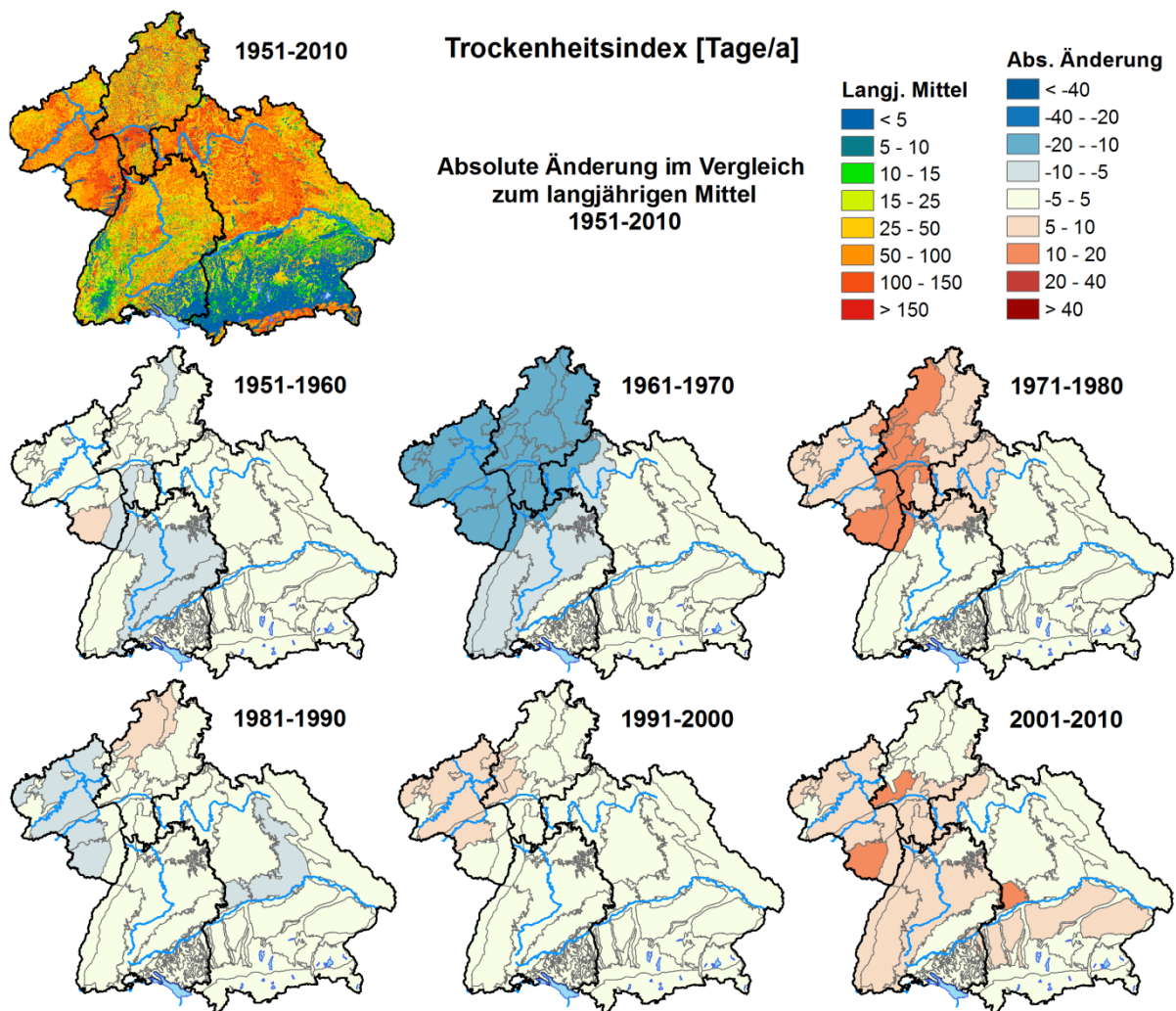


Abb. 3.35: Mittlerer jährlicher Trockenheitsindex und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in Tage/a.

Während im Lockergesteinsbereich südlich der Donau sowie im Schwarzwald und im Bayerischen Wald der Trockenheitsindex an nur wenigen Tagen im Jahr unterschritten wird, weichen viele Naturräume in den mittleren sowie nordwestlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes mit Überschreitungen von > 70 Tagen/a deutlich davon ab. So ergeben sich große regionale Unterschiede von etwa 0 bis zu 80 Tagen/a und mehr an denen der Trockenheitsindex unterschritten wird, wobei meteorologisch bedingt zwischen einzelnen Jahren erhebliche Unterschiede bestehen können (Abb. 3.36). Im 60-jährigen Mittel wird in Rheinland Pfalz der Schwellenwert an etwa 11 Wochen pro Jahr unterschritten, in Hessen an etwa 8 Wochen pro Jahr und in Baden-Württemberg und Bayern zwischen 6 und 7 Wochen pro



Jahr. Erwartungsgemäß sind im Jahresverlauf die Sommermonate besonders auffällig (mehr als 90 % der betroffenen Tage). In allen Bundesländern sind die Monate Juli und August am trockensten (Abb. 3.37). In diesen Monaten wird der Schwellenwert in Baden-Württemberg und Bayern an ca. 30 % der Tage unterschritten, in Hessen an ca. 40 % und in Rheinland-Pfalz an mehr als 50 % der Tage. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die vegetations- und einstrahlungsbedingt hohen Verdunstungsraten bei gleichzeitig geringen Niederschlägen, was zu einer zügigen Entleerung auch gut gefüllter Bodenwasserspeicher führt.

Der mittlere jährliche Trockenheitsindex über alle vier Bundesländer im 60-jährigen Zeitraum 1951-2010 liegt bei 52 Tage/a. Er variiert dabei zwischen 43 Tage/a in Baden-Württemberg, 49 Tage/a in Bayern, 58 Tage/a in Hessen und 76 Tage/a in Rheinland-Pfalz (Tab. 3.7). Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen den niederschlagsreicheren Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und den trockeneren Bundesländern Hessen und Rheinland-Pfalz somit 32 %.

Bei der räumlichen Verteilung des Trockenheitsindex in den Naturräumen zeigt sich neben der Abhängigkeit vom Niederschlagsgeschehen auch der Einfluss der lokalen geologischen Gegebenheiten. So ist ein durchgehender Streifen von West nach Ost in der Mitte des Untersuchungsgebietes der vier Bundesländer zu erkennen, in welchem alle Naturräume einen Trockenheitsindex von ≥ 70 Tage/a aufweisen. Hier variiert der Trockenheitsindex in den Naturräumen von 70 Tage/a („Pellenz“) bis zu 91 Tage/a („Fränkische Alb“) bei mittleren jährlichen Niederschlägen von rund 600 mm/a („Mainzer Becken und Wetterau“) bis zu rund 880 mm/a („Odenwald, Spessart und Rhön“) und bereichsweise erhöhten Jahreslufttemperaturen.

Ein anderes Muster zeigt sich in den südlichen Naturräumen. Hier sind die Anzahl der Trockenheitstage auf Grund hoher Niederschläge, geringerer Lufttemperaturen und meist tiefgründiger Böden am niedrigsten (<30 Tage/a). Hierzu gehören die Naturräume „Moränenland“ (10 Tage/a), „Fluvioglaziale Schotter der Flusstäler“ (13 Tage/a), „Tertiärhügelland und Iller-Lech-Schotterplatten“ (20 Tage/a) und „Schwarzwald“ (29 Tage/a).

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung des Trockenheitsindex im gesamten süddeutschen Raum, so zeigt sich eine deutliche Variabilität von bis zu 16 % beim Vergleich zwischen einzelnen aufeinanderfolgenden Dekaden (Abb. 3.35 und Tab. 3.7). Abweichend zu den bisher beschriebenen Wasserhaushaltsparametern traten beim Trockenheitsindex die größten Differenzen zwischen der feuchten Dekade 1961-1970 (-6.5 Tage/a oder -12 %) und der Trockendekade 1971-1980 (+2.6 Tage/a oder +4 %) auf.

Auf Basis der Bundesländer zeigen sich noch stärkere dekadische Variabilitäten, wenn auch zum Teil innerhalb unterschiedlicher Zeiträume. Mit 9 % deutlich unter dem süddeutschen Mittel treten in Bayern die größten Schwankungen zwischen den Dekaden 1981-1990 und 1991-2000 auf. In Baden-Württemberg (20 %), Hessen (39 %) und Rheinland-Pfalz (32 %) traten diese hingegen zwischen den Dekaden 1961-1970 und 1971-1980 auf. Auffallend ist das starke zeitliche Änderungssignal in den relativ niederschlagsarmen Bundesländern Hessen und Rheinland-Pfalz.

Einzelne Naturräume können noch ausgeprägtere Bandbreiten aufweisen. Die größten Unterschiede treten demnach zwischen den beiden Dekaden 1961-1970 und 1971-1980 im „Westhessischen Bergland“ (48 %), in der „Nordwesteifel“ (49 %), im „Lahn-Dill-Gebiet“ (56 %) und im „Vulkanischen Westerwald“ (67 %) auf.

Seit Beginn der 1990er Jahre nahm die Anzahl der Tage, die den Schwellenwert unterschreiten in nahezu allen Naturräumen und Bundesländern zu. Insgesamt zeigt sich dadurch über den Gesamtzeitraum ein Trend hin zu mehr Tagen im Jahr, an denen der Schwellenwert unterschritten wird. Somit weist der Trockenheitsindex, wie bereits für die tatsächliche Verdunstung beschrieben, auf eine Häufung von trockenen Phasen mit temporärem Wasserstress in der jüngeren Vergangenheit hin.

Tab. 3.7: Mittlerer Trockenheitsindex in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie seine zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in Tage/a und %.

Trockenheitsindex [Tage/a]					
Zeitraum	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	52	43	49	58	76
Absolute [Tage/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-2 / -3.3	-6 / -13.1	1 / 1.6	-3 / -5.5	-1 / -0.8
1961-1970	-6 / -11.6	-6 / -15.0	-2 / -3.9	-14 / -23.6	-15 / -20.0
1971-1980	3 / 4.2	2 / 4.7	-1 / -1.6	9 / 15.6	9 / 11.6
1981-1990	-1 / -1.3	2 / 5.4	-2 / -4.3	1 / 2.4	-5 / -6.9
1991-2000	3 / 4.7	1 / 2.1	2 / 4.7	4 / 7.4	5 / 6.1
2001-2010	4 / 7.5	7 / 16.4	2 / 3.5	2 / 3.4	7 / 9.8
2011-2015	13 / 25.3	16 / 37.3	12 / 23.8	7 / 11.6	18 / 23.5

Auf Jahresbasis (Abb. 3.36) zeigt sich je nach Trocken- oder Nassjahr eine hohe jährliche Variabilität des Trockenheitsindex. So beträgt die Differenz zwischen den beiden Extremjahren 2002 (33 Tage) und 2003 (107 Tage) in Bayern 69 % (in Baden-Württemberg 74 %, in Hessen 68 % und in Rheinland-Pfalz 45 %). Insgesamt ist auch auf Jahresbasis eine Tendenz hin zu einer Zunahme des Trockenheitsindex innerhalb des Gesamtzeitraums zu erkennen. Dieser Effekt kann sowohl durch die beobachteten steigenden jährlichen Verdunstungsraten, insbesondere im Frühjahr und Sommer, sowie durch die bereits in der jüngeren Vergangenheit zu beobachtende geringe Abnahme der sommerlichen Niederschläge erklärt werden.

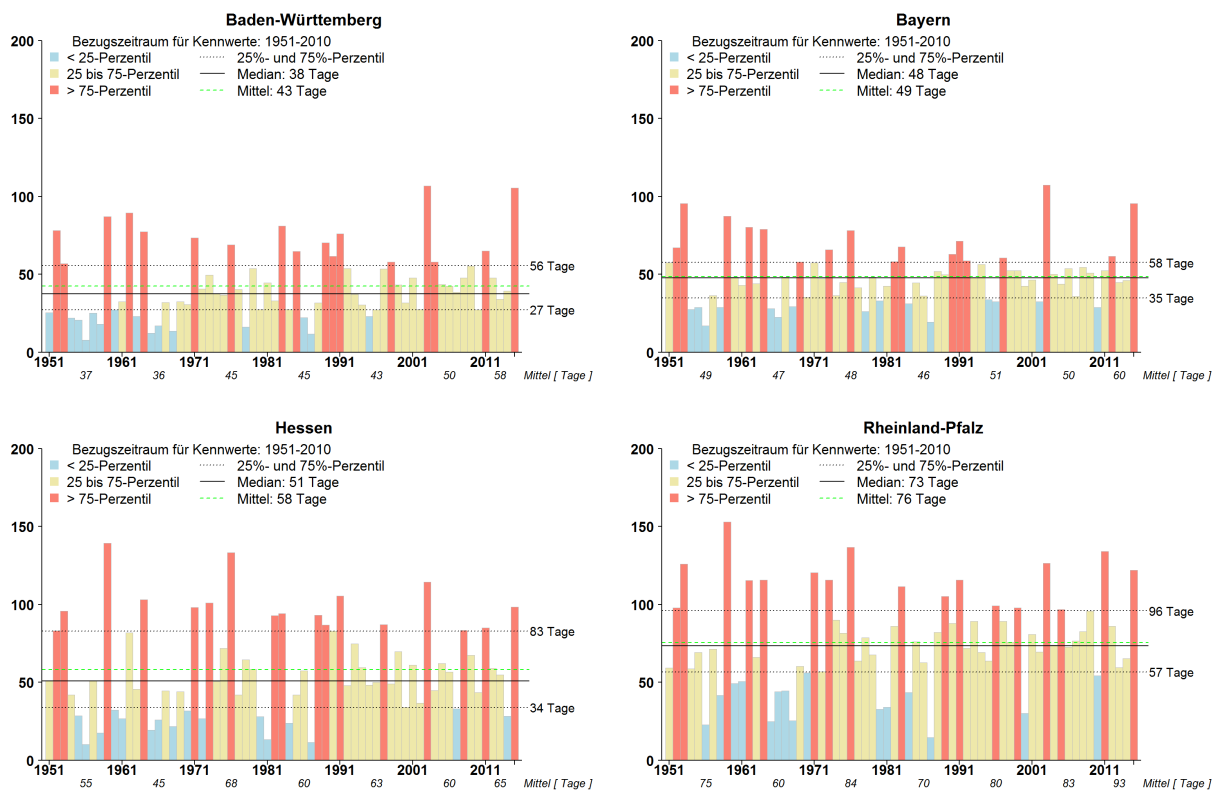


Abb. 3.36: Entwicklung des jährlichen Trockenheitsindex auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in Tage/a.

In der vergangenen Dekade 2001-2010 war im Vergleich zum vieljährigen Mittel in allen Bundesländern und nahezu allen Naturräumen eine Zunahme des Trockenheitsindex wäh-



rend der Sommermonate zu beobachten (Abb. 3.38). Diese Änderungen beruhen vor allem auf den in Kap. 3.2.4 beschriebenen trockeneren Bedingungen während der Monate Juni bis September. Insbesondere im Juli und August wurde im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010 (Abb. 3.37) der Schwellenwert in Baden-Württemberg, Bayern und Hessen an rund 35 – 45 % der Tage unterschritten, in Rheinland-Pfalz sogar an 60 % der Tage.

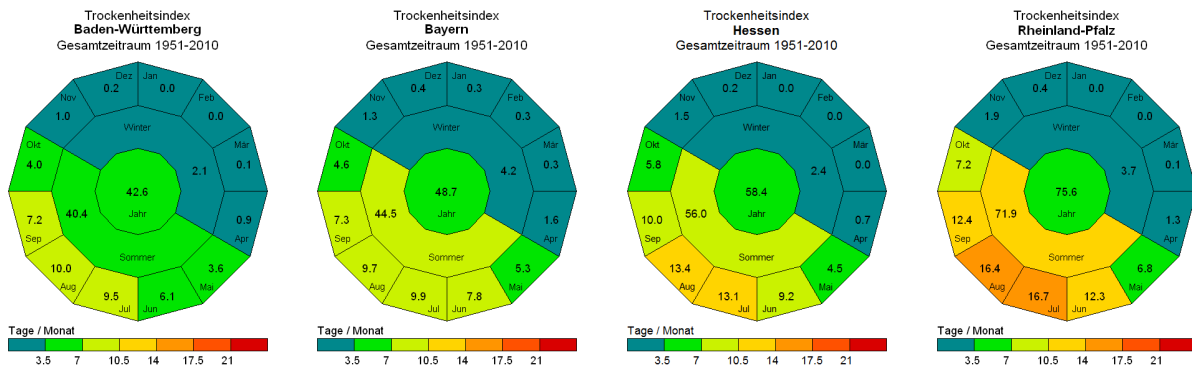


Abb. 3.37: Innerjährliche Verteilung des Trockenheitsindex im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

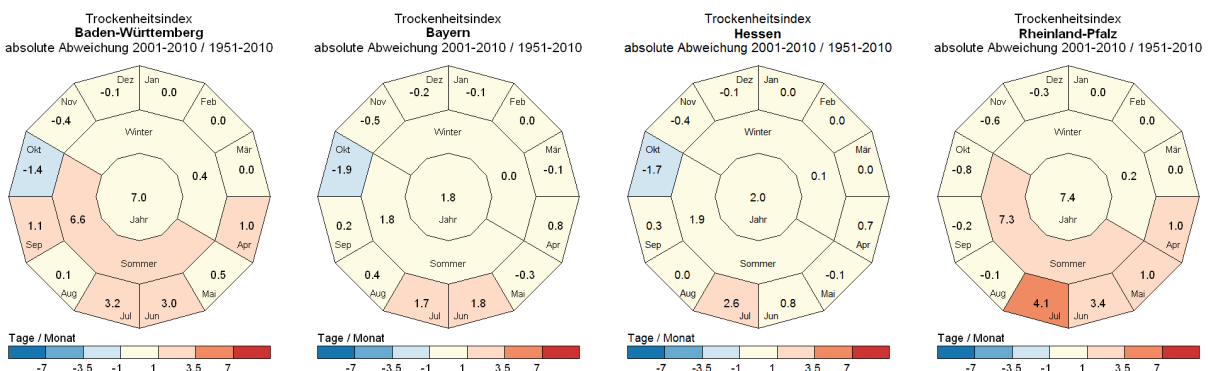


Abb. 3.38: Mittlere innerjährliche absolute Änderung des Trockenheitsindex auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

In der vergangenen Dekade 2001-2010 zeigt sich, auf Basis der Naturräume (Abb. 3.31) der deutlichste Anstieg des Trockenheitsindex in den westlichen Naturräumen (+6 Tage/a im „Rheinischen Schiefergebirge“ bis zu + 13 Tage/a im „Pfälzerwald“). Davon abweichend wird von den weiter östlich gelegenen Naturräumen nur im „Nördlinger Ries“ (+13 Tage/a) und im „Tertiärhügelland und Iller-Lech-Schotterplatten“ (+5 Tage/a) ein Anstieg des Trockenheitsindex beobachtet. Eine geringe Abnahme wird hingegen in den nordöstlich gelegenen Naturräumen Bayerns (-4 Tage/a im „Bruchschollenland“ und -1 Tag/a in der „Fränkischen Alb“) simuliert. Des Weiteren zeigen auch die nordwestlich gelegenen Naturräume Hessens einen geringen Rückgang des Trockenheitsindex (-4 Tage/a „Vulkanischer Westerwald“ und -2 Tage/a „Westhessisches Bergland“).

Im Zeitraum 2011-2015 stieg der Trockenheitsindex zwischen 7 Tage in Hessen bis 18 Tage in Rheinland-Pfalz gegenüber der Periode 1951-2010. Während der überwiegende Anstieg im Sommerhalbjahr zu verzeichnen war, zeigt sich auf Grund der verlängerten Vegetationsperiode ebenfalls eine Zunahme in den Monaten November und April.

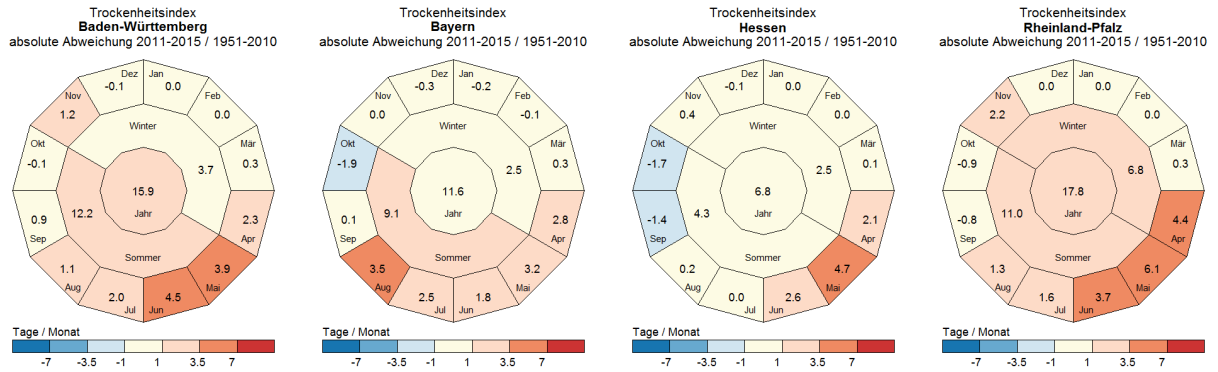


Abb. 3.39: Mittlere innerjährliche absolute Änderung des Trockenheitsindex auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraumes 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Da der Trockenheitsindex in direktem Zusammenhang mit der Menge an pflanzenverfügbarem Wasser in der ungesättigten Bodenzone steht, kann er auch als Maß für den Beregnungsbedarf in landwirtschaftlich intensiv genutzten Bereichen herangezogen werden. Im Zusammenhang mit dem beobachteten Rückgang der Grundwasserneubildung in der letzten Dekade, insbesondere in vielen Naturräumen in Hessen und Rheinland-Pfalz sowie entlang des Oberrheingrabens, ist in diesen Bereichen ein möglichst ressourcenschonender Umgang bei der künstlichen Bewässerung erforderlich.

