
Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

Untersuchungen auf Grundlage von
WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien

KLIWA-Projekt B 3.3.1

*Simulation der Grundwasserneubildung mit
regionalen Klimaszenarien*

KLIWA-Berichte

Heft 17



KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

Untersuchungen auf Grundlage von
WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien

KLIWA-Projekt B 3.3.1

*Simulation der Grundwasserneubildung mit
regionalen Klimaszenarien*

KLIWA-Berichte

Heft 17



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

IMPRESSUM

Herausgeber

Arbeitskreis KLIWA

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und
Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW),
Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU),
Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und
Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG),
Deutscher Wetterdienst (DWD)

www.kliwa.de

Herausgabedatum

Juni 2012

ISBN

978-3-88251-363-9

Bearbeitung

KLIWA-AG Grundwasser

Andrea Blomenhofer (BLfU)
Thomas Gudera (LUBW)
Dr. Jörg Neumann (BLfU)
Wolfgang Schwebler (LUWG)
Dr. Wolfgang Sprenger (BLfU)
Michel Wingerling (LUBW)

Grundlage

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

Druck

E&B engelhardt und bauer, 76131 Karlsruhe

Umwelthinweis

Druck auf Recyclingpapier

Dieses Heft ist klimaneutral gedruckt



Bezug über

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Natur-
schutz 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, Wasserwirtschaft und Gewerbe-
aufsicht Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Straße 7
55116 Mainz

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



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Veranlassung und Ziel.....	10
2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung.....	11
2.1 Beschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells	11
2.1.1 Regionalisierung meteorologischer Eingangsdaten.....	12
2.1.2 Schneemodul.....	13
2.1.3 Interzeption und Evapotranspirationsberechnung.....	14
2.1.4 Bodenmodul und kapillarer Aufstieg.....	15
2.1.5 Trockenheitsindex	16
2.2 Ermittlung der Grundwasserneubildung	16
2.2.1 Grundwasserneubildung aus Niederschlag	16
2.2.2 Baseflow-Index	17
3 Datenbasis und Datenaufbereitung	18
3.1 Physiographische Eingangsdaten	18
3.1.1 Landnutzung.....	18
3.1.2 Böden	20
3.1.3 Topographie	21
3.1.4 Grundwasserflurabstand und kapillarer Aufstieg	23
3.1.5 Baseflow-Index.....	25
3.2 Grundflächen.....	26
3.3 Klimadaten	28
3.3.1 Homogenisierte Zeitreihen	28
3.3.2 WETTREG-Szenariendaten	29
3.4 Initialisierung von Schneedecke und Bodenspeicher.....	31
4 Plausibilisierung der Modellergebnisse	34
4.1 Validierung an Abflussdaten.....	34
4.2 Abgleich mit den Ergebnissen von KLIWA-Heft 14 (Niedrigwasser).....	35
5 Untersuchungsergebnisse.....	37
5.1 Auswertungsumfang.....	37
5.1.1 Wasserbilanz- und Zustandsgrößen	37
5.1.2 Darstellungsebenen.....	38
5.1.3 Auswerteziträume und -methoden	39
5.2 Lufttemperatur	41
5.3 Niederschlag	43
5.3.1 Periode 1971-2000	43
5.3.2 Periode 2021-2050	45
5.4 Tatsächliche Verdunstung.....	47
5.4.1 Periode 1971-2000	47
5.4.2 Periode 2021-2050	49
5.5 Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate	51
5.5.1 Periode 1971-2000	51
5.5.2 Periode 2021-2050	54



5.6	Grundwasserneubildung.....	55
5.6.1	Periode 1971-2000	55
5.6.2	Periode 2021-2050	57
5.7	Trockenheitsindex	58
5.7.1	Periode 1971-2000	59
5.7.2	Periode 2021-2050	61
5.8	Wasseräquivalent der Schneedecke	62
5.8.1	Periode 1971-2000	62
5.8.2	Periode 2021-2050	64
5.9	Ergebnisse für die ferne Zukunft (2071-2100).....	65
5.10	Ergebnisse auf Basis von WETTREG2003	74
6	Diskussion der Ergebnisse – Handlungsempfehlungen für die Wasserwirtschaft	84
7	Ausblick	89
8	Literatur.....	91
	Verwendete Abkürzungen	93
	Verzeichnis der Abbildungen	94
	Verzeichnis der Tabellen	98
	Anhang.....	99
	Auswertungen zur dynamisierten Phänologie.....	99
	Digitaler Anhang (CD)	109
	Bisher erschienene KLIWA-Berichte	111