Beispielsweise im Naturraum „Nördlicher Oberrheingraben“ werden auf Grund des milden Klimas große Flächenanteile intensiv landwirtschaftlich genutzt. Sonderkulturen, wie z. B. der Gemüseanbau mit bis zu drei Ernten im Jahr, erfordern hinsichtlich Quantität und Qualität der Erträge eine optimale Wasserversorgung der Pflanzen über die Bodenfeuchte. Die aktuelle Bodenfeuchte wird in der Regel in Prozent des maximal pflanzenverfügbaren Wassers, d. h. in % der nutzbaren Feldkapazität (% nFK) angegeben. Landwirtschaftliche Kulturen wie Getreide, Körnermais, Zuckerrüben oder Industriegemüse sollen beregnet werden, wenn die Bodenfeuchte unter 40 – 50% des pflanzenverfügbaren Wassers absinkt, d.h. wenn im Boden 40 – 50% der nutzbaren Feldkapazität unterschritten wird. Kulturen mit einem geringen Wasseraneignungsvermögen, z. B. Kopfsalat, Frischgemüse oder Erdbeeren, benötigen bereits bei einem Absinken der Bodenfeuchte unter 60 –70% nFK Zusatzwasser. In diesem Zusammenhang stellt der Trockenheitsindex mit seinem Schwellenwert (< 30% der nutzbaren Feldkapazität) einen Worst-Case-Indikator für den Beregnungsbedarf dar.

Die Untersuchungsergebnisse verdeutlichen dies anschaulich, wenn man berücksichtigt, dass der Trockenheitsindex z.B. im Naturraum „Nördlicher Oberrheingraben“ im vieljährigen Mittel an rd. 80 Tagen, in der Dekade 2001-2010 an rd. 90 Tagen und in einem Trockenjahr, wie z. B. 2003 an rd. 150 Tagen unterschritten wurde. Wasserwirtschaft und Landwirtschaft müssen daher vorsorglich Beregnungspläne erstellen und weiterentwickeln, um den zukünftigen Mehrbedarf an Beregnungswasser nachhaltig bereitstellen zu können.

Der Trockenheitsindex ist vor allem während der Sommermonate relevant. Daher wird die statistische Auswertung anhand des Mann-Kendall-Trendtest für das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai - Oktober) dargestellt (Abb. 3.40). Bei Betrachtung des 60-jährigen Gesamtzeitraumes zeigt sich besonders in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz eine Zunahme bei der zeitlichen Entwicklung des Trockenheitsindex ab Mitte der 1990er Jahre.

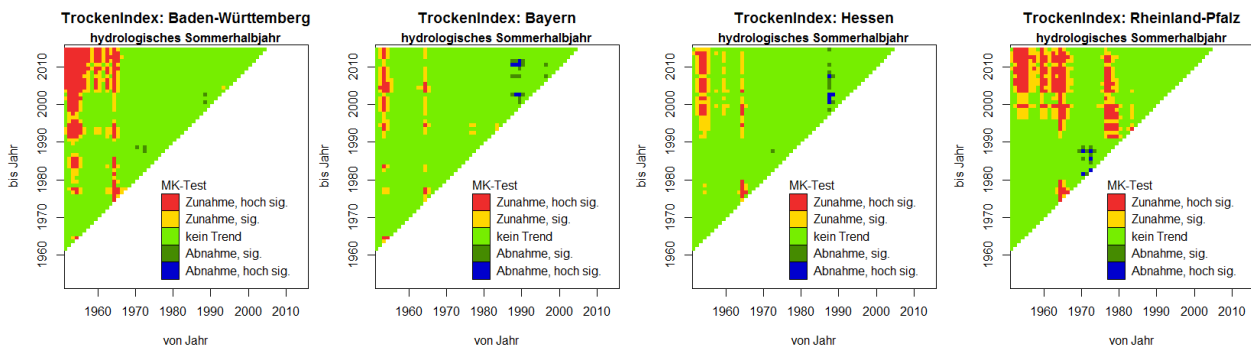


Abb. 3.40: Trenddreiecke für den Trockenheitsindex im Sommerhalbjahr im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.

3.2.8 Wasseräquivalent der Schneedecke

Das Wasseräquivalent der Schneedecke wurde, abweichend von den in Kap. 3.2.1 – 3.2.7 behandelten Wasserbilanz- und Zustandsgrößen, auf Basis der Länder und Naturräume ausgewertet. Hierzu wurde das mittlere Wasseräquivalent der Schneedecke der Monate Januar bis März gebildet, und die zeitliche Entwicklung des Schneespeichers, ergänzend zu den aufgezeigten Tendenzen bei Niederschlag und Temperatur, betrachtet. Der Schneespeicher ist für Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung von besonderer Bedeutung, da sich auf Grundlage des Schneespeichers entscheidet, wann im Jahr das als Schnee gebundene Niederschlagswasser zum Abfluss beiträgt bzw. wann Sickerwasser gebildet wird.

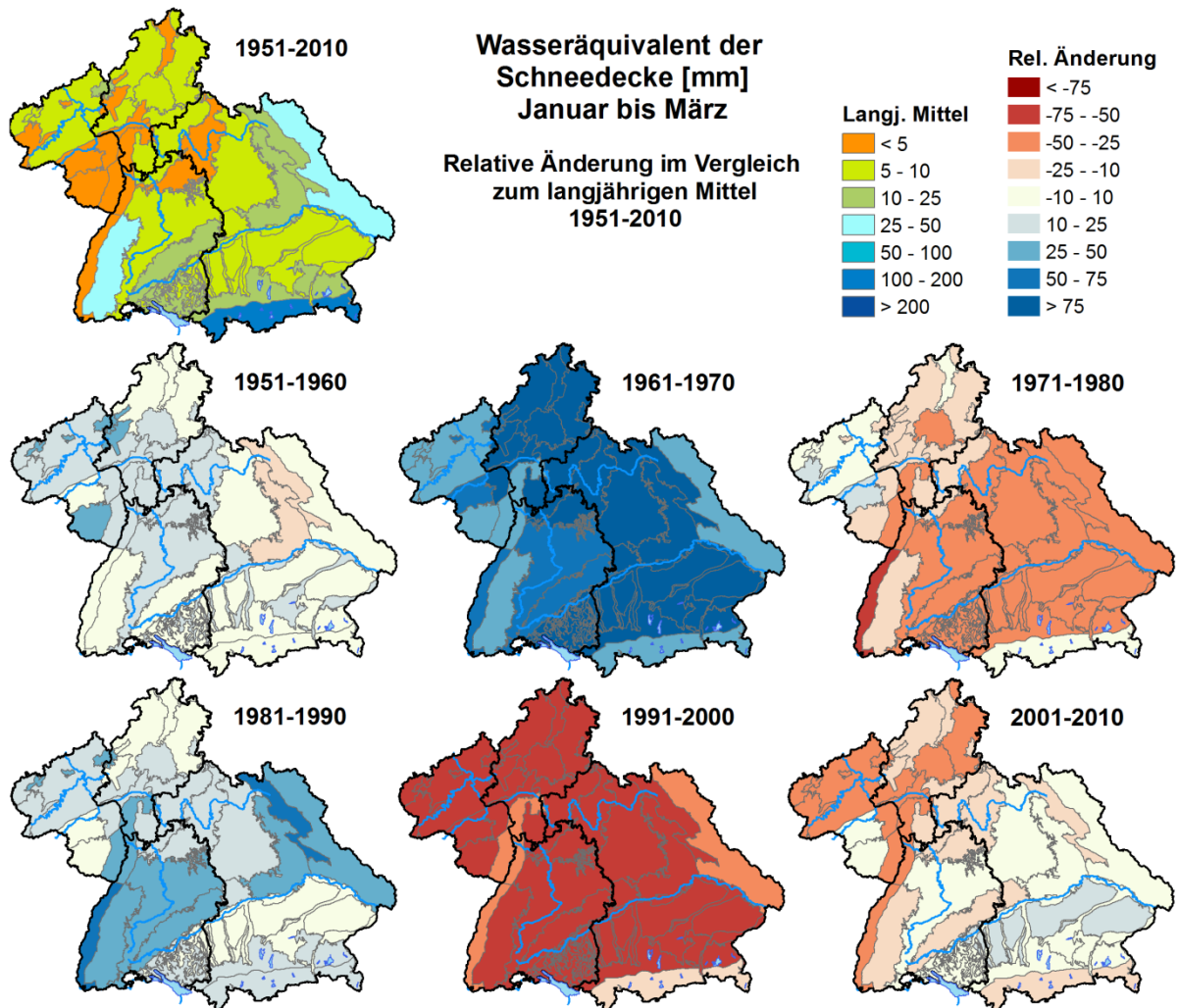


Abb. 3.41: Mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März und relative Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm und %.

Im Mittel betrug das Wasseräquivalent der Schneedecke in den Monaten Januar bis März über alle vier Bundesländer (Süddeutschland) im 60-jährigen Gesamtzeitraum 18 mm. Erwartungsgemäß ist die Schneedecke aber nicht über alle Bundesländer gleichverteilt, sondern war in Bayern mit 26 mm und in Baden-Württemberg mit 15 mm deutlich stärker ausgeprägt als in Hessen mit 7 mm und in Rheinland-Pfalz mit 5 mm (Tab. 3.8). Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen den niederschlagsreicheren und kühleren Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und den wärmeren sowie trockeneren Bundesländern Hessen und Rheinland-Pfalz somit 71 %.



Analog zu Lufttemperatur und Niederschlag zeigt sich auch hier ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Schneedecke und der mittleren topographischen Höhe der einzelnen Naturräume. So wiesen die höher gelegenen Naturräume „Nordalpen“ (138 mm), „Ostbayerischen Kristallin“ (46 mm) und „Schwarzwald“ (43 mm) die höchsten Werte für das Wasseräquivalent der Schneedecke auf. Außerdem wiesen auch die östlichen Naturräume Baden-Württembergs und Bayerns mit Werten zwischen 12 und 19 mm noch eine nennenswerte Schneedecke auf. In den nordwestlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes ist einzig der „Vulkanische Westerwald“ zu nennen (16 mm). Demgegenüber waren die milden und tiefer gelegenen Naturräume „Nördlicher Oberrheingraben“, „Mainzer Becken und Wetterau“ sowie „Südlicher Oberrheingraben und Hochrheintal“ durch ein Wasseräquivalent der Schneedecke in den Monaten Januar bis März von lediglich 2 mm charakterisiert und somit nahezu schneefrei.

Betrachtet man die Entwicklung des Wasseräquivalents der Schneedecke von Januar bis März im gesamten süddeutschen Raum, so zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge und der Lufttemperatur, was sich in ausgeprägten dekadischen Variabilitäten äußert (Abb. 3.41 und Tab. 3.8).

So war die Schneedecke in Süddeutschland in den feuchteren Dekaden 1961-1970 (+58 %) sowie 1981-1990 (+24 %) deutlich stärker ausgeprägt als während der trockenen Dekade 1971-1980 (-23 %). In den Dekaden 1991-2000 (-50 %) und 2001-2010 (-15 %) war die Schneedecke auf Grund steigender Temperaturen im Vergleich zum 60-jährigen Gesamtzeitraum durchgehend geringer ausgeprägt, obwohl in diesen Dekaden ein leichter Anstieg der Niederschlagshöhe, insbesondere in den Monaten Februar und März (Kap. 3.2.2) gemessen wurde.

Tab. 3.8: Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm und %.

Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März [mm]					
Zeitraum	Süddeutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-2010	18	15	27	7	5
Absolute [mm] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	0.5 / 6.2	1.2 / 7.9	-0.2 / -0.8	0.8 / 11.4	1.1 / 22.4
1961-1970	9.7 / 57.6	8.8 / 57.9	13.3 / 50.4	6.1 / 87.1	2.5 / 51.0
1971-1980	-4.5 / -22.5	-4.7 / -30.9	-6.5 / -24.6	-1.3 / -18.6	-0.2 / -4.1
1981-1990	4.3 / 23.7	6.1 / 40.1	5.4 / 20.5	0.8 / 11.4	0.9 / 18.4
1991-2000	-7.9 / -50.2	-8.8 / -57.9	-9.7 / -36.7	-4.9 / -70.0	-3.1 / -63.3
2001-2010	-2.2 / -14.8	-2.7 / -17.8	-2.4 / -9.1	-1.5 / -21.4	-1.1 / -22.4
2011-2015	-7.0 / -42.2	-8.2 / -55.4	-8.9 / -33.3	-3.4 / -50.0	-2.1 / -42.0

Analog zu der beobachteten Entwicklung der Dekaden (Abb. 3.41 und Tab. 3.8) zeigt sich bei Betrachtung der Einzeljahre in allen Bundesländern eine Tendenz hin zu geringmächtigeren Schneedecken (Abb. 3.42). So war beispielsweise in Hessen und Rheinland-Pfalz, mit Ausnahme des Jahres 2010, kein nennenswerter Schneespeicher vorhanden. Während Baden-Württemberg und Bayern bis in die Mitte der 1980er Jahre mit wenigen Ausnahmen als vergleichsweise schneereich bezeichnet werden konnten, fand seitdem eine deutliche Entwicklung hin zu geringeren gespeicherten Schneemengen (mit Ausnahme der Jahre 2005, 2006 und 2010) statt.

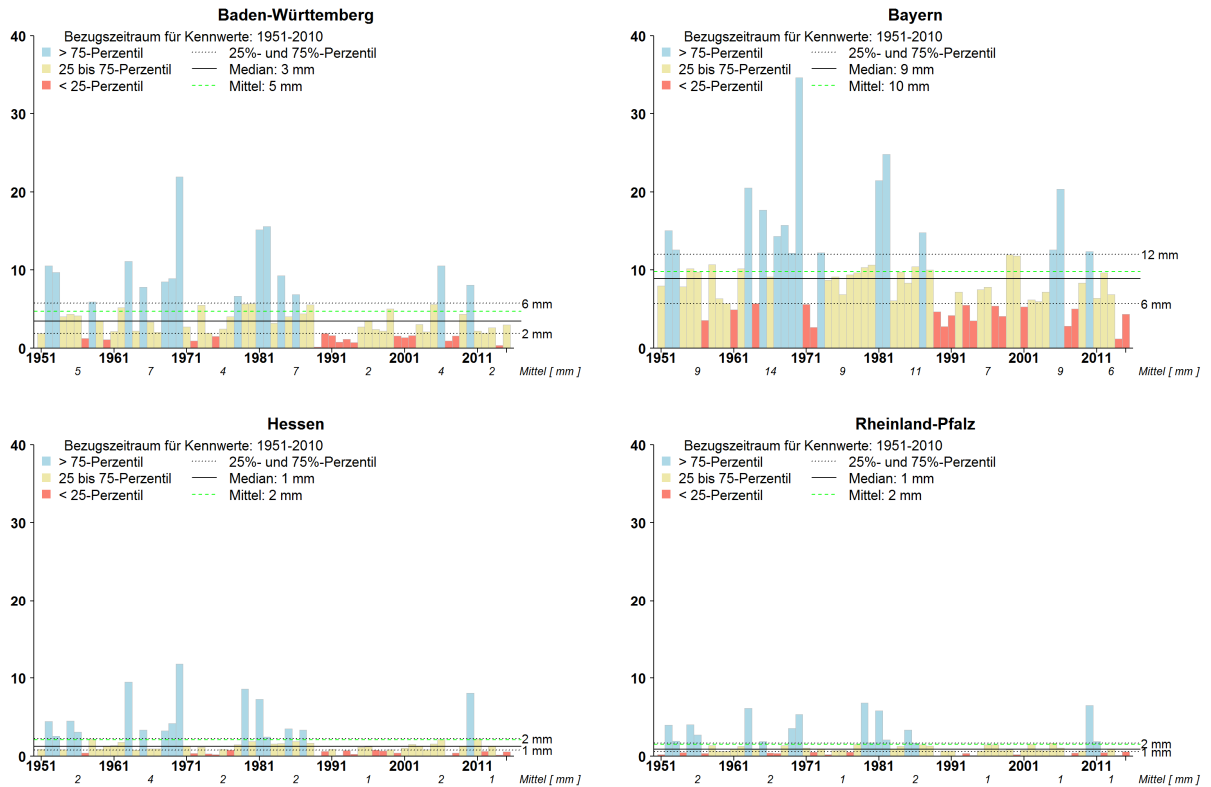


Abb. 3.42: Entwicklung des jährlichen Wasseräquivalents der Schneedecke auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm.

Der leicht zunehmende Schneespeicher im Dezember, sowie die abnehmenden Mengen von Januar bis April (Abb. 3.44) zeigen sehr deutlich die regulierende Funktion der Lufttemperatur auf den Aggregatzustand des gefallenen Niederschlags (flüssig/fest). Obwohl auf Grund der gestiegenen Niederschläge von Januar bis März (Abb. 3.11) insgesamt mehr Wasser zur Verfügung stand, resultierte aus den gestiegenen Wintertemperaturen ein höherer Anteil an flüssigem Niederschlag und somit eine Verringerung der Schneeakkumulation in der zurückliegenden Dekade 2001-2010.

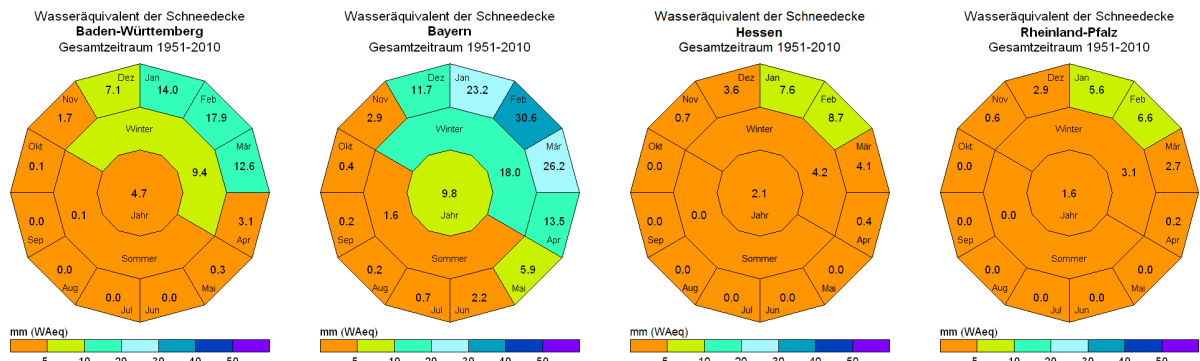


Abb. 3.43: Innerjährliche Verteilung des Wasseräquivalents der Schneedecke im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum.

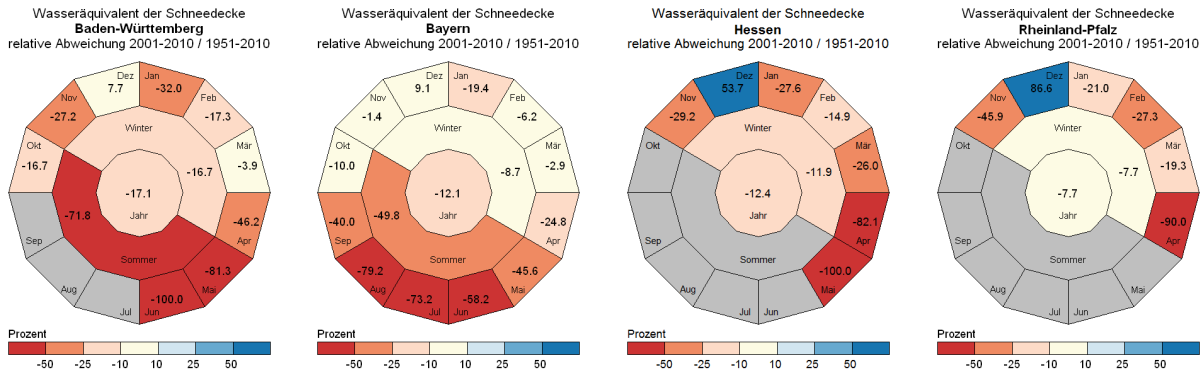


Abb. 3.44: Mittlere innerjährliche relative Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel der Periode 1951-2010. Angaben als Änderung in % über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Änderungen in %. Abweichend zu den anderen Wasserhaushaltskomponenten sind hier, auf Grund der teils sehr geringen absoluten Mengen, die relativen Änderungen dargestellt. In grau dargestellte Monate sind schneefrei.

Analog dem länderübergreifend relativ einheitlichen Änderungssignal der Lufttemperatur mit einer mittleren Erwärmung von 0.6 °C in den Wintermonaten (Abb. 3.5) im Vergleich zum langjährigen Mittel, zeigen in der Dekade 2001-2010 alle untersuchten Naturräume einen Rückgang des Wasseräquivalents der Schneedecke. Die deutlichsten Rückgänge sind demnach in den schneereichen Naturräumen Süddeutschlands zu beobachten (-19 mm „Nordalpen“ und -11 mm „Schwarzwald“). Im „Ostbayerischen Kristallin“ sind die Rückgänge, trotz erhöhter Temperaturen, auf Grund des steigenden Niederschlags in den betrachteten Monaten verhältnismäßig wenig gesunken (-3 mm). Einzig das „Tertiärhügelland“ und der Naturraum „Iller-Lech-Schotterplatten“ wiesen mit +1 mm einen geringfügigen Anstieg der Schneedecke auf.

Im Zeitraum 2011-2015 verringerte sich das mittlere Wasseräquivalent der Schneedecke im Winterhalbjahr im Vergleich zur 60-Jahresperiode 1951-2010 zwischen -40 % in Bayern bis zu -57 % in Baden-Württemberg.

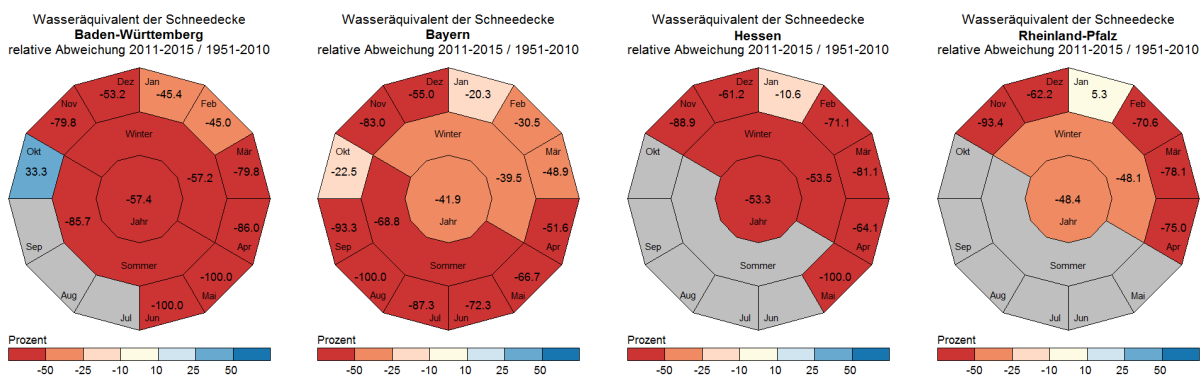


Abb. 3.45: Mittlere innerjährliche relative Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraumes 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Änderung in % über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Änderungen in %. In grau dargestellte Monate sind schneefrei.

Die statistische Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Schneedecke anhand des Mann-Kendall-Trendtest ist für das gesamte hydrologische Winterhalbjahr (November - April) dargestellt (Abb. 3.46). Bei der Betrachtung der Trenddreiecke zeigt sich eine signifikante Abnahme der Schneedecke mit Beginn der 1990er Jahre. Gut erkennbar ist zudem in allen

Bundesländern (v.a. Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz) der Einfluss der relativ kühlen und schneereichen Dekade 1980 bis 1990. Dies zeigt sich in der zeitlich begrenzten Zunahme, sowie der darauf folgenden Abnahme der Schneemenge mit Beginn der 1990er Jahre.

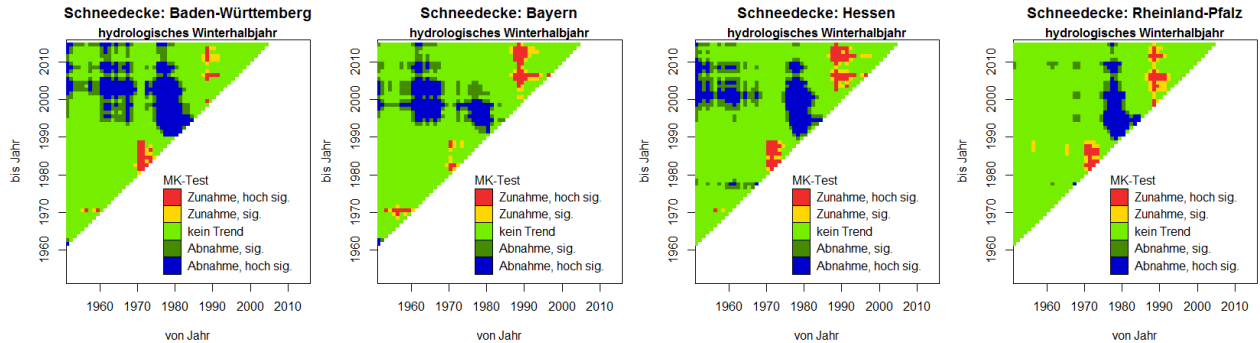


Abb. 3.46: Trenddreiecke der Schneedecke im Winterhalbjahr im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.



4 Entwicklung in der Vergangenheit und Perspektiven für die Zukunft

Die zeitliche Entwicklung des Bodenwasserhaushalts zwischen 1951-2015 hat gezeigt, dass mit der seit Beginn der 1990er Jahre zu beobachtenden Erwärmung auch Veränderungen verschiedener weiterer Bilanzkomponenten einhergehen (Kap. 3.2). Um eine Gesamtentwicklung über 150 Jahre bis in das Jahr 2100 beschreiben zu können, werden nachfolgend die Ergebnisse der Langzeitsimulation zusammen mit den Projektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100), basierend auf der regionalen Klimaprojektion WETTREG2010 (ECHAM5/A1B), dargestellt. WETTREG2010 gilt dabei, auf Grund deutlicher Temperaturzunahmen und ganzjährig abnehmender Niederschläge, als „Worst-Case-Szenario“. Die im Rahmen von KLIWA bereits veröffentlichten Ergebnisse auf Basis der moderaten regionalen Klimaprojektion WETTREG2006 (KLIWA 2012) werden hier lediglich am Rande mitbetrachtet.

Bei einer gemeinsamen Darstellung von Ergebnissen aus Vergangenheit und Zukunft ist zu beachten, dass sich die sog. Reanalysen bzw. Kontrollläufe regionaler Klimamodelle (hier: Zeitraum 1971-2000) von den entsprechenden Messdaten unterscheiden können. Diese systematischen Abweichungen sind in Form von Tabellen für jede nachfolgend behandelte Auswertegröße enthalten und müssen bei der Betrachtung der dargestellten Gesamtentwicklung von 1951 bis 2100 berücksichtigt werden. Generell gilt, je geringer der Niederschlag in einem einzelnen Bundesland oder Naturraum ist, desto deutlicher kann sich die systematische Abweichung aus Messdaten und den Kontrollläufen auswirken. Dies gilt insbesondere für die Bilanzgrößen Gesamtabflusshöhe, Direktabfluss und Grundwasserneubildung.

4.1 Lufttemperatur

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, zeigt sich insbesondere seit Beginn der 1990er Jahre ein deutlicher Trend zu einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur für Süddeutschland um 0.7°C im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Gemittelt über 30-Jahresperioden entspricht dies auch der Lufttemperaturdifferenz zwischen 1951-1980 und 1981-2010 (Tab. 4.1.1). Die beobachtete Erwärmung hat sich in den letzten fünf Jahren des Untersuchungszeitraums (2011-2015) weiter verstärkt, so dass die Temperatur bereits um 0.7°C über der des Zeitraumes 1981-2010 liegt. Der beobachtete Anstieg beruht dabei vor allem auf Zunahmen in den Wintermonaten ($+1.1^{\circ}\text{C}$), während sich die Sommermonate ($+0.4^{\circ}\text{C}$) vergleichsweise gering erwärmten.

Daran anknüpfend deutet die regionale Klimaprojektion WETTREG2010 auf einen, über alle Bundesländer gleichmäßig verteilten, sich weiter fortsetzenden Anstieg der Jahresmitteltemperatur gegenüber 1981-2010 von 1.1°C in der nahen Zukunft und 3.3°C in der fernen Zukunft für Süddeutschland hin. Wie bereits in der Vergangenheit beobachtet, ist auch für die Zukunft eine uneinheitliche Zunahme der Erwärmung im Jahresverlauf zu erwarten. Betrachtet man die Jahresgänge auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten (Abb. 4.1), so werden anhand von WETTREG2010, mit Ausnahme des Frühjahres, ganzjährig steigende Temperaturen erwartet. Abweichend davon projiziert WETTREG2006 den deutlichsten Temperaturanstieg in den Wintermonaten Dezember bis Februar (KLIWA 2012).

Bei der Lufttemperatur zeigt sich zwischen dem Kontrolllauf (WETTREG2010) und den Messdaten keine nennenswerte Abweichung der Mittelwerte für die Periode 1971-2000 (Tab. 4.1.2).

Tab. 4.1.1: Mittlere Lufttemperatur über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in °C.

Zeitraum	Simulation	Lufttemperatur [°C]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-1980	Langzeit	7.8	8.0	7.4	8.2	8.6
1981-2010	Langzeit	8.6	8.7	8.2	8.9	9.3
Absolute Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010 [°C]						
2021-2050	WETTREG2010	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1
Absolute Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010 [°C]						
2071-2100	WETTREG2010	3.3	3.3	3.2	3.3	3.3

Tab. 4.1.2: Vergleich der mittleren Lufttemperatur aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in °C.

Zeitraum	Simulation	Lufttemperatur [°C]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1971-2000	Langzeit	8.2	8.4	7.9	8.6	8.9
1971-2000	WET10 Mess	8.2	8.4	7.9	8.5	8.9
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [°C] / Absolute Abweichung zu Simulation mit Messdaten [°C]						
1971-2000	WET10 Kontroll	8.3 / 0.0	8.4 / 0.0	7.9 / 0.0	8.6 / 0.1	9.0 / 0.1

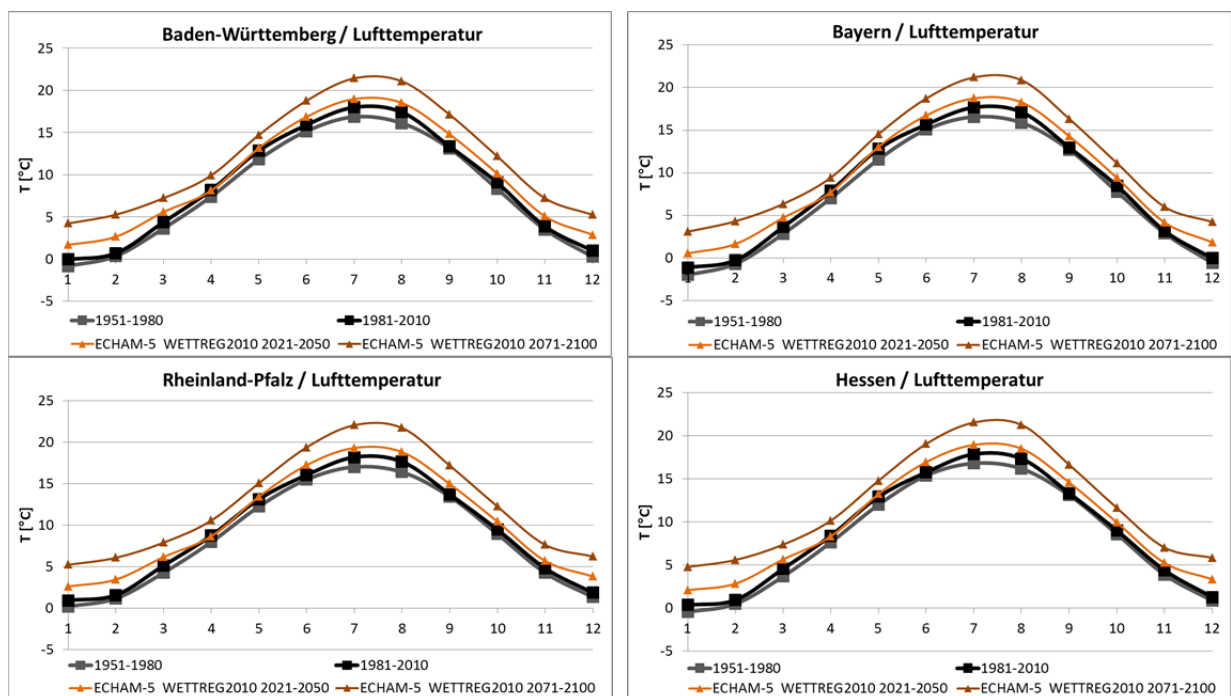


Abb. 4.1: Jahrgang der Lufttemperatur auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben zur Lufttemperatur in °C.



4.2 Niederschlag

Die zeitliche Entwicklung der mittleren Niederschlagshöhe über die beiden 30-Jahresperioden 1951-1980 und 1981-2010 zeigte in der Vergangenheit eine Zunahme von fast 50 mm/a in Süddeutschland. Diese Zunahme war relativ gleichförmig über die 4 Bundesländer verteilt und lag zwischen 38 mm (+5 %) in Hessen und 56 mm/a (+7 %) in Rheinland-Pfalz (Tab. 4.2.1).

Die WETTREG2010-Projektion weist für Süddeutschland mit Abnahmen der mittleren Jahresniederschlagshöhe von -74 mm/a (-8 %) im Vergleich zur 30-Jahresperiode 1981-2010 den Weg in eine trockene Zukunft, wobei sich ein deutlicher Südost-Nordwestgradient im Änderungssignal herausdifferenziert. So geht in der nahen Zukunft in Bayern die mittlere Jahresniederschlagshöhe um -85 mm/a (-9 %) zurück, während sich diese in Rheinland-Pfalz nur um -45 mm/a (-6 %) verringert. Für die ferne Zukunft sind dann Abnahmen von -71 mm/a (-9 %) in Rheinland-Pfalz bis -150 mm/a (-16 %) in Bayern zu erwarten.

Das Klimasignal für Süddeutschland auf Basis der WETTREG2006-Projektion deutet in dieselbe Richtung, ist jedoch in der nahen Zukunft für Süddeutschland weniger ausgeprägt und entspricht in etwa der Niederschlagsmenge der 30-Jahresperiode 1951-1980. In der fernen Zukunft bleibt das Niveau insgesamt stabil, allerdings werden räumliche Umverteilungen bezogen auf die Bundesländer projiziert. So nimmt in Rheinland-Pfalz der durchschnittliche Jahresniederschlag zu, während in Bayern und Baden-Württemberg ein geringer Rückgang zu erwarten ist (KLIWA 2012).

Die mittleren Abweichungen zwischen Kontrolllauf und Messdaten (Zeitraum 1971-2000) sind für die WETTREG2010-Projektion sehr gering (Tab. 4.2.2). Die Niederschlagshöhe wird um -4 mm (-0.5 %) unterschätzt. Die deutlichste Unterschätzung mit -11 mm (-1.4 %) ergibt sich für Rheinland-Pfalz.

Tab. 4.2.1: Mittlere Niederschlagshöhe über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Niederschlagshöhe [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-1980	Langzeit	879	945	915	761	760
1981-2010	Langzeit	926	993	962	798	816
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2021-2050	WETTREG2010	-74 / -8.0	-81 / -8.1	-85 / -8.9	-53 / -6.7	-45 / -5.5
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2071-2100	WETTREG2010	-128 / -13.8	-134 / -13.5	-150 / -15.6	-97 / -12.2	-71 / -8.7

Tab. 4.2.2: Vergleich der mittleren Niederschlagshöhe aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Niederschlagshöhe [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1971-2000	Langzeit	891	960	926	760	785
1971-2000	WET10 Mess	892	960	926	762	785
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [mm/a] / Relative Abweichung zu Simulation mit Messdaten [%]						
1971-2000	WET10 Kontroll	887 / -0.5	959 / -0.2	923 / -0.3	753 / -1.1	774 / -1.4

Für das Winterhalbjahr zeigt sich beim Vergleich des Zeitraums 1981-2010 gegenüber 1951-1980 eine Zunahme der Niederschläge von 7 % in Baden-Württemberg, 9 % in Bayern und Hessen und 12 % in Rheinland-Pfalz. Demgegenüber weichen die letzten fünf Jahre des Untersuchungszeitraums (2011-2015) von dieser langfristigen Entwicklung deutlich ab. Bemerkenswert ist dabei insbesondere die Abnahme der Winterniederschläge (vgl. Kap. 3.2.2). Für die Zukunft weist die WETTREG2010-Projektion geringfügig sinkende Winterniederschläge im Vergleich zur 30-Jahresperiode 1981-2010 auf, während sich die Sommer- und Herbstniederschläge, vor allem in der fernen Zukunft, deutlich reduzieren werden (Abb. 4.2). Im Vergleich dazu zeigt die WETTREG2006-Projektion in der nahen Zukunft einen geringen Anstieg der Winterniederschläge von Dezember bis Februar sowie ebenfalls abnehmende Sommerniederschläge. Dieses Änderungssignal wird sich in der fernen Zukunft (2071-2100) voraussichtlich weiter verstärken (KLIWA 2012).

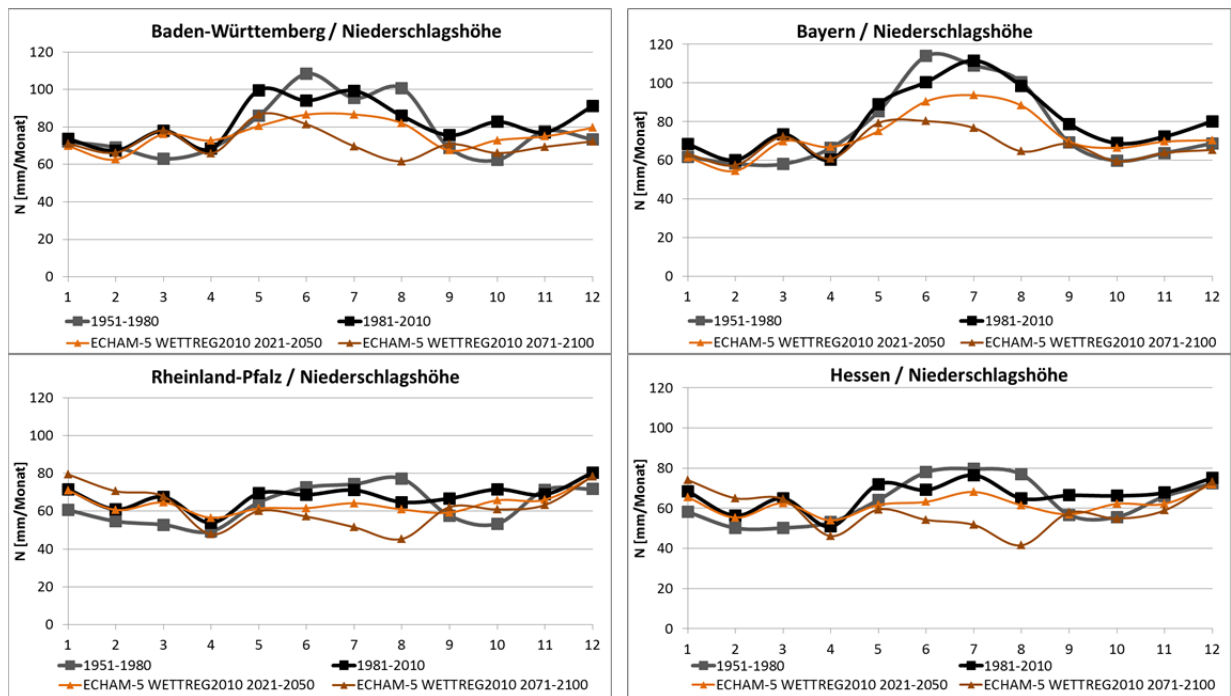


Abb. 4.2: Jahressgang der Niederschlagshöhe auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.

4.3 Tatsächliche Verdunstung

Die zeitliche Entwicklung der mittleren tatsächlichen Verdunstungshöhe über die 30-Jahresperioden 1951-1980 und 1981-2010 zeigte in der Vergangenheit eine temperatur- und niederschlagsbedingte Zunahme von etwa 20 mm/a in Süddeutschland. Die höchste Zunahme mit 23 mm/a (+4 %) war dabei in Bayern, die geringste mit 12 mm/a (+2 %) in Hessen zu verzeichnen (Tab. 4.3.1).

Für Süddeutschland weist die WETTREG2010-Projektion in der nahen Zukunft eine Zunahme der tatsächlichen Verdunstungshöhe von 17 mm/a (+3 %) gegenüber der 30-Jahresperiode 1981-2010 auf. Die Zunahme erhöht sich in der fernen Zukunft weiter auf 31 mm/a (+6 %). Bei Betrachtung der einzelnen Bundesländer fallen die zukünftigen Änderungen in Baden-Württemberg und Bayern deutlicher aus als in Hessen und Rheinland-Pfalz.

Auf Basis der WETTREG2006-Projektion sind hingegen weitgehend gleichbleibende Verdunstungsverhältnisse in der nahen Zukunft zu erwarten. In der fernen Zukunft nimmt das Änderungssignal für Süddeutschland und die einzelnen Länder zwar weiter zu, bleibt aber insgesamt gering (KLIWA 2012).