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 auf der Basis von regionalen Klimaszenarien dargestellt. Die zugrunde liegenden Berechnungen und Auswertungen wurden im Rahmen des Vorhabens KLIWA für die drei Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz durchgeführt. Dabei sollte aufgezeigt werden, ob und inwieweit Veränderungen von Komponenten des Bodenwasserhaushalts und insbesondere der Grundwasserneubildung als mögliche Folge des Klimawandels in der Zukunft zu erwarten sind.

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;
- **Grundwasserneubildung** als Bilanzkomponente, welche 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 Bodenwasserhaushalts sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. Die berechnete Sickerwassermenge entspricht in ebenen Porengrundwasserleitern, in denen schnelle laterale Abflusskomponenten vernachlässigt werden können, 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 des Niederschlags 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 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. Im Hinblick auf die durchzuführenden Klimaänderungssimulationen wurde für die Verdunstungsberechnung ein neues Schema für die Parametrisierung landnutzungsabhängiger Parameter verwendet, welches eine witterungsabhängige Beschreibung der Eintrittszeitpunkte phänologischer Entwicklungsphasen erlaubt („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.

Für die KLIWA-Untersuchungen wurde das Modell um die Ausgabe einer weiteren Ergebnis- bzw. Zustandsgröße des Bodenwasserhaushalts erweitert. Der „Trockenheitsindex“ beschreibt den mittleren Füllungszustand des Bodenwasserspeichers und ist ein Indikator für die Wasserverfügbarkeit im Boden. Als Schwellenwert wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg eine 30 %ige Füllung des Bodenwasserspeichers, bezogen auf die nutzbare Feldkapazität nFKWe definiert.

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 nach Datengrundlage und Methodik der Aufbereitung weitgehend länderübergreifende Konsistenz 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 166 466 Grundflächen mit jeweils einheitlicher Landnutzungs-nFKWe-Kombination, welche die drei Landesflächen mit insgesamt 126 170 km² abbilden.

Für die KLIWA-Szenarienrechnungen wurde ein WETTREG2006 (ECHAM5/A1B)-Datensatz (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode) mit 183 Klima- und 1 292 Niederschlagsstationen verwendet, der auch die an das KLIWA-Untersuchungsgebiet angrenzenden Bundesländer Saarland, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Thüringen sowie die Schweiz teilweise abdeckt. Es wurden Berechnungen für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) durchgeführt. Im Mittelpunkt der Auswertungen standen jedoch die Ergebnisse für die nahe Zukunft 2021-2050. Ergänzend wurden auf Grundlage des WETTREG2003 (ECHAM4/B2)-Szenariendatensatzes auch Berechnungen für Bayern und Baden-Württemberg durchgeführt.

Untersuchungsergebnisse

Als zentrale Untersuchungsergebnisse liegen Absolutwerte aller Größen für den Ist-Zustand (1971-2000) sowie absolute und prozentuale Änderungen für die beiden Zukunftszeiträume 2021-2050 und 2071-2100 vor. Der Ist-Zustand wird durch den sog. Kontrolllauf des jeweiligen regionalen Klimamodells beschrieben, der damit die Vergleichsgrundlage für sämtliche Simulationsergebnisse für die nahe und ferne Zukunft darstellt. Alle Ergebnisse wurden parameterspezifisch und differenziert nach Bundesländern, Naturräumen und KLIWA-Regionen aufbereitet. Mit Hilfe von Karten, Box-Plot-Darstellungen und Ringdiagrammen können sowohl Aussagen zur räumlichen Differenzierung als auch zu den statistischen Werteverteilungen und der innerjährlichen Dynamik getroffen werden. Insgesamt liegen mehr als 3 200 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, auf Grundlage von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) erzielten Ergebnisse für die nahe Zukunft lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Veränderung der Lufttemperatur

Die Lufttemperatur steigt im Szenario für die nahe Zukunft gegenüber dem Vergleichszeitraum räumlich einheitlich um knapp 1°C an. Die Veränderungen in den Monaten Dezember bis Februar zeigen die größten Abweichungen mit Werten von ca. 1.5°C. Bis auf den September (ca. 1°C) weisen alle anderen Monate nur geringe Temperaturzunahmen (< 1°C) auf.