Die mittleren Abweichungen zwischen Kontrolllauf und Messdaten (Zeitraum 1971-2000) sind hier insgesamt unauffällig (Tab. 4.3.2). Die tatsächliche Verdunstung wird in Süddeutschland mit WETTREG2010 um 14 mm bzw. +3 % relativ einheitlich überschätzt.

Tab. 4.3.1: Mittlere tatsächliche Verdunstung über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Tatsächliche Verdunstung [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-1980	Langzeit	524	557	517	515	502
1981-2010	Langzeit	544	576	539	527	518
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2021-2050	WETTREG2010	17 / 3.1	18 / 3.2	20 / 3.6	11 / 2.1	10 / 2.0
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2071-2100	WETTREG2010	31 / 5.6	41 / 7.1	35 / 6.5	13 / 2.4	16 / 3.2

Tab. 4.3.2: Vergleich der mittleren tatsächlichen Verdunstung aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Tatsächliche Verdunstung [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1971-2000	Langzeit	531	564	527	512	503
1971-2000	WET10 Mess	532	565	529	511	505
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [mm/a] / Relative Abweichung zu Simulation mit Messdaten [%]						
1971-2000	WET10 Kontroll	546 / 2.6	578 / 2.2	544 / 2.8	526 / 2.9	517 / 2.5

Auf Grundlage der 30-jährigen Monatsmittelwerte (1951-1980 und 1981-2010) sind leichte Zunahmen insbesondere in den Monaten März bis Mai für die Vergangenheit erkennbar (Abb. 4.3). Ausgelöst durch steigende Lufttemperaturen hat bereits in der Dekade 2001-2010 die Verdunstung ganzjährig zugenommen, mit dem deutlichsten Anstieg von Februar bis Mai sowie im Oktober (Baden-Württemberg und Bayern) und im September (Rheinland-Pfalz) (Abb. 3.18). Die letzten fünf Jahre des Untersuchungszeitraums (2011-2015) weisen geringfügige Zunahmen in den Wintermonaten (vor allem im März) und deutlichere Abnahmen der Verdunstungsraten in den Sommermonaten (vor allem im Mai) auf (Abb. 3.19).

Tendenziell dürfte sich diese Entwicklung, bedingt durch die steigenden Lufttemperaturen und ein ausreichendes Niederschlagsangebot im Winter und Frühjahr fortsetzen, während in den Sommer- und Herbstmonaten aufgrund abnehmender Niederschläge, und dem damit einhergehenden Wasserdefizit, die Verdunstungshöhe eher rückläufig sein wird (dies gilt vor allem für die trockeneren Naturräume in Hessen und Rheinland-Pfalz). Da sich positive und negative innerjährliche Änderungen annähernd ausgleichen, ergeben sich insgesamt relativ geringe zukünftige Änderungssignale.

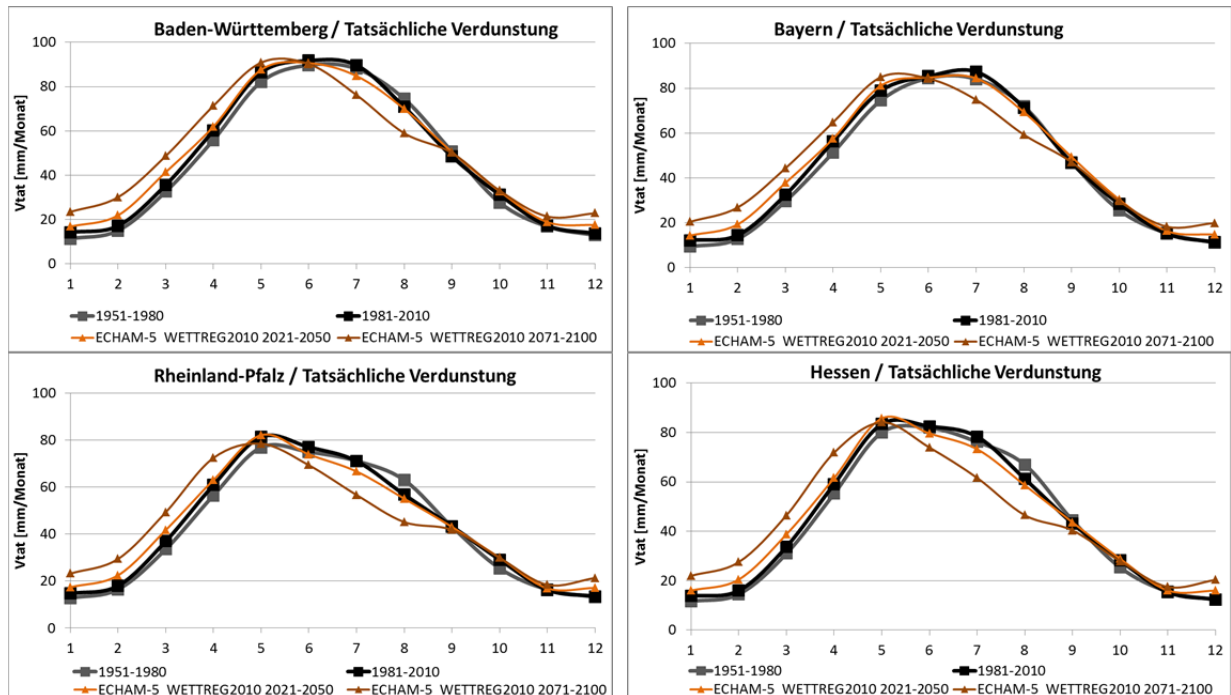


Abb. 4.3: Jahrgang der Verdunstungshöhe auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.

4.4 Gesamtabfluss

Die zeitliche Entwicklung der mittleren jährlichen Gesamtabflusshöhe in der Vergangenheit spiegelt zum großen Teil die Niederschlagsentwicklung während der beiden 30-Jahresperioden wieder und zeigt eine leichte Zunahme von etwa 25 mm/a (+7 %) in Süddeutschland. Am höchsten fiel diese mit 38 mm/a (+15 %) in Rheinland-Pfalz aus (Tab. 4.4.1).

Die WETTREG2010-Projektion weist für Süddeutschland in der nahen Zukunft deutliche Abnahmen der mittleren jährlichen Gesamtabflusshöhe von nahezu -90 mm/a (-23 %) gegenüber der 30-Jahresperiode 1981-2010 auf. In der fernen Zukunft nehmen diese Änderungssignale noch weiter zu, so dass dann Abnahmen von -156 mm/a (-41 %) zu erwarten sind. Bei Betrachtung der einzelnen Bundesländer fallen die Abnahmen in beiden Zukunftszeiträumen in Baden-Württemberg und Bayern stärker aus als in Hessen und Rheinland-Pfalz.

Demgegenüber sind auf Basis der WETTREG2006-Projektion in der nahen Zukunft nur vergleichsweise geringe Abnahmen der mittleren jährlichen Gesamtabflusshöhe in Baden-Württemberg und Bayern zu erwarten, welche sich in der fernen Zukunft geringfügig weiter reduzieren. Für Rheinland-Pfalz werden hingegen für beide Zukunftszeiträume leichte Zunahmen projiziert (KLIWA 2012).

Die Abweichungen der Mittelwerte in der Periode 1971-2000 zwischen Kontrolllauf und Messdaten in Süddeutschland sind gering (Tab. 4.4.2). Die Gesamtabflusshöhe wird in Süddeutschland insgesamt leicht unterschätzt (WETTREG2010: -18 mm bzw. -5 %), wobei die Abweichungen in Baden-Württemberg und Bayern geringer ausfallen als in Rheinland-Pfalz und Hessen.



Tab. 4.4.1: Mittlere Gesamtabflusshöhe über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Gesamtabflusshöhe [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-1980	Langzeit	355	388	398	247	258
1981-2010	Langzeit	381	415	421	269	296
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2021-2050	WETTREG2010	-89 / -23.3	-97 / -23.4	-103 / -24.4	-63 / -23.2	-54 / -18.1
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2071-2100	WETTREG2010	-156 / -41.1	-173 / -41.7	-183 / -43.4	-108 / -40.0	-85 / -28.7

Tab. 4.4.2: Vergleich der mittleren Gesamtabflusshöhe aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Mittlere Gesamtabflusshöhe [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1971-2000	Langzeit	361	396	399	248	281
1971-2000	WET10 Mess	360	395	398	251	280
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [mm/a] / Relative Abweichung zu Simulation mit Messdaten [%]						
1971-2000	WET10 Kontroll	342 / -5.1	381 / -3.5	380 / -4.5	227 / -9.2	257 / -8.1

Betrachtet man die 30-jährigen Monatsmittelwerte der Gesamtabflusshöhe in den Perioden 1951-1980 und 1981-2010 im Vergleich, so ist bereits für die Vergangenheit eine innerjährliche Umverteilung feststellbar (Abb. 4.4). Während 1981-2010 in den Sommermonaten der Gesamtabfluss zurückging, nahm dieser als Folge insgesamt gesteigener Winterniederschläge zwischen Oktober und März zu. Auffällig ist eine ausgeprägte Zunahme der Gesamtabflüsse im März, insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg, die sicherlich auch mit Veränderungen der Schneeakkumulation zusammenhängt.

Die Dekade 2001-2010 war geprägt von sinkenden Sommerniederschlägen sowie steigendem Verdunstungsbedarf, so dass die Gesamtabflusshöhe (Abb. 3.25) und die daraus resultierende Grundwasserneubildung während des Sommerhalbjahres in allen Bundesländern spürbar zurückging. Die Gesamtabflüsse im Winterhalbjahr wiesen, mit Ausnahme einer Zunahme in Bayern, keine nennenswerten Änderungen auf.

Demgegenüber waren die Gesamtabflüsse der letzten 5 Jahre des Untersuchungszeitraumes (2011-2015) im Winterhalbjahr, vor allem auf Grund der trockenen Monate Februar bis April, mit Rückgängen zwischen -56 mm in Baden-Württemberg und -71 mm in Hessen gegenüber 1981-2010 deutlich niedriger. Im Sommerhalbjahr reduzierten sie sich mit einem maximalen Rückgang von -11 mm in Bayern vergleichsweise gering.

In der nahen Zukunft sind ganzjährige Abnahmen zu erwarten, welche in den Monaten Dezember bis Februar am geringsten ausfallen werden (Abb. 4.4). Für das übrige Jahr ist eine Entwicklung hin zu längeren und häufigeren Trockenperioden auszugehen. Für die ferne Zukunft werden ganzjährig Rückgänge erwartet.

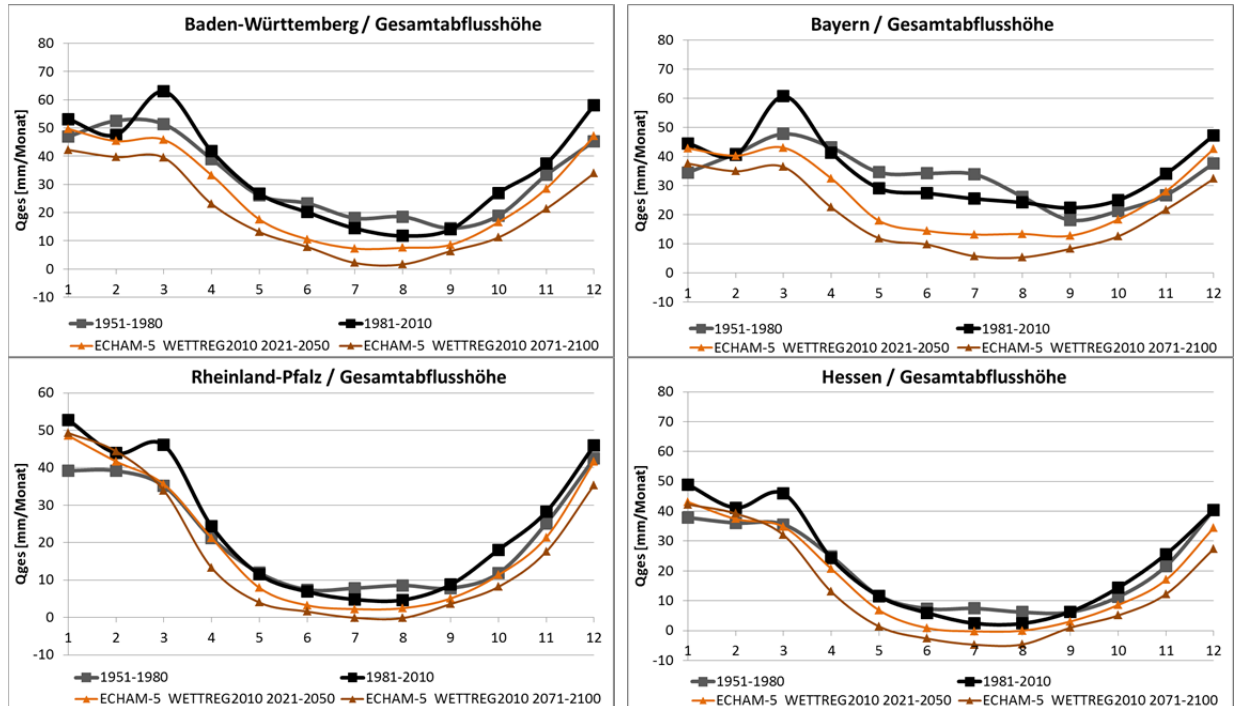


Abb. 4.4: Jahresgang der Gesamtabflusshöhe auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.

4.5 Direktabfluss

Der Direktabfluss entspricht der Differenz aus dem mit GWN-BW simulierten Gesamtabfluss und der auf Grundlage des regionalisierten Baseflow-Index (BFI) ermittelten Grundwasserneubildung. Aus methodischen Gründen kann daher der Direktabfluss nur in Bezug auf vieljährige Mittelwerte ausgewertet werden. Abweichend von den anderen Wasserbilanzgrößen, wird deshalb auf eine Darstellung der innerjährlichen Änderungen (Jahresganglinien) verzichtet. Weiterhin ist zu beachten, dass Starkniederschläge kurzer Dauer und ihre Auswirkungen auf das Abflussgeschehen mit der hier gewählten Vorgehensweise nicht berücksichtigt werden können.

Tab. 4.5.1: Mittlere Direktabflusshöhe über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Direktabflusshöhe [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-1980	Langzeit	187	208	197	142	162
1981-2010	Langzeit	201	222	209	156	184
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2021-2050	WETTREG2010	-44 / -22.1	-49 / -22.2	-50 / -23.7	-31 / -19.7	-32 / -17.5
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2071-2100	WETTREG2010	-75 / -37.5	-85 / -38.3	-86 / -41.1	-49 / -31.6	-49 / -26.8



Tab. 4.5.2: Vergleich der mittleren Direktabflusshöhe aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Mittlere Direktabflusshöhe [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1971-2000	Langzeit	190	211	197	144	174
1971-2000	WET10 Mess	189	210	197	144	174
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [mm/a] / Relative Abweichung zu Simulation mit Messdaten [%]						
1971-2000	WET10 Kontroll	180 / -5.0	203 / -3.6	188 / -4.4	133 / -7.7	159 / -8.3

Die zeitliche Entwicklung der mittleren jährlichen Direktabflusshöhe zeigt zwischen den beiden 30-Jahresperioden in der Vergangenheit eine Zunahme von 14 mm/a (+7 %) in Süddeutschland. Der höchste Anstieg war dabei mit 23 mm/a (+14 %), analog zur Gesamtabflusshöhe, in Rheinland-Pfalz zu verzeichnen (Tab. 4.5.1). Demgegenüber zeigen die letzten 5 Jahre des Untersuchungszeitraums (2011-2015) im Vergleich zur 30-Jahresperiode 1981-2010 einen deutlichen Rückgang zwischen -33 mm/a in Baden-Württemberg und -44 mm/a in Rheinland-Pfalz (vgl. Kap. 3.2.6).

Für Süddeutschland weist die WETTREG2010-Projektion in der nahen Zukunft Abnahmen der mittleren jährlichen Direktabflusshöhe von -44 mm/a (-22 %) im Vergleich zur 30-Jahresperiode 1981-2010 auf. In der fernen Zukunft verstärken sich die Änderungssignale weiter, so dass dann Abnahmen von -75 mm/a (-38 %) erwartet werden. Diese fallen in Baden-Württemberg und Bayern stärker aus als in Hessen und Rheinland-Pfalz.

Auf Basis der WETTREG2006-Projektion sind in der nahen Zukunft vergleichsweise geringe Abnahmen der mittleren jährlichen Direktabflusshöhe in Baden-Württemberg und Bayern zu erwarten, welche sich in der fernen Zukunft geringfügig weiter reduzieren. Für Rheinland-Pfalz werden hingegen für beide Zukunftszeiträume Zunahmen projiziert (KLIWA 2012).

Die Abweichungen der Mittelwerte in der Periode 1971-2000 zwischen Kontrolllauf und Messdaten in Süddeutschland sind gering (Tab. 4.5.2). Ähnlich wie die Gesamtabflusshöhe wird der mittlere Direktabfluss in Süddeutschland systematisch unterschätzt (WETTREG 2010: -10 mm bzw. -5 %), wobei die Abweichungen in Baden-Württemberg und Bayern insgesamt geringer ausfallen als in Rheinland-Pfalz und Hessen.

4.6 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Aus methodischen Gründen kann die Grundwasserneubildung aus Niederschlag ebenfalls nur in Bezug auf vieljährige Mittelwerte ausgewertet werden. Deshalb wird, analog zum Direktabfluss, auf eine Darstellung der innerjährlichen Änderungen (Jahresganglinien) verzichtet.

Tab. 4.6.1: Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Grundwasserneubildung aus Niederschlag [mm/a]				
		Süd-deutschland	Baden-Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland-Pfalz
1951-1980	Langzeit	168	180	200	104	96
1981-2010	Langzeit	180	193	212	113	112
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2021-2050	WETTREG2010	-44 / -24.7	-48 / -24.8	-53 / -25.0	-32 / -28.0	-21 / -19.0
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2071-2100	WETTREG2010	-81 / -45.0	-88 / -45.5	-97 / -45.7	-58 / -51.5	-36 / -31.9

Tab. 4.6.2: Vergleich der mittleren Grundwasserneubildung aus Niederschlag aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in mm/a und %.

Zeitraum	Simulation	Mittlere Direktabflusshöhe [mm/a]				
		Süd- deutschland	Baden- Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland- Pfalz
1971-2000	Langzeit	171	185	202	104	106
1971-2000	WET10 Mess	171	184	201	106	106
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [mm/a] / Relative Abweichung zu Simulation mit Messdaten [%]						
1971-2000	WET10 Kontroll	162 / -5.1	178 / -3.4	192 / -4.5	94 / -11.3	98 / -8

Die Veränderung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag über die beiden 30-Jahresperioden in der Vergangenheit zeigt eine Zunahme von 12 mm/a (+7 %) in Süddeutschland. Die höchste Zunahme mit 16 mm/a (+16 %) war dabei, analog zur Gesamt- und Direktabflusshöhe, in Rheinland-Pfalz zu verzeichnen (Tab. 4.6.1). Demgegenüber zeigen die letzten 5 Jahre des Untersuchungszeitraums (2011-2015) im Vergleich zur 30-Jahresperiode 1981-2010 einen Rückgang zwischen -31 mm/a in Rheinland-Pfalz und -39 mm/a in Bayern (vgl. Kap. 3.2.7).

Für Süddeutschland weist die WETTREG2010-Projektion in der nahen Zukunft Abnahmen der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung von -44 mm/a (-25 %) im Vergleich zur 30-Jahresperiode 1981-2010 auf. In der fernen Zukunft verstärken sich die Änderungssignale weiter, so dass dann Abnahmen von -81 mm/a (-45 %) erwartet werden. Dabei werden große regionale Unterschiede deutlich. Die stärksten absoluten Abnahmen sind in den vergleichsweise wasserreichen Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern zu erwarten, während diese in Hessen und Rheinland-Pfalz weniger deutlich ausfallen. Auf Grund der ohnehin geringeren Raten in Hessen und Rheinland-Pfalz fallen die relativen Abnahmen in allen Bundesländern aber vergleichbar (-32 % in Rheinland-Pfalz bis -51 % in Hessen) aus. Auf Basis der WETTREG2006-Projektion sind in der nahen Zukunft eher geringe Abnahmen der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung in Süddeutschland zu erwarten. Während sich diese in Baden-Württemberg und Bayern in der fernen Zukunft noch weiter reduzieren, wird für Rheinland-Pfalz eine geringfügige Zunahme projiziert (KLIWA 2012).

Die Abweichungen der Mittelwerte in der Periode 1971-2000 zwischen Kontrolllauf und Messdaten für Süddeutschland sind gering (4.6.2). Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag wird in Süddeutschland insgesamt unterschätzt (WETTREG2010: -9 mm bzw. -5 %), wobei die Abweichungen in Baden-Württemberg und Bayern geringer ausfallen als in Rheinland-Pfalz und Hessen.

Insgesamt deuten die vergangene sowie die zu erwartende zukünftige Entwicklung auf sich verschärfende Bedingungen hinsichtlich des für wasserwirtschaftliche Zwecke zur Verfügung stehenden Wassers hin. Insbesondere sinkende sommerliche Gesamtabflusshöhen bzw. Grundwasserneubildungshöhen sowie die daraus resultierende, sich verlängernde sommerliche Niedrigwasserperiode machen geeignete wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen z.B. im Hinblick auf eine umfassende Versorgungssicherheit erforderlich. Dies deutete sich bereits anhand der berechneten Grundwasserneubildungswerten in den vergangenen 5 Jahren des Untersuchungszeitraums (2011-2015) an, und wird sich gemäß der Klimaprojektion WETTREG2010 (trocken-warme Projektion) in Zukunft verstärkt fortsetzen (Tab. 4.6.1).



4.7 Trockenheitsindex

Die zeitliche Entwicklung der mittleren Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers (< 30% der nutzbaren Feldkapazität) über die beiden 30-Jahresperioden 1951-1980 und 1981-2010 zeigte in der Vergangenheit eine überwiegend temperaturbedingte Zunahme (tatsächliche Verdunstung) um etwa 3 Tage/a in Süddeutschland. Die höchste Zunahme mit 7 Tagen/a (+15 %) war dabei in Baden-Württemberg, die geringste in Bayern mit 1 Tag/a (+3 %) zu verzeichnen (Tab. 4.7.1). Die Zunahme des Trockenheitsindex von 1951-1980 zu 1981-2010 fällt auch deswegen vergleichsweise gering aus, da im gleichen Zeitraum die jährliche Niederschlagshöhe in Süddeutschland um über 40 mm/a zugenommen hat (Tab. 4.2.1).

Für Süddeutschland weist die WETTREG2010-Projektion in der nahen Zukunft deutliche Zunahmen der Anzahl an Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers von 18 Tagen/a (+34 %) auf. Diese Anzahl erhöht sich in der fernen Zukunft um nahezu 100 % (52 Tage/a) gegenüber der 30-Jahresperiode 1981-2010. Dies bedeutet, dass sich die Zeit mit erheblichem Trockenstress und Wassermangel um nahezu 2 Monate im Jahr verlängern wird, was regional zu einem erheblichen landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf führt. In beiden Zukunftszeiträumen wird die stärkste Zunahme für Hessen projiziert, während sie in den übrigen Bundesländern ähnlich sind.

Auf Basis der WETTREG2006-Projektion sind in der nahen Zukunft vergleichsweise geringe Zunahmen des Trockenheitsindex in allen Bundesländern zu erwarten. Diese werden sich erst in der fernen Zukunft deutlich erhöhen, auch wenn erwartungsgemäß nicht das Niveau von WETTREG2010 erreicht wird (KLIWA 2012).

Die Abweichungen der Mittelwerte in der Periode 1971-2000 zwischen Kontrolllauf und Messdaten in Süddeutschland sind sehr gering (4.7.2). Der Trockenheitsindex wird in Süddeutschland für WETTREG2010 geringfügig überschätzt (+1 Tag/a bzw. +1.3 %).

Tab. 4.7.1: Mittlerer Trockenheitsindex über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in Tage/a und %.

Zeitraum	Simulation	Trockenheitsindex [Tage/a]				
		Süd- deutschland	Baden- Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland- Pfalz
1951-1980	Langzeit	50	39	48	56	73
1981-2010	Langzeit	53	46	49	61	78
Absolute [Tage/a] / Relative [%] Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2021-2050	WETTREG2010	18 / 33.5	17 / 36.9	17 / 33.5	25 / 41.0	22 / 28.7
Absolute [Tage/a] / Relative [%] Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2071-2100	WETTREG2010	52 / 97.2	48 / 104.9	51 / 103.1	63 / 103.6	55 / 70.3

Tab. 4.7.2: Vergleich des mittleren Trockenheitsindex aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in Tage/a und %.

Zeitraum	Simulation	Mittlerer Trockenheitsindex [Tage/a]				
		Süd- deutschland	Baden- Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland- Pfalz
1971-2000	Langzeit	54	45	49	65	79
1971-2000	WET10 Mess	54	44	48	65	79
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [mm/a] / Relative Abweichung zu Simulation mit Messdaten [%]						
1971-2000	WET10 Kontroll	54 / 1.3	43 / -3	48 / 2	67 / 3	82 / 4

Innerjährlich sind diese Veränderungen beim Trockenheitsindex ausgesprochen ungleichmäßig verteilt, temperatur- und damit verdunstungsbedingte Zunahmen ergeben sich insbesondere im Sommerhalbjahr. In der vergangenen Dekade 2001-2010 war im Vergleich zum vieljährigen Mittel in allen Bundesländern eine Zunahme des Trockenheitsindex während der Sommermonate zu beobachten (Abb. 3.38). Diese war vor allem in den Monaten Juli und August und dabei am deutlichsten in den niederschlagsärmeren Ländern Rheinland-Pfalz und Hessen feststellbar. In den letzten 5 Jahren des Untersuchungszeitraumes (2011-2015) erfolgte in allen Bundesländern ein weiterer Anstieg des Trockenheitsindex gegenüber der 30-Jahresperiode 1981-2010. Während sich der Trockenheitsindex in Hessen lediglich um +4 Tage/a erhöhte, betrug die Zunahme in den übrigen Bundesländern zwischen +11 Tage/a in Bayern und +15 Tage/a in Rheinland-Pfalz. Die deutlichsten Zunahmen erfolgten in allen Bundesländern von April bis Juni (vgl. Kap. 3.2.7). In Zukunft ist von einer weiteren Zunahme des Trockenheitsindex von April bis November auszugehen, welche von Juni bis September am stärksten ausgeprägt sein wird (Abb. 4.5).

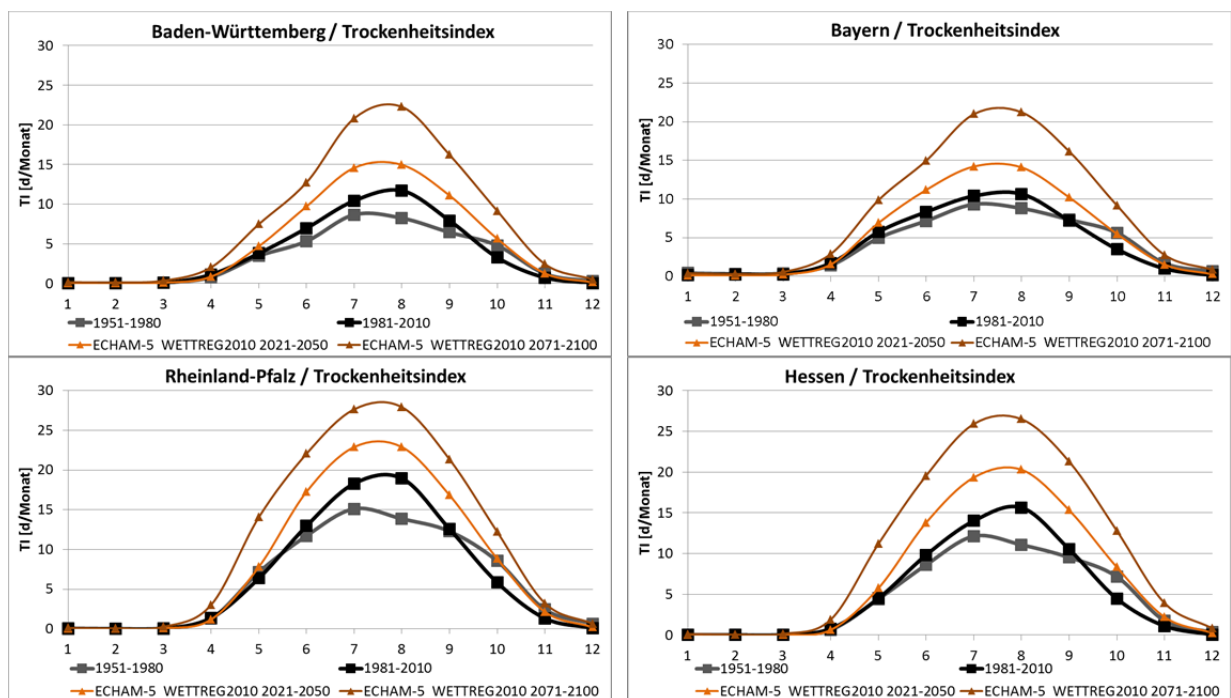


Abb. 4.5: Jahresgang des Trockenheitsindex auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in Tage/Monat.

4.8 Wasseräquivalent der Schneedecke

Die Entwicklung des Wasseräquivalents der Schneedecke (Januar bis März) über die beiden 30-Jahresperioden 1951-1980 und 1981-2010 wies bereits in der Vergangenheit eine, überwiegend temperaturbedingte, deutliche Abnahme um etwa -4 mm in Süddeutschland auf. Das in der Schneedecke gespeicherte Wasseräquivalent war somit in der Periode 1951-1980 noch um etwa 24 % höher als in der anschließenden 30-jährigen Periode. In Bayern war mit -4.6 mm die höchste absolute Abnahme zu verzeichnen. In Hessen verringerte sich die in der Schneedecke gespeicherte Wassermenge im gleichen Zeitraum um -3.7 mm, was bedeutet, dass in der Periode 1951-1980 das Wasseräquivalent noch um 75 % höher war.

Für Süddeutschland weist die WETTREG2010-Projektion in der nahen Zukunft weitere deutliche Abnahmen des Wasseräquivalents der Schneedecke von Januar bis März von -11.9 mm (-74 %) im Vergleich zur 30-Jahresperiode 1981-2010 auf. In der fernen Zukunft nehmen die Änderungssignale weiter drastisch zu. Für Süddeutschland muss dann im



Mittel insgesamt von einer nochmals geringeren Schneemenge ausgegangen werden (-15 mm / -92 %). Für die einzelnen Länder bedeutet dies, dass in Rheinland-Pfalz und Hessen flächenhaft überhaupt keine nennenswerten Schneemengen mehr vorhanden sein werden. In Baden-Württemberg und Bayern werden sich die Schneedecken von Januar bis März ebenfalls dramatisch reduzieren, so dass dann lediglich noch in den Naturräumen „Nordalpen“, „Ostbayerisches Kristallin“ und „Schwarzwald“ nennenswerte Schneemengen zu erwarten sind.

Auf Basis der regionalen WETTREG2006-Projektion werden ähnliche Änderungssignale projiziert, wenngleich diese in der nahen Zukunft noch etwas schwächer ausgeprägt sind (KLIWA 2012).

Die absoluten Abweichungen der Mittelwerte in der Periode 1971-2000 zwischen Kontrolllauf und Messdaten in Süddeutschland sind gering. Auf Grund der geringen Absolutwerte fallen die relativen Änderungen speziell in den schneearmen Bundesländern Hessen und Rheinland-Pfalz mit bis zu 36 % aber sehr deutlich aus (4.8.2). Das Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März wird dabei in Süddeutschland für WETTREG2010 (-2 mm/a bzw. -11.8 %) unterschätzt.

Tab. 4.8.1: Mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm und %.

Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März [mm/a]						
Zeitraum	Simulation	Süd- deutschland	Baden- Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland- Pfalz
1951-1980	Langzeit	19.9	16.4	28.9	8.7	6.1
1981-2010	Langzeit	16.1	13.2	24.4	5.0	3.9
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten nahen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2021-2050	WETTREG2010	-11.9 / -73.9	-10.4 / -78.4	-17.6 / -72.3	-3.9 / -78.1	-3.0 / -77.3
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der projizierten fernen Zukunft gegenüber dem Zeitraum 1981-2010						
2071-2100	WETTREG2010	-14.9 / -92.4	-12.3 / -93.4	-22.4 / -92.0	-4.7 / -94.2	-3.6 / -93.9

Tab. 4.8.2: Vergleich des mittleren Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000.

Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März [mm/a]						
Zeitraum	Simulation	Süd- deutschland	Baden- Württemberg	Bayern	Hessen	Rheinland- Pfalz
1971-2000	Langzeit	14	12	21	5	4
1971-2000	WET10 Mess	14	12	21	5	4
Kontrolllauf für den Zeitraum 1971-2000 [mm/a] / Relative Abweichung zu Simulation mit Messdaten [%]						
1971-2000	WET10 Kontroll	12 / -11.8	10 / -19.8	19 / -6	3 / -35.1	3 / -36.2

Obwohl in der zurückliegenden Dekade 2001-2010 auf Grund der gestiegenen Niederschläge von Januar bis März (Abb. 3.10) insgesamt mehr Wasser zur Verfügung stand, resultierten aus den gestiegenen Wintertemperaturen ein höherer Anteil an flüssigem Niederschlag und somit eine reduzierte Schneeakkumulation (Abb. 3.44). Die Entwicklung hin zu geringeren Schneemengen ist in verstärkter Form auch in den letzten 5 Jahren feststellbar (Abb. 3.45), und wird sich in Zukunft noch einmal verschärfen (Abb. 4.6). Die veränderte Schneeakkumulation führt vor allem zu einer früher auftretenden Schneeschmelze und somit höheren Gesamtabflüssen während der Wintermonate (vgl. Kap. 4.4). Dies bedeutet zugleich geringere Gesamtabflüsse im Frühjahr, was letztlich eine ebenfalls verringerte Grundwasserneubildung insbesondere in Bayern aber auch in Baden-Württemberg bewirkt.

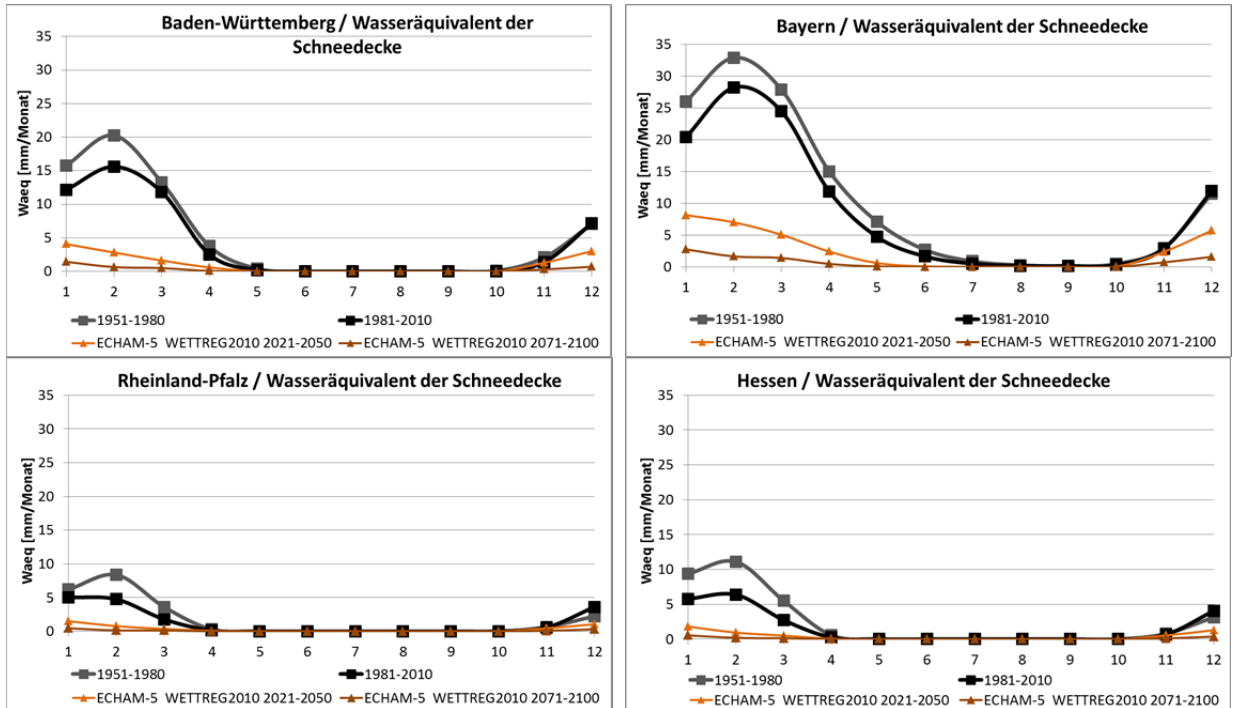


Abb. 4.6: Jahrgang des Wasseräquivalents der Schneedecke auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.



5 Sensitivität der Grundwasserneubildung in den Naturräumen - Auswirkungen auf die Grundwasserbewirtschaftung

5.1 Charakteristik der Wasserhaushaltskomponenten für nasse und trockene Dekaden

Naturgemäß lagen im Zeitraum 1951-2015 keine konstanten meteorologischen Bedingungen in den vier Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz vor (Kap. 3.2). Neben der beobachteten Temperaturzunahme seit Beginn der 1990er Jahre kam es zu Schwankungen der jährlichen und mehrjährigen Niederschlagsmengen, so dass sich zeitweise Nass- und Trockenperioden über Zeiträume von rund 6 bis 10 Jahren abwechselten. Während die tatsächlichen Verdunstungsraten prinzipiell nur geringe Variabilitäten aufweisen (vgl. Kap. 3.2.3), haben die Änderungen des Niederschlagsdargebots weitreichende Auswirkungen auf die Wasserbilanz und somit alle anderen Wasserhaushaltsgrößen. Dies betrifft in besonderer Weise den empfindlich reagierenden Wasserbilanzrest Grundwasserneubildung aus Niederschlag (im weiteren Text als „Grundwasserneubildung“ bezeichnet). Die beobachtete Niederschlagsdynamik führt daher letztlich zu einem stark variablen und schwankenden Verlauf von Quellschüttungs- und Grundwasserstandsganglinien über den 65-jährigen Gesamtzeitraum. Dies lässt sich sehr anschaulich an der Langzeitentwicklung von vier ausgewählten Messstellen (Grundwasserstände, Quellschüttungen) nachvollziehen. Dabei wird offensichtlich, dass neben langen Überschuss-/Defizitphasen nur wenige Jahre mittlere Grundwasserverhältnisse widerspiegeln (Abb. 5.1).

Bei Betrachtung der Wasserhaushaltskomponenten auf Basis der REGNIE-Niederschläge zeigt sich für die vier Bundesländer eine regional unterschiedliche Sensitivität der mittleren Grundwasserneubildung gegenüber Wasserbilanzänderungen. Die maximale dekadische Variabilität bezogen auf die Grundwasserneubildung für die Bundesländer zeigt Abb. 5.2. Gegenübergestellt wurden hier das vieljährige Mittel (1951-2010) sowie die Dekade mit der jeweils höchsten (Nassdekade: Bayern 1993-2002, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen 1979-1988) und geringsten Grundwasserneubildung (Trockendekade: 2003-2012).

So weist im vieljährigen Mittel (1951-2010) Baden-Württemberg geringfügig höhere Jahresniederschläge als Bayern auf, welche jedoch durch höhere Temperaturen und somit höhere tatsächliche Verdunstungsraten ausgeglichen werden. Dementsprechend ist der Gesamtabfluss in beiden Ländern sehr ähnlich, während die Grundwasserneubildung im Landesdurchschnitt in Bayern mit 206 mm/a etwas höher als in Baden-Württemberg mit 187 mm/a ist. Durch die insgesamt relativ hohen Niederschläge zeigt sich die Grundwasserneubildung in beiden Ländern mit Rückgängen zwischen -12 bzw. -16 % während der Trockendekade im Vergleich zum vieljährigen Mittel mäßig sensitiv. Entsprechend führt auch die jeweilige Nassdekade zu einem mäßigen Anstieg der Grundwasserneubildung zwischen +14 % in Bayern und +20 % in Baden-Württemberg.

Bei nur etwas geringeren tatsächlichen Verdunstungsraten, aber rund -16 bis -20 % niedrigeren Jahresniederschlägen ist die mittlere Grundwasserneubildung in Rheinland-Pfalz und Hessen deutlich geringer. Diese erreicht mit rund 104 bzw. 109 mm/a nur etwas mehr als die Hälfte der beiden Nachbarländer Bayern und Baden-Württemberg. Demnach zeigt sich auch die Grundwasserneubildung während der Trockendekade mit Rückgängen von ca. -23 % gegenüber dem vieljährigen Mittel (1951-2010) deutlich sensitiver. Diese erhöhte Sensitivität der Grundwasserneubildung in Hessen und Rheinland-Pfalz wird durch den Anstieg um ca. +30 % während der Nassdekade bestätigt.

Vergleichbare Betrachtungen der Wasserhaushaltskomponenten für die einzelnen Naturräume sind als Steckbriefe im digitalen Anhang enthalten.