Veränderung des Niederschlags

Für die nahe Zukunft werden verhältnismäßig geringe Änderungen des mittleren Jahresniederschlags in einer Größenordnung von maximal 50 mm/a prognostiziert. Bei Betrachtung der hydrologischen Halbjahre fallen die Unterschiede deutlicher aus. In den drei Bundesländern werden steigende Niederschläge im Winter und sinkende Niederschläge im Sommer projiziert, d. h. es erfolgt eine innerjährliche Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in das Winterhalbjahr. Bezogen auf einzelne Länder fällt die Zunahme der Winterniederschläge in Rheinland-Pfalz (plus 35 mm, entspricht 9 %) sowie die Abnahme der Sommerniederschläge in Bayern besonders auf (minus 35 mm, entspricht 6 %). Demgegenüber stehen geringe Änderungen der Sommerniederschläge in Rheinland-Pfalz (minus 15 mm, entspricht 4 %) und Winterniederschläge in Bayern (plus 15 mm, 4 %). Im monatlichen Vergleich kann dieses Klimaänderungssignal nochmals viel deutlicher ausfallen, mit starken Zunahmen, die in den nordwestlichen Teilen des Untersuchungsraumes z. T. mehr als 20 % betragen können.

Veränderung der tatsächlichen Verdunstung

Die projizierten Veränderungen der mittleren jährlichen Verdunstungshöhe sind für weite Teile Süddeutschlands vergleichsweise gering gegenüber dem Ist-Zustand. Markante Zunahmen der Verdunstung bis 20 mm/a ergeben sich in Zukunft hingegen für Eifel und Westerwald, wo auch die deutlichsten Niederschlagszunahmen auftreten. Die höheren Werte im südlichen Oberrheingraben und im Bereich der fluvioglazialen Schotter (Rhein und Donau mit südlichen Zuflüssen) sind in einer ähnlichen Größenordnung und gehen auf ergiebige Bodenspeicher zurück, durch die erhöhte Verdunstungsraten begünstigt werden. Die erwartete Zunahme der mittleren Verdunstung von bis zu 25 mm/a in Schwarzwald, Alpenvorland und Alpen ist ausschließlich auf die Temperaturzunahme zurückzuführen, da in diesen Regionen die Verfügbarkeit von Wasser unabhängig von der Niederschlagsentwicklung keinen limitierenden Faktor für die Verdunstung darstellt. Im Jahresgang nimmt die Verdunstung zukünftig von Dezember bis Mai temperaturbedingt auffällig zu. Demgegenüber zeigen die Sommermonate Juli und August im Zusammenhang mit Niederschlagsdefiziten einheitlich



abnehmende Verdunstungsraten. In Bayern und Baden-Württemberg werden die höheren Winterniederschläge durch erhöhte Verdunstung nahezu kompensiert.

Veränderung von Gesamtabfluss und Sickerwasserrate

Für die Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate ergeben sich auf Länderebene im Jahresmittel Abnahmen für Bayern und Baden-Württemberg (etwa 20 mm/a), während für Rheinland-Pfalz leichte Zunahmen von ca. 10 mm/a zu verzeichnen sind. Dies entspricht für alle drei Länder einer Änderung von 4-5 % im Jahresmittel. Die höchsten absoluten Abnahmen von fast 70 mm/a (entspricht rd. 6 %) werden im Bereich der Nordalpen erwartet. Dem stehen Zunahmen in Eifel und Hunsrück von rd. 25 mm/a gegenüber (entspricht 5-8 %). Bei Betrachtung der Änderungssignale in den hydrologischen Halbjahren zeigen sich in allen drei Bundesländern viel deutlichere Auswirkungen. Während im Sommerhalbjahr eine Tendenz zu spürbar geringeren Werten festgestellt werden kann (Bayern und Baden-Württemberg: über 20 mm/a, Rheinland-Pfalz: rd. 7 mm/a), treten im Winterhalbjahr vor allem in Folge der erhöhten Niederschläge auch etwas höhere Gesamtabflüsse und Sickerwasserraten auf.

Veränderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Leichten Zunahmen von rd. 15 mm/a im Nordwesten (Eifel / Rheinland-Pfalz) des KLIWA-Untersuchungsraums stehen Bereiche mit geringen Abnahmen von maximal 30 mm/a im Südosten (insbesondere am Alpenrand) gegenüber. Die restlichen Gebiete zeigen kein eindeutiges Änderungssignal bzw. weisen nur sehr geringe Abnahmen auf. Insgesamt kann man somit von einer Nordwest-Südost-Differenzierung sprechen. Bereiche, in denen großräumig bisher die geringsten Neubildungsraten zu verzeichnen waren, könnten zukünftig einen leichten Anstieg ihrer durchschnittlichen Grundwasserneubildung erfahren.

Veränderung des Trockenheitsindex

Für die drei Bundesländer ergibt sich ein vergleichsweise einheitliches Bild mit einer Zunahme des Trockenheitsindex in der Größenordnung von etwa 11-14 Tagen pro Jahr im Ist-Zustand auf 43-75 Tage pro Jahr in der nahen Zukunft. Der Anstieg ist nahezu ausschließlich auf zusätzliche Tage im Sommerhalbjahr rückführbar. Bezogen auf einzelne Naturräume wird eine Zunahme von etwa 2 (Nordalpen) bis knapp 20 (Osttaunus) Tagen im Jahr projiziert, wobei in der Mehrzahl der Gebiete eine Zunahme des Trockenheitsindex von ca. 12-16 Tagen für die nahe Zukunft erwartet wird. Bei Betrachtung der absoluten Werte der Trockentage im Jahr bedeutet dies eine Spannweite von etwa 10 Tagen/Jahr bis zu mehr als 90 Tagen/Jahr in naher Zukunft.

Veränderung des Wasseräquivalents der Schneedecke

Auf Ebene der Naturräume ergeben sich nennenswerte absolute Abnahmen (mittlere Änderung von Dezember bis März) bis max. 40 mm nur für wenige Mittelgebirgsregionen und die Alpen. Die bisher bereits schneearmen Naturräume fallen auf Grund der geringen Absolutwerte nicht besonders auf. Zieht man die prozentualen Änderungen heran, so zeigen sich sehr viel deutlichere Signale mit einer Abnahme von etwa 40 % im Jahr für alle Naturräume.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse zur zukünftigen Entwicklung des Bodenwasserhaushalts auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) zeigen für die Zeitspanne 2021-2050 z. T. deutliche Veränderungen, die als regionale Folge des Klimawandels mit seinen Auswirkungen auf Temperatur- und Niederschlag zu interpretieren sind. Sie deuten in einem überregionalen Kontext auf mögliche Änderungstendenzen hin und erlauben damit eine erste großräumige Einschätzung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt und ggf. die grundwasserbezogenen Nutzungen wie z. B. die öffentliche Wasserversorgung. Die Identifikation möglicher Problembereiche auf der Basis von insgesamt 25 Naturräumen 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 gängigen Emissionsszenarien und anerkannten Globalmodelle für die künftige Klimaentwicklung liefern keine einheitliche Aussage, sondern eine Bandbreite möglicher Entwicklungen. Aufgrund der Unsicherheiten der globalen und regionalen Klimamodellierung sollten Aussagen zu den Folgen des Klimawandels daher langfristig nicht nur auf einzelne regionale Klimaprojektionen gestützt werden. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse beziehen sich daher zusätzlich auch auf Ergebnisse auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Bei zukünftigen Impaktmodellierungen im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA wird die gleichzeitige Betrachtung von mehreren Klimaprojektionen angestrebt. Entsprechende Ensemblesimulationen für den Bereich Boden- und Grundwasserhaushalt sind in Planung.