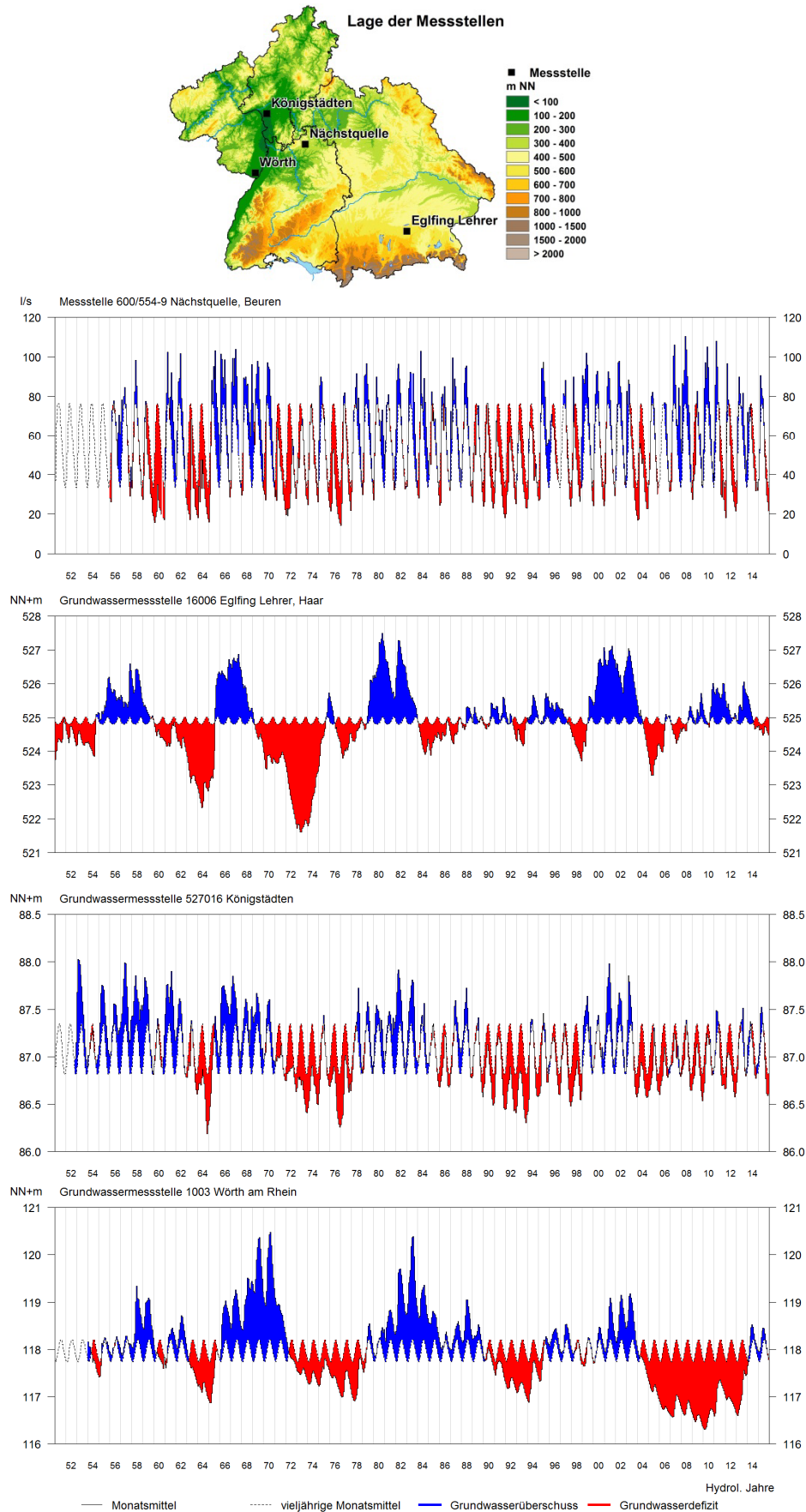


Abb. 5.1: Grundwasserstandsganglinien und Quellschüttungsganglinie im Zeitraum 1951-2015 mit Darstellung der Jahre mit Grundwasserüberschuss (blau) und Grundwasserdefizit für vier ausgewählte Messstellen in den vier Bundesländern.



Abb. 5.2: Bandbreiten der Wasserhaushaltskomponenten bezogen auf Nass- und Trockendekaden für die vier Bundesländer. Datengrundlage: REGNIE-Niederschläge.

5.2 Klassifizierung der Variabilität der Grundwasserneubildung

Die gezeigte unterschiedliche Sensitivität der Grundwasserneubildung der Bundesländer (Abb. 5.2) gegenüber Änderungen der Wasserbilanzgrößen wird bei Betrachtung einzelner Naturräume sowie einzelner Trockenjahre noch deutlicher. In Tab. 5.1 wird daher der prozentuale Wert der Grundwasserneubildung des jeweiligen 10-Jahres Zeitraumes mit den geringsten Grundwasserneubildungsraten (Trockendekade) und den höchsten Grundwasserneubildungsraten (Nassdekade) im Vergleich zum vieljährigen Mittel (1951-2010) dargestellt. Anhand des Wertes für die Trockendekade wird eine Klassifizierung (Klasse 1 bis Klasse 3) vorgenommen, welche für jeden Naturraum die maximale Variabilität der Grundwasserneubildung, und somit die Sensitivität gegenüber Änderungen der Wasserbilanzgrößen, beschreibt. Im Wesentlichen verhält sich die Sensitivität der einzelnen Naturräume gegenüber Trocken- und Nassdekaden ähnlich. Auffällig ist eine Häufung der Trockendekaden in der jüngeren Vergangenheit, so dass insgesamt rund 60 % der Naturräume die geringsten Grundwasserneubildungsraten zwischen 2003-2015 aufweisen.

Tab. 5.1: Variabilität der Grundwasserneubildung innerhalb der KLIWA-Naturräume (Nassdekade, Trockendekade, Trockenjahre) und Klassifizierung auf Basis der jeweiligen Trockendekade. Bezugszeitraum: 1951-2010.

Klasseneinteilung für den Vergleich Trockendekade mit vieljährigem Mittel 1951-2010			GWN (%)	GWN (%)		GWN (%)	GWN (%)
Klasse		Naturraum	Nassdekade im Vergleich zu 1951-2010	Trockendekade im Vergleich zu 1951-2010	Trockendekade	Trockenjahr 2003 im Vergleich zu 1951-2010	Trockenjahr 2015 im Vergleich zu 1951-2010
1	bis -15%	1	110	89	2003-2012	67	78
1	bis -15%	9	116	87	1953-1962	59	61
1	bis -15%	5	116	86	1955-1964	64	64
1	bis -15%	7	118	85	1955-1964	68	69
2	bis -25%	14	121	84	2003-2012	54	63
2	bis -25%	11	122	84	2003-2012	57	61
2	bis -25%	13	124	83	2006-2015	57	62
2	bis -25%	8	117	83	2006-2015	54	60
2	bis -25%	25	128	82	1969-1978	70	76
2	bis -25%	6	120	81	1955-1964	64	67
2	bis -25%	2	116	81	2003-2012	54	70
2	bis -25%	3	118	81	2003-2012	50	69
2	bis -25%	20	128	81	2003-2012	70	72
2	bis -25%	23	133	80	2003-2012	70	84
2	bis -25%	10	120	80	1955-1964	63	63
2	bis -25%	12	119	80	1971-1980	62	59
2	bis -25%	22	120	80	2003-2012	64	75
2	bis -25%	4	117	79	2003-2012	36	64
2	bis -25%	21	125	78	1953-1962	78	75
2	bis -25%	28	125	78	1971-1980	57	56
2	bis -25%	15	128	77	2003-2012	35	45
2	bis -25%	27	128	77	2006-2015	52	49
2	bis -25%	19	126	76	1953-1962	67	52
3	< -25%	18	134	71	1953-1962	67	45
3	< -25%	30	122	71	1969-1978	58	51
3	< -25%	24	136	70	2006-2015	58	53
3	< -25%	29	123	68	1971-1980	61	49
3	< -25%	26	142	59	2003-2012	41	39
3	< -25%	17	137	53	2003-2012	64	41
3	< -25%	16	150	47	2003-2012	31	21
Bayern			114	88	2003-2012	59	68
Baden-Württemberg			120	84	2003-2012	53	65
Rheinland-Pfalz			131	77	2003-2012	67	61
Hessen			128	76	2003-2012	54	51

Klassifizierte Variabilität der Grundwasserneubildungsabnahme einer Trockendekade gegenüber dem langjährigen Mittel:

- In die Klasse 1 (gelb) werden die Naturräume eingeordnet, die mit Grundwasserneubildungsabnahmen bis -15 % mäßig sensitiv reagierten. Diese Naturräume liegen mit Ausnahme der „Schwäbischen Alb“ überwiegend in Bayern („Nordalpen“, „Ostbayerisches Kristallin“ und „Fränkische Alb“). Hierbei handelt es sich vor allem um niederschlagsreiche Regionen.
- In die Klasse 2 (orange) werden die Naturräume eingeordnet, die mit Grundwasserneubildungsabnahmen bis -25 % deutlich sensitiv reagierten. Diese Naturräume liegen überwiegend im westlichen Rheinland-Pfalz, in weiten Teilen Baden-Württembergs und Bayerns sowie im östlichen Hessen.
- In die Klasse 3 (rot) werden Naturräume eingeordnet, die mit Grundwasserneubildungsabnahmen von mehr als -25 % stark sensitiv reagierten. Diese Naturräume erstrecken sich ausgehend vom „Nördlichen Oberrheingraben“ und dem „Pfälzerwald“ über das „Mainzer Becken und Wetterau“ und den „Taunus“ nach Norden. Der Großteil der Naturräume in Klasse 3 liegt in Hessen.



Die vorgenommene Klassifizierung zeigt, dass die Naturräume in Baden-Württemberg und Bayern überwiegend eine mäßige bis deutliche Sensitivität aufweisen (Klasse 1 und 2), während die Naturräume in Hessen und Rheinland-Pfalz deutlich bis stark sensitiv gegenüber Klimaänderungen und somit Änderungen der Wasserbilanzgrößen reagieren (Klasse 2 und 3).

Vergleicht man die Grundwasserneubildung während der beiden Trockenjahre 2003 und 2015 mit dem jeweiligen vieljährigen Mittel, so liegt die Sensitivität im Mittel bei 58 % und 64 %. Die mittlere Grundwasserneubildung war somit 20 % und 26 % geringer als während der Trockendekade (84 %). Ein Großteil der Naturräume zeigt zwischen den beiden Jahren eine vergleichbare Sensitivität auf. Die deutlichsten Unterschiede treten im südlichen Bayern auf, wo die Grundwasserneubildung im Trockenjahr 2003 geringer ausfiel. Hingegen wiesen die Naturräume im südlichen Rheinland-Pfalz im Trockenjahr 2015 eine geringere Grundwasserneubildung auf. Dies kann anhand der jeweiligen räumlichen mittleren Niederschlagsverteilungen während der beiden Trockenjahre erklärt werden.

5.3 Mögliche Konsequenzen für die Abschätzung des nutzbaren Grundwasserdargebotes

Für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen ist das „nutzbare Grundwasserdargebot“ die entscheidende Bilanzgröße. Es wird durch die zeitlich variable Grundwasserneubildung und das Speichervermögen des Untergrundes bzw. die Ergiebigkeit des jeweiligen Grundwasservorkommens beschrieben. Zusätzliche Effekte, wie z.B. lateraler Zustrom, können die Bilanz beeinflussen.

Bisher wurden bei der Abschätzung des „nutzbaren Grundwasserdargebotes“ im Rahmen von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen in der Regel die langjährigen mittleren Grundwasserneubildungsraten verwendet. Wie aber in Kap. 5.1 und Kap. 5.2 gezeigt wurde, weisen die Naturräume eine unterschiedliche Sensitivität der Grundwasserneubildung gegenüber Klimaänderungen auf. Um dieser gerecht zu werden, wird anhand der in Kap. 5.2 getroffenen Klassifizierung für die jeweilige Trockendekade eine reduzierte Grundwasserneubildungsrate für jeden Naturraum abgeleitet (Tab. 5.1, Klasse 1 bis Klasse 3). Diese Größe entspricht näherungsweise dem Trockenwetterdargebot und sollte aus Nachhaltigkeitsgründen zukünftigen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen zu Grunde gelegt werden. Denkbar wäre ebenso, sich auf noch kürzere Zeitabschnitte bis hin zu Einzeljahren zu beziehen. Aus methodischen Gründen gelten die ermittelten Grundwasserneubildungsraten nur für das oberste Grundwasserstockwerk. Für tiefere Stockwerke können auf Grundlage der durchgeführten Betrachtungen keine Aussagen getroffen werden.

Das „nutzbare Grundwasserdargebot“ wird auch durch die Untergrundeigenschaften maßgeblich bestimmt. Während Kluftgrundwasserleiter (Festgesteine) ein meist nur geringes Speichervolumen von wenigen Prozent bzw. Liter pro Kubikmeter Gestein aufweisen und somit häufig gering ergiebig sind, können in Porengrundwasserleitern, bei einem spezifischen Speichervolumen von beispielsweise 16 %, bis zu 160 l Grundwasser pro m³ in den Lockergesteinen gespeichert werden. Durch das hohe nutzbare Speichervolumen können Wasserfassungen in Porengrundwasserleitern in Trockenzeiten grundsätzlich besser genutzt werden als in vergleichsweise gering ergiebigen Kluftgrundwasserleitern. Die Speichereigenschaften beziehungsweise Ergiebigkeiten sind daher bei der Diskussion von erforderlichen Anpassungen für zukünftige wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit zu berücksichtigen.

Anhand der in Abb. 5.3 dargestellten regionalen Ergiebigkeit werden daher die Naturräume hinsichtlich ihrer Eigenschaften des obersten Grundwasserstockwerks in drei Kategorien gegliedert. Zuerst werden vereinfachend alle Bereiche mit einer mittleren Ergiebigkeit < 5 l/s in der Kategorie „gering ergiebig“, und Bereiche mit einer mittleren Ergiebigkeit > 5 l/s in der Kategorie „ergiebig“ zusammengefasst. Anschließend werden Naturräume, die überwiegend innerhalb einer Kategorie liegen dieser zugeordnet. Naturräume die sowohl ergiebige als auch gering ergiebige Grundwasservorkommen zu einem erheblichen Anteil beinhalten, werden der Kategorie „teilweise gering ergiebig“ zugeordnet.

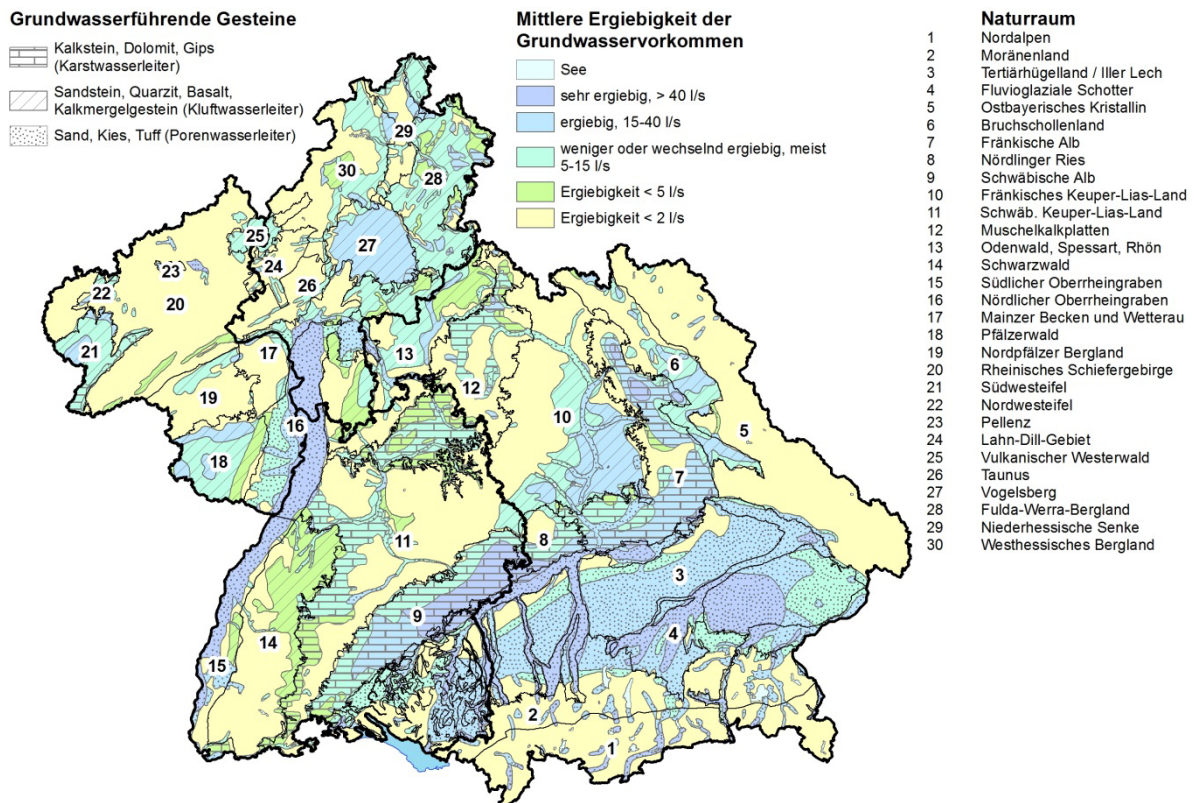


Abb. 5.3: Grundwasserführende Gesteine und Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie in Hessen (Quelle: Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen, Hydrologischer Atlas von Deutschland, (HAD)).

- In die Kategorie „gering ergiebig“ (< 5 l/s) fallen die Naturräume „Nordalpen“, „Moränenland“, „Ostbayerisches Kristallin“, „Schwarzwald“, „Mainzer Becken und Wetterau“, „Nordpfälzer Bergland“, „Rheinisches Schiefergebirge“, „Lahn-Dill-Gebiet“, „Taunus“ und „Niederhessische Senke“
- In die Kategorie „teilweise gering ergiebig“ (z.T. < 5 l/s) fallen die Naturräume „Bruchschollenland“, „Fränkisches Keuper-Lias-Land“, „Muschelkalkplatten“, „Nördlinger Ries“, „Schwäbisches Keuper-Lias-Land“, „Odenwald, Spessart und Rhön“ und „Westhessisches Bergland“
- In die Kategorie „ergiebig“ (> 5 l/s) fallen die Naturräume „Tertiärhügelland und Iller-Lech Schotterplatten“, „Fluvioglaziale Schotter“, „Fränkische Alb“, „Schwäbische Alb“, „südlicher Oberrheingraben“, „nördlicher Oberrheingraben“, „Pfälzerwald“, „Südwesteifel“, „Nordwesteifel“, „Pellenz“, „Vulkanischer Westerwald“, „Vogelsberg“ und „Fulda-Werra-Bergland“.

Auf Grund des ohnehin geringen nutzbaren Dargebots können klimatisch bedingte Abnahmen der Grundwasserneubildung weitreichende Folgen für die Grundwassernutzung in gering ergiebigen Regionen haben. Speziell in Naturräumen mit geringeren Ergiebigkeiten sollte daher im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung, von der vieljährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate als Bemessungsgröße abgewichen werden. Stattdessen wird empfohlen, hier eine „reduzierte Grundwasserneubildungsrate“ anzusetzen. Dazu erfolgt in Abb. 5.4 sowie in Tab. 5.2 die Übertragung des Trockenwetterdargebots (Tab. 5.1) auf die Naturräume der Kategorie „gering ergiebig“ und „teilweise gering ergiebig“ (Abb. 5.3).



Abweichend zu den gering ergiebigen Bereichen wird empfohlen, für Naturräume mit ergiebigen Grundwasservorkommen eine Beurteilung auf Basis von Einzelfallbetrachtungen vorzunehmen. Hierzu sollte die jeweilige Höhe der Grundwasserneubildung und des tatsächlichen Grundwasserdargebots sowie der Umfang bereits bewilligter Entnahmen für eine individuell anzusetzende „reduzierte Grundwasserneubildungsrate“ als Bemessungsgröße berücksichtigt werden.

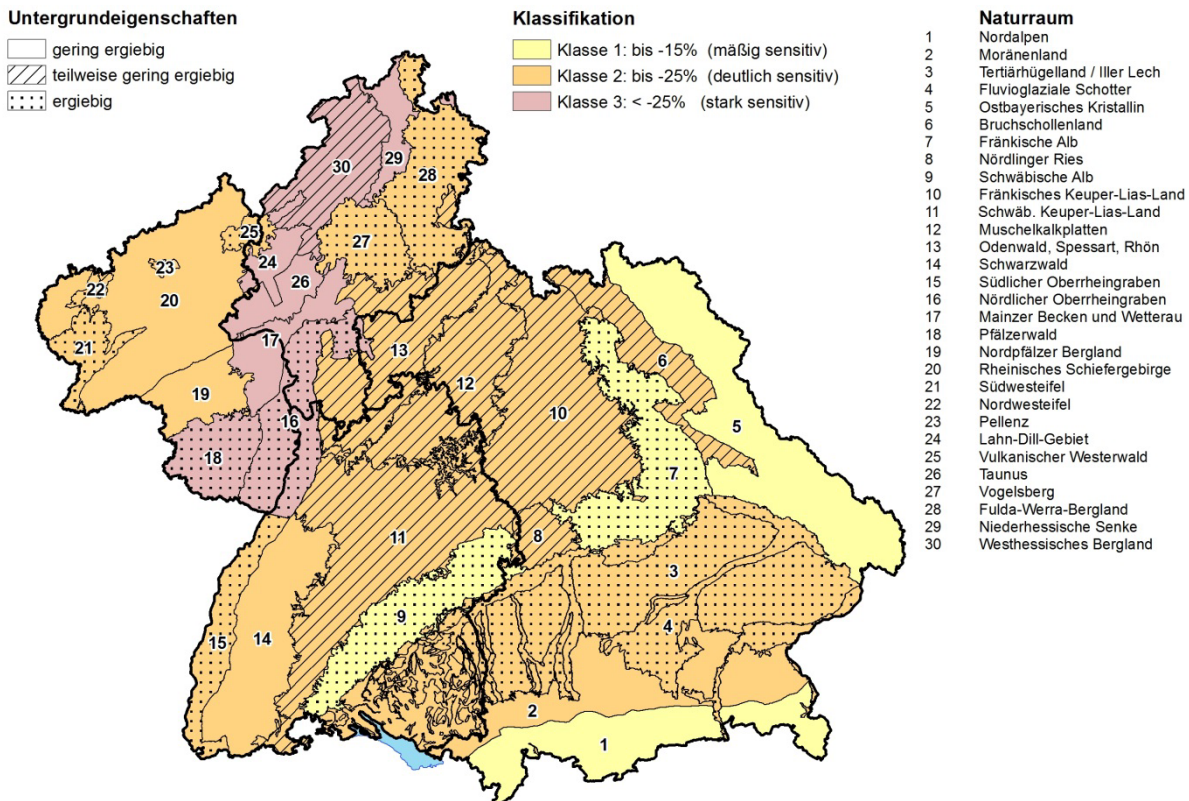


Abb. 5.4: Abweichung des Trockenwetterdargebots von der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung für „gering ergiebige“ und „teilweise gering ergiebige“ Grundwasserkörper auf Basis der jeweiligen Trockendekade.

Das in Tab. 5.2 definierte Trockenwetterdargebot für Naturräume mit Grundwasservorkommen der Kategorie „gering ergiebig“ und „teilweise gering ergiebig“ beruht ausschließlich auf der Abweichung der mittleren simulierten Grundwasserneubildung während einer Trockendekade und dem langjährigen Mittel. Es dient daher als eine erste Orientierungsgröße und ersetzt keine regionalen Detailstudien und Gutachten.

Beispielsweise zeigen die ergänzend zu den Ergebnissen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung (1951-2015) durchgeführten KLIWA-Fallstudien (Grundwasser) in Bayern mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen deutlichere Rückgänge als die in Kap. 5.2 abgeleitete Sensitivität. So betragen die zu erwartenden mittleren Rückgänge der sommerlichen Quellschüttungen auf Basis der regionalen Klimaprojektion WETTREG2010 in der nahen Zukunft (2021-2050) in gering ergiebigen Grundwasserleitern zwischen -22 und -37 %. Da in den Sommermonaten gleichzeitig der höchste Wasserbedarf sowohl für die öffentliche Trinkwasserversorgung als auch die landwirtschaftliche Bewässerung anfällt, zeigt sich anhand der Fallstudien die Notwendigkeit, gegebenenfalls ein regional angepasstes Trockenwetterdargebot zu Grunde zu legen. Dieses sollte, mit der Prämisse des Vorrangs der öffentlichen Wasserversorgung, eine nachhaltige Nutzung der Grundwasserressourcen erlauben.

Tab. 5.2: Vorgeschlagene Orientierungswerte zur Reduktion der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag in % in den „gering ergebnigen“ und „teilweise gering ergebnigen“ Naturräumen auf Basis des Trockenwetterdargebots. Die grau schraffierten Naturräume fallen in die Kategorie „teilweise gering ergebnig“. Für Naturräume mit ergebnigen Vorkommen wird empfohlen, aus Vorsorgegründen eine ggf. reduzierte Grundwasserneubildungsrate individuell anzusetzen.

Naturraum	Orientierungsgröße für eine zukünftige Reduktion der GWN (%)	Ergiebigkeit
1 Nordalpen 5 Ostbayerisches Kristallin	10	gering ergebnig
2 Moränenland 14 Schwarzwald 19 Nordpfälzer Bergland 20 Rheinisches Schiefergebirge		gering ergebnig
6 Bruchschollenland 3 Nördlinger Ries 10 Fränk. Keuper-Lias-Land 11 Schwäb. Keuper-Lias-Land 12 Muschelkaikplatten 13 Odenwald, Spessart, Rhön	20	teilweise gering ergebnig
17 Mainzer Becken und Wetterau 24 Lahn-Dill-Gebiet 26 Taunus 29 Niederhessische Senke 30 Westhessisches Bergland	30	gering ergebnig
3 Tertiärhügelland / Iller Lech 4 Fluvio-glaziale Schotter 7 Fränkische Alb 9 Schwäbische Alb 15 Südlicher Oberrheingraben 16 Nördlicher Oberrheingraben 18 Pfälzerwald 21 Südwesteifel 22 Nordwesteifel 23 Peilenz 25 Vulkanischer Westerwald 27 Vogelsberg 28 Fulda-Werra-Bergland	individuell anzusetzende reduzierte Grundwasserneubildungsrate	ergebnig



6 Hinweise und Handlungsempfehlungen für die Grundwasserbewirtschaftung in der nahen Zukunft

Der Klimawandel findet bereits statt (Kap. 3.2). Deshalb sind sowohl Anpassungsmaßnahmen für schon jetzt unvermeidliche Veränderungen angezeigt, als auch präventiv Klimaschutzmaßnahmen notwendig. Basierend auf den bisherigen Arbeiten von KLIWA und den Empfehlungen aus den Ländern werden die nachfolgenden Hinweise gegeben und Handlungsempfehlungen vorgeschlagen. Zu berücksichtigen ist, dass die ausgesprochenen Handlungsempfehlungen auf Basis der beobachteten Variabilität der Wasserhaushaltsgrößen, insbesondere der Grundwasserneubildung aus Niederschlag, in der Vergangenheit getroffen werden. Mögliche Änderungen auf Grund des ebenfalls stattfindenden demographischen Wandels werden hier nicht berücksichtigt.

Auch zeigen die Klimaprojektionen (ECHAM5-A1B WETTREG2006 und WETTREG2010) uneinheitliche Entwicklungen für die vier Bundesländer. Bei WETTREG2006 werden für die nahe Zukunft (2021-2050) geringfügig ansteigende Grundwasserneubildungsraten in Rheinland-Pfalz (+6 %) projiziert, während sie in Baden-Württemberg (+3 %) und Bayern (-2 %) nahezu unverändert bleiben (KLIWA 2012). Für Hessen wurde die Projektion WETTREG2006 nicht gerechnet. Bei WETTREG2010 wird für die nahe Zukunft hingegen bei steigenden Temperaturen und sinkenden Niederschlägen eine spürbare Verringerung der Grundwasserneubildungsrate zwischen -13 % in Rheinland-Pfalz, -22 % in Baden-Württemberg, -23 % in Bayern und -25 % in Hessen projiziert.

Allgemeine Handlungsempfehlungen

- Monitoringprogramme
Eine auf Nachhaltigkeit gegründete Wasserwirtschaftspolitik bedarf abgesicherter Kenntnisse über die Entwicklungen des Wasserhaushaltes und der Wasserqualität. Die bestehenden Messnetze und Monitoringprogramme zur Beobachtung der meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen, Güteparameter etc. sind konsequent fortzuführen und weiterzuentwickeln. Lange Beobachtungszeitreihen beschreiben die Entwicklung in der Vergangenheit und zeigen den Ist-Zustand, so dass mögliche Veränderungen frühzeitig erkannt werden können. Mit der Fortschreibung der Zeitreihen können Szenarioergebnisse validiert und bewertet werden.
- Flussgebietsbezogene Betrachtung
Eine flussgebietsbezogene integrative Betrachtungsweise ist wie bisher national und international weiter zu verfolgen. In den Maßnahmen- und Bewirtschaftungsplänen zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) und der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL) wird der Klimawandel zu berücksichtigen sein.
- Erfahrungen austauschen, Kommunikation, Bewusstseinsbildung
Die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder sollten ihre Erfahrungen in der Bewertung und der Verwendung regionaler Klimasimulationen austauschen, wie es z.B. bereits in KLIWA erfolgt, um Synergieeffekte zu erzielen und um zu möglichst abgestimmten Vorgehensweisen zu gelangen.

Eine breite Diskussion über die generellen gesellschaftlichen Ziele und die Anforderungen von Natur-, Umwelt- und Klimaschutz ist notwendig. Die Bürgerinnen und Bürger sollen verstehen können, wieso Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel erforderlich sind, wie sie helfen können und was getan wird, um die Gefahren für sie selbst zu minimieren.

Handlungsempfehlungen Grundwasserbewirtschaftung und Wasserversorgung

- Fortschreibung oder Neuaufstellung von wasserwirtschaftlichen Planungsgrundlagen (z.B. hydrologische Gutachten zur Wasserbilanz, regionale Bewirtschaftungspläne, Beregnungspläne, Wasserversorgungspläne, Ermittlung des Wasserbedarfs für die öffentliche Wasserversorgung, Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe)
- Beachtung des veränderten Wasserhaushaltes in Trockendekaden bei der Grundwasserbewirtschaftung durch Festlegung von Wasserrechten und/oder Ausweisung von Wasserschutzgebieten.
- Monitoring und nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung z. B. im Rahmen der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie.
- Vorsorge bei Ausweisung von Baugebieten in vernässungsgefährdeten Bereichen sowie in Regionen mit ausgedehnten sommerlichen Niedrigwasserperioden. Dies betrifft insbesondere die Ansiedelung intensiv wassernutzender Gewerbe- und Industriezweige in Gebieten mit potentiell temporärem Wassermangel.
- Förderung der interkommunalen Kooperationen und Wasserversorgungsverbände. Durch Weitergabe von Erfahrungen und Informationen können wasserwirtschaftliche Maßnahmen und Verbundprojekte optimiert werden.
- Bei Aufbau und Förderung regionaler Wasserverbände sind Leitungsstrukturen sowie Speicher- und Fördersysteme zu optimieren, um den Erhalt der Versorgungssicherheit in potenziellen Wassermangelgebieten zu gewährleisten.
- Sichern, Anpassen sowie Ausweisen von Wasserschutz-, Wasservorrang- und Wasservorbehaltsgebieten.
- Dezentrale Rückhaltung des Oberflächenwassers in der Fläche zur Grundwasseranreicherung. Diese Maßnahme kann sehr gut mit der Planung von Hochwasserrückhaltebecken (Flutpolder) kombiniert werden.

Informations- und Untersuchungsbedarf

- Bemessungsverfahren und Klimamodelle weiter verbessern
Aufgrund der Instationarität des Klimawandels besteht ein Bedarf an praxistauglichen Verfahren für eine angepasste Extremwertstatistik. Die Verbesserung globaler und regionaler Klimamodelle wird auch künftig weitergehen, neue Entwicklungen sind zu verfolgen und auf ihre Verwendbarkeit zu prüfen. Eine regelmäßige Rückkoppelung mit den Modellentwicklern ist notwendig.
- Bandbreiten abschätzen (Ensembletechnik)
Die Bewertung der Klimasimulationen ist Voraussetzung zur Verwendung in weiteren Untersuchungen. Zur Abschätzung der möglichen Bandbreite des Klimawandels sind unterschiedliche Klimamodelle mit belastbaren Ergebnissen und unterschiedliche Emissionsszenarien zu verwenden.



- Kriterien zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen
Aufgrund der unvermeidbaren Unsicherheiten sind für Anpassungsmaßnahmen, z.B. nach Vulnerabilität (Verletzbarkeit/Empfindlichkeit) des Schutzgutes oder nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten, Kriterien zur Umsetzung aufzustellen.
- Klimarobustheit prüfen
Projekte und Planungen, die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Gewässergüte haben (z. B. Hochwasserschutz, Baumaßnahmen, Wasserentnahmen, Kühlwassernutzung), sollten im Hinblick auf ihre Robustheit gegenüber Klimaveränderungen geprüft werden.

7 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse zur Entwicklung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung im Zeitraum 1951-2015 zeigen in einem überregionalen Kontext auf bereits stattfindende Änderungstendenzen hin und erlauben damit eine großräumige Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Bodenwasserhaushaltskomponenten und somit der Ressource Grundwasser im gesamten süddeutschen Raum. In Relation zu den nun vorliegenden, auf realen Beobachtungsdaten basierenden, simulierten Entwicklungstendenzen in den vergangenen 65 Jahren kann eine mögliche zukünftige Entwicklung mit Hilfe der bereits gerechneten Klimaprojektionen WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) (KLIWA 2012) und WETTREG2010 (ECHAM5/A1B) eingeordnet werden.

Die Identifikation möglicher Problembereiche an Hand der Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsmodellierung dient letztlich auch als Grundlage für vertiefte, räumlich höher aufgelöste Untersuchungen zur Ableitung regionaler Anpassungsmaßnahmen auf bereits stattfindende und auf zukünftig zu erwartende Änderungen des Wasserdargebots. Im Rahmen von KLIWA werden diese regional relevanten Einzelfragestellungen in Form von Fallstudien bearbeitet. Diese bilden einen wesentlichen Bestandteil des Themenbereichs Grundwasser innerhalb des Kooperationsvorhabens KLIWA. Der Schwerpunkt richtet sich hierbei auf die zukünftige Entwicklung von Quellschüttungen in potentiellen Problembereichen mit geringen Grundwasserergiebigkeiten. In diesen Bereichen hängt die lokale Versorgungssicherheit zu einem hohen Grad von der zukünftigen Entwicklung der Quellschüttungen ab. So traten in der Vergangenheit zum Teil bereits Versorgungsengpässe während (sommerlicher) Trockenperioden auf. Diese Gebiete werden im Rahmen der Fallstudien in Wasserhaushaltsmodellen, mit Fokus auf den Niedrigwasserabfluss in den Quellbereichen, abgebildet und anschließend mit Klimaprojektionen angetrieben. Abschließend bearbeitet sind bisher beispielsweise die Fallstudie Ilz / Bayerischer Wald, die Fallstudie Allgäu, die Fallstudie Nordostbayerisches Kristallin, die Fallstudie Oberpfälzer Wald, die Fallstudie Mangfall / Attel und die Fallstudie Mittelfranken. Darüber hinaus wurden exemplarisch Grundwasserstände (Fallstudie Lechtalaquifer) sowie stoffbezogene Themen unter geänderten klimatischen Randbedingungen in der Fallstudie Fichtelgebirge (STROHMEIER ET AL. 2013) und der Fallstudie Donauried (GUDERA 2013) bearbeitet.

Die aktuellen Emissionsszenarien und Globalmodelle liefern für die künftige Klimaentwicklung keine einheitliche Aussage, sondern eine Bandbreite möglicher Entwicklungen. Aufgrund der Unsicherheiten der globalen und regionalen Klimamodellierung sollten Aussagen zu den Folgen des Klimawandels langfristig nicht nur auf einzelne regionale Klimaprojektionen gestützt werden. Bei zukünftigen Impaktmodellierungen im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA wird im Themenbereich Grundwasser zur besseren Berücksichtigung der beschriebenen Bandbreite daher die gleichzeitige Betrachtung von mehreren Klimaprojektionen angestrebt. Entsprechende Ensemblesimulationen für den Bereich Boden- und Grundwasserhaushalt sind in Planung. Für den Bereich Boden- und Grundwasserhaushalt steht durch die in KLIWA vorgestellten länderübergreifenden Simulationen, erweitert um das Bundesland Hessen, ein einheitlicher methodisch-konzeptioneller Rahmen zur Verfügung, um mit vergleichsweise geringem Aufwand weitere regionale Szenariosimulationen durchzuführen und auszuwerten. Diese Ergebnisse werden die bereits vorliegenden Simulationsergebnisse ergänzen und zu einer besseren Einschätzung möglicher Bandbreiten in den vier Bundesländern beitragen.

Neben den oben erwähnten modellgestützten Untersuchungen wird auch die Betrachtung der aktuellen Entwicklung auf Basis von Messdaten ein weiteres wichtiges Thema bleiben. Hier ist insbesondere an eine Fortschreibung der in KLIWA-Heft 16 (KLIWA 2011) erstmals dargestellten und zwischenzeitlich bis 2015 aktualisierten Ergebnisse zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen (WILLEMS 2016) gedacht. Des Weiteren wird eine jährliche gemeinsame Fortführung der Langzeitsimulationsdaten 1951-2015 angestrebt.



8 Literatur

- DLR (2005): CORINE Land Cover 2000 – Europaweit harmonisierte Aktualisierung der Landnutzungsdaten für Deutschland. Abschlussbericht zum F+E Vorhaben UBA FKZ 201 12 209. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum Oberpfaffenhofen, Wessling, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau.
- GUDERA, T. (2013): Fallstudie Donauried - Auswirkung der Klimawandels auf die Entwicklung der Nitratbelastung im Grundwasser. – KLIWA-Berichte Heft 19, 5. KLIWA-Symposium am 6. und 7. Dezember 2012 in Würzburg: S. 210-226.
- 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.
- KLIWA (2011): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Berichte Heft 16, Karlsruhe, Hof, Mainz.
- KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. KLIWA-Berichte Heft 17, Karlsruhe, Hof, Mainz.
- MORHARD, A. (2009): Simulation des Bodenwasserhaushalts und Ermittlung der flächenhaften Grundwasserneubildung auf Grundlage der regionalen WETTREG Klimaszenarien für die Länder Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (unveröffentlicht), GIT HydroS Consult GmbH im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Hof.
- MORHARD, A. (2011): KLIWA / flächenhafte Grundwasserneubildung (ergänzende Auswertungen) - Abgleich gegen KLIWA Heft 14 "Niedrigwasser" (unveröffentlicht), GIT HydroS Consult GmbH im Auftrag der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- MORHARD (2013): Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und flächenhafter Grundwasserneubildung 1951-2010. – Unveröffentl. Gutachten im Auftrag der KLIWA AG Grundwasser. – GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg
- 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
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarios B1, A1B und A2, Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des UBA, Dessau.
- STROHMEIER, S., KNORR, K.-H., REICHERT, M., FREI, S., FLECKENSTEIN, J.H., PEIFFER, S. & MATZNER, E. (2013): Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: insights from high frequency measurements, Biogeosciences 10, 905-916, DOI: 10.5194/bg-10-905-2013
- UBA (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG, Dessau.
- WaBoA (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 3. Auflage, Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.
- WILLEMS (2016): Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz – Fortschreibung aus dem Jahr 2007/2008 - (unveröffentlicht), IAWG Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik, Ottobrunn im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Hof.



Verwendete Abkürzungen

BFI	Baseflow-Index
BK	Bodenkarte
BÜK	Bodenübersichtskarte
CORINE	Coordinated Information on the European Environment
DHM	Digitales Höhenmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECHAM	Am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg und von der Universität Hamburg auf der Grundlage des europäischen Wettervorhersage Modells entwickeltes globales Klimamodell (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF, Hamburg)
ECHAM5	Modellversion 5 (seit 2004)
GWM	Grundwassermessstelle
GWN-BW	Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushalts und Ableitung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag
GWN	Grundwasserneubildung aus Niederschlag
HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
KLIWA	Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft
nFK	Nutzbare Feldkapazität
nFKWe	Nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum
REGNIE	Regionalisierung von Niederschlagshöhen, Methode DWD
WETTREG bzw. WET	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode
WETTREG2006	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode Entwicklungsstand 2006
WETTREG2010	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode Entwicklungsstand 2010
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie



Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1:	Modularer Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und schematische Darstellung der benötigten Eingangsdaten.....	12
Abb. 2.2:	Grundkonzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.	13
Abb. 2.3:	Verteilung der Geländehöhen im Untersuchungsgebiet, Angaben in m NN.	14
Abb. 2.4:	Landnutzungsverteilung (CORINE Land Cover 2000) im Untersuchungsgebiet (DLR 2005).....	14
Abb. 2.5:	Verteilung der nutzbaren Feldkapazität bis 1 m Bodentiefe nach Bodenübersichtskarten 1:200 000 für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, 1:1 Mio. für Bayern und 1:50 000 für Hessen. Angaben in mm.	15
Abb. 2.6:	Mittlerer jährlicher Niederschlag. Ermittelt auf Basis der unkorrigierten REGNIE- Daten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	17
Abb. 2.7:	Mittlerer jährlicher Niederschlag. Ermittelt auf Basis der unkorrigierten Stationsdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	17
Abb. 2.8:	Absolute Differenz des mittleren jährlichen Niederschlags für den Zeitraum 1971-2000. REGNIE – Stationsdaten. Angaben in mm/a.	17
Abb. 3.1:	Darstellungsebenen naturräumlich-hydrogeologische Einheiten (n=30) und Länder (n=4) für die räumliche Auswertung der GWN-BW-Simulationsergebnisse.	19
Abb. 3.2:	Mittlere jährliche Lufttemperatur und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in °C.	21
Abb. 3.3:	Entwicklung der jährlichen Lufttemperatur auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in °C.	23
Abb. 3.4:	Innerjährliche Verteilung der Lufttemperatur im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben in °C.	23
Abb. 3.5:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Lufttemperatur auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in °C.	24
Abb. 3.6:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Lufttemperatur auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraumes 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in °C.	24
Abb. 3.7:	Trenddreiecke für die Jahrestemperatur im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	25
Abb. 3.8:	Mittlere jährliche Niederschlagshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.	26
Abb. 3.9:	Entwicklung des jährlichen Niederschlags auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.	28
Abb. 3.10:	Innerjährliche Verteilung der Niederschlagshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	29
Abb. 3.11:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Niederschlagshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	29
Abb. 3.12:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Niederschlagshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraums 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	30
Abb. 3.13:	Trenddreiecke für den Niederschlag im hydrologischen Winterhalbjahr im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	30
Abb. 3.14:	Mittlere jährliche Verdunstungshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.	31
Abb. 3.15:	Entwicklung der jährlichen tatsächlichen Verdunstung auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.	34
Abb. 3.16:	Innerjährliche Verteilung der potentiellen Verdunstungshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen. .	34
Abb. 3.17:	Innerjährliche Verteilung der tatsächlichen Verdunstungshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen. .	35

Abb. 3.18:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der tatsächlichen Verdunstungshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	35
Abb. 3.19:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der tatsächlichen Verdunstungshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraums 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	36
Abb. 3.20:	Trenddreiecke für die potentielle Verdunstungshöhe im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	36
Abb. 3.21:	Trenddreiecke für die tatsächliche Verdunstungshöhe im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	37
Abb. 3.22:	Mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.	38
Abb. 3.23:	Entwicklung der jährlichen Gesamtabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.	40
Abb. 3.24:	Innerjährliche Verteilung der Gesamtabflusshöhe im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	41
Abb. 3.25:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Gesamtabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	41
Abb. 3.26:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Gesamtabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraums 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	42
Abb. 3.27:	Trenddreiecke für die Gesamtabflusshöhe im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	42
Abb. 3.28:	Mittlere jährliche Direktabflusshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.	43
Abb. 3.29:	Entwicklung der jährlichen Direktabflusshöhe auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.	45
Abb. 3.31:	Mittlere jährliche Grundwasserneubildungshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a.	47
Abb. 3.32:	Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.	49
Abb. 3.33:	Trenddreiecke für die Grundwasserneubildung im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	50
Abb. 3.34:	Beispiel für den Abgleich zwischen simulierter Grundwasserneubildung (Sickerwasserrate) [mm/a] und Grundwasserstand [m NN] bzw. Quellschüttung [l/s]. Dargestellt sind die GWM Rielasingen (a) die GWM Pankofen (b), die GWM Rittersdorf (c) sowie die Quelle Wörrstadt (d).	51
Abb. 3.35:	Mittlerer jährlicher Trockenheitsindex und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in Tage/a.	53
Abb. 3.36:	Entwicklung des jährlichen Trockenheitsindex auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in Tage/a.	55
Abb. 3.37:	Innerjährliche Verteilung des Trockenheitsindex im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	56
Abb. 3.38:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung des Trockenheitsindex auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	56
Abb. 3.39:	Mittlere innerjährliche absolute Änderung des Trockenheitsindex auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraumes 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	57
Abb. 3.40:	Trenddreiecke für den Trockenheitsindex im Sommerhalbjahr im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	58



Abb. 3.41:	Mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März und relative Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm und %.....	59
Abb. 3.42:	Entwicklung des jährlichen Wasseräquivalents der Schneedecke auf der Fläche der vier Bundesländer über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm.	61
Abb. 3.43:	Innerjährliche Verteilung des Wasseräquivalents der Schneedecke im vieljährigen Mittel 1951-2010 auf der Fläche der vier Bundesländer. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum.	61
Abb. 3.44:	Mittlere innerjährliche relative Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich der Dekade 2001-2010 mit dem vieljährigen Mittel der Periode 1951-2010. Angaben als Änderung in % über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Änderungen in %. Abweichend zu den anderen Wasserhaushaltskomponenten sind hier, auf Grund der teils sehr geringen absoluten Mengen, die relativen Änderungen dargestellt. In grau dargestellte Monate sind schneefrei.	62
Abb. 3.45:	Mittlere innerjährliche relative Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke auf der Fläche der vier Bundesländer. Vergleich des Zeitraumes 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Änderung in % über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Änderungen in %. In grau dargestellte Monate sind schneefrei.	62
Abb. 3.46:	Trenddreiecke der Schneedecke im Winterhalbjahr im Gesamtzeitraum 1951-2015 in den vier Bundesländern.	63
Abb. 4.1:	Jahresgang der Lufttemperatur auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben zur Lufttemperatur in °C.	65
Abb. 4.2:	Jahresgang der Niederschlagshöhe auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.	67
Abb. 4.3:	Jahresgang der Verdunstungshöhe auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.	69
Abb. 4.4:	Jahresgang der Gesamtabflusshöhe auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.	71
Abb. 4.5:	Jahresgang des Trockenheitsindex auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in Tage/Monat.	75
Abb. 4.6:	Jahresgang des Wasseräquivalents der Schneedecke auf Grundlage von 30-jährigen Monatsmittelwerten für die Vergangenheit (1951-1980 und 1981-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/Monat.	77
Abb. 5.1:	Grundwasserstandsganglinien und Quellschüttungsganglinie im Zeitraum 1951-2015 mit Darstellung der Jahre mit Grundwasserüberschuss (blau) und Grundwasserdefizit (rot) für vier ausgewählte Messstellen in den vier Bundesländern.	79
Abb. 5.2:	Bandbreiten der Wasserhaushaltskomponenten bezogen auf Nass- und Trockendekaden für die vier Bundesländer. Datengrundlage: REGNIE-Niederschläge. .	80
Abb. 5.3:	Grundwasserführende Gesteine und Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie in Hessen (Quelle: Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen, Hydrologischer Atlas von Deutschland, (HAD)).	83
Abb. 5.4:	Abweichung des Trockenwetterdargebots von der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung für „gering ergiebige“ und „teilweise gering ergiebige“ Grundwasserkörper auf Basis der jeweiligen Trockendekade.	84

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1:	Physiographische Datengrundlagen für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW in den vier Bundesländern.	13
Tab. 3.1:	Mittlere Lufttemperatur in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in °C.	22
Tab. 3.2:	Mittlere Niederschlagshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010, ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in mm/a und %.	27
Tab. 3.3:	Mittlere tatsächliche Verdunstung in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in mm/a und %.	33
Tab. 3.4:	Mittlere Gesamtabflusshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in mm/a und %.	40
Tab. 3.5:	Mittlere Direktabflusshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm/a und %.	45
Tab. 3.6:	Mittlere Grundwasserneubildungshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm/a und %.	49
Tab. 3.7:	Mittlerer Trockenheitsindex in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie seine zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten 5 Jahre. Angaben in Tage/a und %.	55
Tab. 3.8:	Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm und %.	60
Tab. 4.1.1:	Mittlere Lufttemperatur über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in °C.	65
Tab. 4.1.2:	Vergleich der mittleren Lufttemperatur aus Messdaten und Kontrolllauf in der Periode 1971-2000. Angaben in °C.	65
Tab. 4.2.1:	Mittlere Niederschlagshöhe über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.	66
Tab. 4.3.1:	Mittlere tatsächliche Verdunstung über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.	68
Tab. 4.4.1:	Mittlere Gesamtabflusshöhe über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.	70
Tab. 4.5.1:	Mittlere Direktabflusshöhe über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.	71
Tab. 4.6.1:	Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm/a und %.	72
Tab. 4.7.1:	Mittlerer Trockenheitsindex über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in Tage/a und %.	74
Tab. 4.8.1:	Mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke von Januar bis März über 30-Jahresperioden in der Vergangenheit (1951-2010) sowie für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100). Angaben in mm und %.	76
Tab. 5.1:	Variabilität der Grundwasserneubildung innerhalb der KLIWA-Naturräume (Nassdekade, Trockendekade, Trockenjahre) und Klassifizierung auf Basis der jeweiligen Trockendekade. Bezugszeitraum: 1951-2010.	81



Tab. 5.2:	Vorgeschlagene Orientierungswerte zur Reduktion der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag in % in den „gering ergebnigen“ und „teilweise gering ergebnigen“ Naturräumen auf Basis des Trockenwetterdargebots. Die grau schraffierten Naturräume fallen in die Kategorie „teilweise gering ergebnig“. Für Naturräume mit ergebnigen Vorkommen wird empfohlen, aus Vorsorgegründen eine ggf. reduzierte Grundwasserneubildungsrate individuell anzusetzen.	85
-----------	--	----

Anhang

Digitaler Anhang (CD)

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW werden in Heft 21 "Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015)" erläutert. Ergänzend dazu werden im digitalen Anhang auf beiliegender CD Ergebnisgrafiken für die verschiedenen räumlichen Gliederungen und alle ausgewerteten Zeiträume bereitgestellt.

Für die folgenden Datensätze liegen Auswertungen auf Ebene der Bundesländer und Naturräume vor:

- Homogenisierte Reihen (um Ausreißer und Lücken bereinigte Messdaten)
 - 1951-2015
 - 1951-1960
 - 1961-1970
 - 1971-1980
 - 1981-1990
 - 1991-2000
 - 2001-2010
 - Die Perioden 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2010 und 2011-2015 im Rahmen der Auswertungen anhand der Ringdiagramme

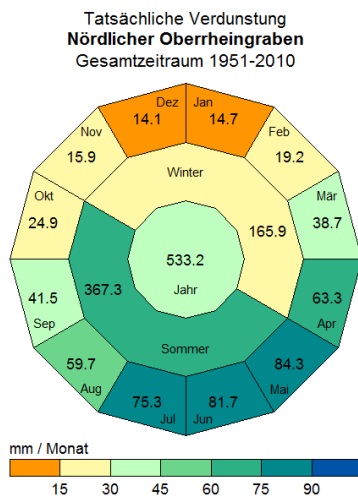
Für folgende Zeiträume liegen Auswertungen als Übersichtskarten auf Ebene der Grundflächen vor:

- Homogenisierte Reihen (um Ausreißer und Lücken bereinigte Messdaten) als Absolutwerte sowie gegebenenfalls als absolute und relative Differenz des jeweils betrachteten Zeitraums im Vergleich zum Gesamtzeitraum 1951-2010
 - Dekaden
 - Einzeljahre
 - hydrologische Sommerhalbjahre (November bis April)
 - hydrologische Winterhalbjahre (Mai bis Oktober)

Die Ringdiagramme präsentieren Mittelwerte über den jeweiligen Zeitraum in ihrer innerjährlichen Differenzierung (Monate, hydrologische Halbjahre), die Säulendiagramme zeigen Jahreswerte (bzw. hydrologische Halbjahre, Monate) über den Gesamtzeitraum (1951-2010) mit dem jeweiligen Mittelwert, Median sowie der 25- und 75-Perzentile. Die Trenddreiecke variieren die Anfangs- und Endzeiten des Zeitfensters in allen denkbaren Kombinationen. Damit wird die Abhängigkeit des Ergebnisses vom Betrachtungszeitraum objektiviert und eventuell vorhanden Trends können vollständig beurteilt werden. Die Mittelwerte über den jeweiligen Zeitraum (Gesamtperiode, Jahre, hydrologische Halbjahre) bzw. ihre Änderung für die einzelnen Zeiträume (Dekaden, Jahre, hydrologische Halbjahre) gegenüber dem Gesamtzeitraum 1951-2010 werden in Form von Karten zusätzlich in ihrer räumlichen Differenzierung dargestellt. Die Steckbriefe zeigen die berechneten Wasserhaushaltskomponenten für eine feucht- und eine trockene Dekade sowie das langjährige Mittel auf Basis der Naturräume.



Was zeigt ein Ringdiagramm?



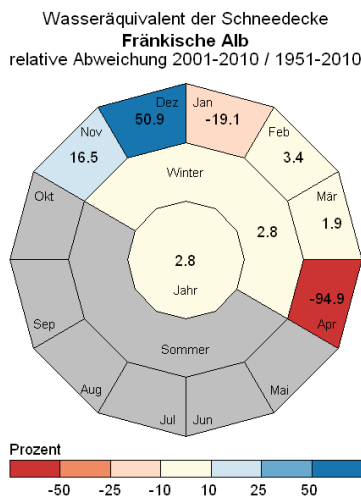
Die dreizeilige Überschrift beinhaltet stets den dargestellten Parameter in der oberen Zeile, die Auswerteregion in der mittleren Zeile sowie Angaben zum jeweiligen Datensatz (Zeitraum, ggf. absolute oder relative Änderung) in der unteren Zeile.

Ein Ringdiagramm besteht aus drei konzentrischen Bereichen. Der äußere Bereich mit 12 Feldern stellt mittlere Werte der einzelnen Monate dar, der mittlere Ring mit 2 Feldern repräsentiert den mittleren Wert für das hydrologische Sommer- und Winterhalbjahr, und das innerste Feld zeigt den Wert für das Gesamtjahr an.

Im Fall der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlagshöhe, tatsächliche Verdunstung, Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate gibt der Zahlenwert in allen Feldern die mittlere

Summe in Millimetern (das entspricht Liter pro Quadratmeter) für den jeweiligen Zeitraum an, also im äußeren Ring "mm/Monat", im mittleren Ring "mm/hydrologisches Halbjahr" und im inneren Bereich "mm/Jahr". Dies gilt ebenso für den Trockenheitsindex, wobei es sich hier jeweils um „Tage/Zeitraum“ handelt, an welchen die Bodensättigung geringer als 30 % der nutzbaren Feldkapazität nFK_{WE} ist.

Im Fall der Lufttemperatur ist eine Summenbildung nicht sinnvoll, daher wird hier jeweils der Mittelwert für den entsprechenden Zeitraum angegeben. Ähnlich wird bei der Schneedecke vorgegangen. Hier steht der Wert für das mittlere Wasseräquivalent des Schneespeichers im jeweiligen Zeitraum.



Die Farben der Felder entsprechen stets der Skala am unteren Rand des Diagramms und beziehen sich immer auf Monatsmittelwerte. Eine mittlere Jahresverdunstung von 533 mm fällt in die Klasse "30 bis 45 mm/Monat" ($522/12 = 44.4$), 166 mm im Winterhalbjahr entsprechen einem mittleren Monatswert von 28 mm.

Bei den Größen Trockenheitsindex und Wasseräquivalent der Schneedecke treten bei der Berechnung von relativen Änderungen Nulldivisionen auf. Die entsprechenden Werte sind nicht bestimmbar, die Felder im Ringdiagramm sind daher grau eingefärbt und enthalten keinen Wert für die relative Änderung.

Was zeigt ein Säulendiagramm?

Die zweizeilige Überschrift beinhaltet stets in der oberen Zeile den dargestellten Parameter mit der entsprechenden Einheit sowie die Auswerteregion und der betrachtete Zeitraum in der unteren Zeile.

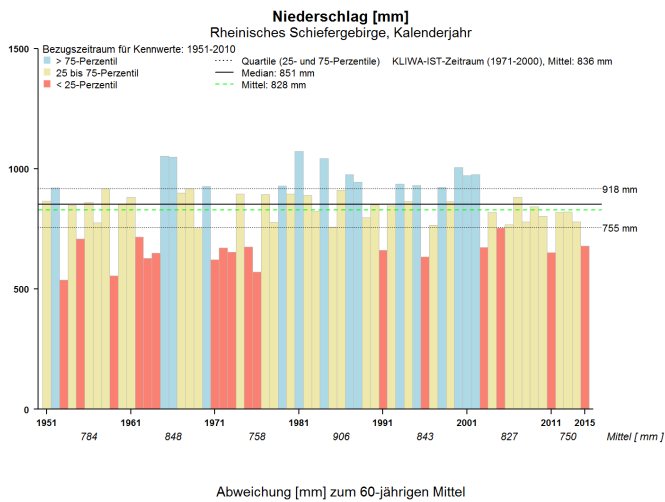
Das Säulendiagramm besteht aus zwei Teilgraphiken:

- **Teil 1:** In der oberen Abbildung sind die 65 Absolutwerte des jeweils betrachteten Zeitraums (Jahres-, Halbjahres- und Monatswerte) im Gesamtzeitraum (1951-2015) dargestellt.

Zusätzliche Kenngrößen:

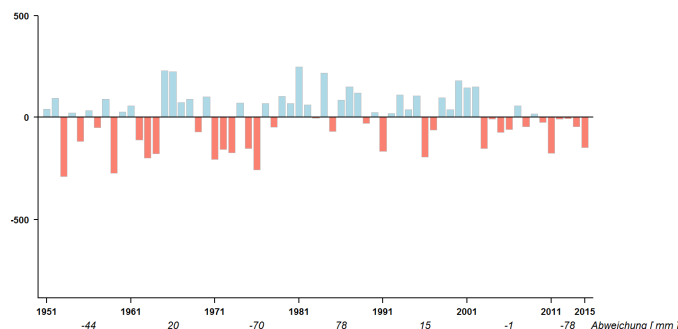
- Mittelwert (grün, gestrichelt)
- Median (schwarz, dick)
- 25- und 75-Perzentile (schwarz, dünn gepunktet). Einzelwerte unter dem 25-Perzentil sind rot, zwischen dem 25- und 75-Perzentil sind gelb und über dem 75-Perzentil sind blau markiert
- Mittelwert der Dekaden / Zeiträume unterhalb der x-Achse

- **Teil 2:** In der unteren Abbildung sind die absoluten Abweichungen der Einzelwerte vom Gesamtzeitraum (1951-2015) dargestellt. Abweichungen größer als der langjährige Mittelwert sind blau, Abweichungen geringer als der langjährige Mittelwert sind rot markiert.



Im Fall der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Verdunstung, Gesamtabfluss und Sickerung gibt der Zahlenwert die mittlere Summe in Millimetern (das entspricht Liter pro Quadratmeter) für den jeweils betrachteten Zeitraum an. Das gleiche gilt für den Trockenheitsindex, hier sind es jeweils Tage/Zeitraum, an denen die Bodensättigung geringer als 30 % ist.

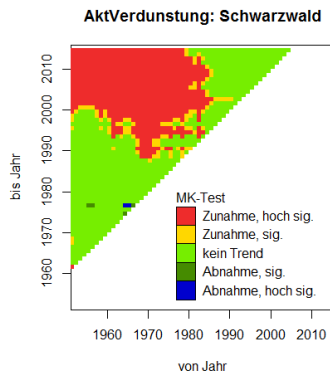
Im Fall der Temperatur ist eine Summenbildung nicht sinnvoll, hier wird jeweils der Mittelwert für den entsprechenden Zeitraum angegeben. Ähnlich wird bei der Schneedecke vorgegangen: hier steht der Wert für das mittlere Wasseräquivalent des Schneespeichers im jeweiligen Zeitraum.





Was zeigt ein Trenddreieck?

Die Überschrift beinhaltet stets den dargestellten Parameter, die gezeigte Auswerteregion sowie gegebenenfalls das betrachtete hydrologische Halbjahr.



Ein Trenddreieck variiert die Anfangs- und Endzeiten des Zeitfensters in allen denkbaren Kombinationen. Damit wird die Abhängigkeit des Ergebnisses vom Betrachtungszeitraum objektiviert und eventuell vorhandenen Trends können vollständig beurteilt werden.

Anhand des Mann-Kendall-Tests werden Veränderungsmuster für alle denkbaren Zeitfenster auf Ihre statistische Signifikanz beurteilt. Das Unterschreiten einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% wird dabei als signifikant und das Unterschreiten von 1% als hochsignifikant betrachtet.

In dem hier gezeigten Beispiel (jährliche aktuelle Verdunstung, Schwarzwald) erkennt man,

- dass es Veränderungsmuster gibt, die der Mann-Kendall-Test als (hoch)signifikant beurteilt,
- dass es etwa seit dem Jahr 1990 zu einer hochsignifikanten Zunahme der aktuellen Verdunstungswerte kam,
- dass es bis zum Jahr 1990 im Wesentlichen keine Trends bei der aktuellen Verdunstung gab.

Die verwendeten Farben kennzeichnen dabei die Art des jeweiligen Trends:

- rot: hoch signifikant zunehmender Trend
- gelb: signifikant zunehmender Trend
- hellgrün: kein Trend vorhanden
- dunkelgrün: signifikant abnehmender Trend
- blau: hoch signifikant abnehmender Trend

Bisher erschienene KLIWA-Berichte

Herausgeber: Arbeitskreis KLIWA

(Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg;
Bayerisches Landesamt für Umwelt;
Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz;
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Gaststatus)
und Deutscher Wetterdienst)

- Heft 1: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe, 278 S., ISBN 3-88251-279-2, Karlsruhe 2001.
- Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 98 S., ISBN 3-88251-284-9, Karlsruhe 2002.
- Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88251-286-5, Karlsruhe 2003.
- Heft 4: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg, 249 S., ISBN 3-937911-16-2, München 2004.
- Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, 76 S., ISBN 3-937911-17-0, München 2005.
- Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, 88 S., ISBN 3-937911-18-9, München 2005.
- Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, 160 S., ISBN 3-937911-19-7, München 2005.
- Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88148-412-4, Offenbach 2006.
- Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, 100 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe 2006.
- Heft 10: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, 256 S., ISBN 978-3-88251-325-7, Karlsruhe 2007.
- Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007. 312 4. KLIWA-Symposium 2009
- Heft 12: Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern, 147 S., ISBN 978-3-88148-429-9, Offenbach 2008.
- Heft 13: Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 128 S., ISBN 978-3-88251-345-5, Karlsruhe 2009.



- Heft 14: Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2009.
- Heft 15: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4.12.2009 in Mainz, 313 S., ISBN 978-3-933123-20-6, Mainz 2010.
- Heft 16: Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 148 S., ISBN 978-3-88251-362-2, Karlsruhe 2011.
- Heft 17: Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 112 S., ISBN 978-3-88251-363-9, Karlsruhe 2012.
- Heft 18: Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum, 154 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2012.
- Heft 19: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 5. KLIWA-Symposium am 6. und 7.12.2012 in Würzburg, 258 S., Hof 2013.
- Heft 20: Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern, 158 S., ISBN 978-3-88251-389-9, 2016.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>