Die mögliche künftige Entwicklung relevanter Größen des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung ist immer auch in Relation zur Entwicklung in der Vergangenheit zu sehen. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse der bisher durchgeführten Szenariosimulationen und zur Beschreibung einer Gesamtentwicklung wird daher auf der Basis von Messdaten ergänzend zu den hier vorgestellten Untersuchungen eine Langzeitsimulation für den Zeitraum 1951-2010 durchgeführt.



1 Veranlassung und Ziel

Das Kooperationsvorhaben KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie des Deutschen Wetterdienstes hat zum Ziel, den Klimawandel in Süddeutschland und damit verbundene mögliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt zu untersuchen.

Unter den Bilanzgrößen des Wasserhaushalts kommt der flächenhaften Grundwasserneubildung eine große Bedeutung zu. So beruht die Wasserversorgung in Süddeutschland zum überwiegenden Teil auf der Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen. Mögliche Änderungen der Grundwasserneubildungsrate als Folge des Klimawandels können damit direkte Auswirkungen auf die Grundwasservorkommen, die Versorgungssicherheit und die Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung haben. Für die Sicherstellung der öffentlichen Trinkwasserversorgung in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sind rund 3 900 Wasserversorgungsunternehmen verantwortlich, deren Aufgabe es ist, Trinkwasser in ausreichender Menge und Qualität der Bevölkerung zur Verfügung zu stellen. Eine nachhaltige Nutzung der Ressource Grundwasser ist daher unumgänglich.

In den vergangenen Jahren wurden in Baden-Württemberg und Bayern bereits landesweite Berechnungen zur Bestimmung längerfristiger mittlerer Grundwasserneubildungsraten auf Basis von Messwerten mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW durchgeführt. In Baden-Württemberg wird dieses Modell neben landesweiten Betrachtungen (WABOA, 2007, LUBW, 2011) schon seit längerer Zeit für eine Vielzahl von Fragestellungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen, von einzelnen Wasserschutzgebieten bis hin zu länderübergreifenden Bearbeitungen am Oberrhein, eingesetzt. In Bayern wurde GWN-BW erstmals für die Erarbeitung der Grundwasserneubildungskarte als Teil der Hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500 000 aufgestellt (LFU 2009). In Rheinland-Pfalz wurde im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA ebenfalls ein landesweiter Modelldatensatz erstellt.

Darauf aufbauend wurden nun für die drei Länder gemeinsame Szenariosimulationen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung vorgenommen. Als meteorologische Antriebsdaten fanden die regionalen WETTREG2006-Szenariendaten basierend auf dem Globalmodell ECHAM5 mit Emissionsszenario A1B Verwendung. Für Bayern und Baden-Württemberg wurden auch Simulationsläufe mit den nur für diese beiden Länder verfügbaren WETTREG2003-Szenariendaten auf Basis ECHAM4/B2 durchgeführt. Somit wurden diejenigen regionalen Klimaszenarien als Antriebsdaten verwendet, welche bislang im Rahmen von KLIWA bei der gewässereinzugsgebietsbezogenen Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen den breitesten Einsatzbereich aufweisen. Der Fokus der Auswertungen liegt auf der nahen Zukunft von 2021 bis 2050. Auf der Grundlage von ECHAM5/A1B werden für die ferne Zukunft von 2071 bis 2100 wegen der zunehmenden Unsicherheit der Emissionsszenarien und Globalmodelle sowie der eingeschränkten Aussagefähigkeit der statistischen Regionalmodelle nur orientierende Aussagen getroffen.

Mit dieser Untersuchung liegen erstmalig für den süddeutschen Raum methodisch vergleichbare und auf weitgehend einheitlicher physiographischer Datengrundlage (Landnutzung, Böden, etc.) basierende Ergebnisse für die wichtigsten Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts und der flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag vor. Im Mittelpunkt steht die Darstellung der umfangreichen, auf den drei Gliederungsebenen Bundesländer, KLIWA-Regionen und Naturräume vorgenommenen Auswertungen und die Interpretation der Simulationsergebnisse insbesondere im Hinblick auf mögliche klimabedingte Veränderungen in der nahen Zukunft.

2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung

2.1 Beschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells

Das verwendete Simulationsmodell GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenzierendes 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 die darauf basierende Ableitung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.

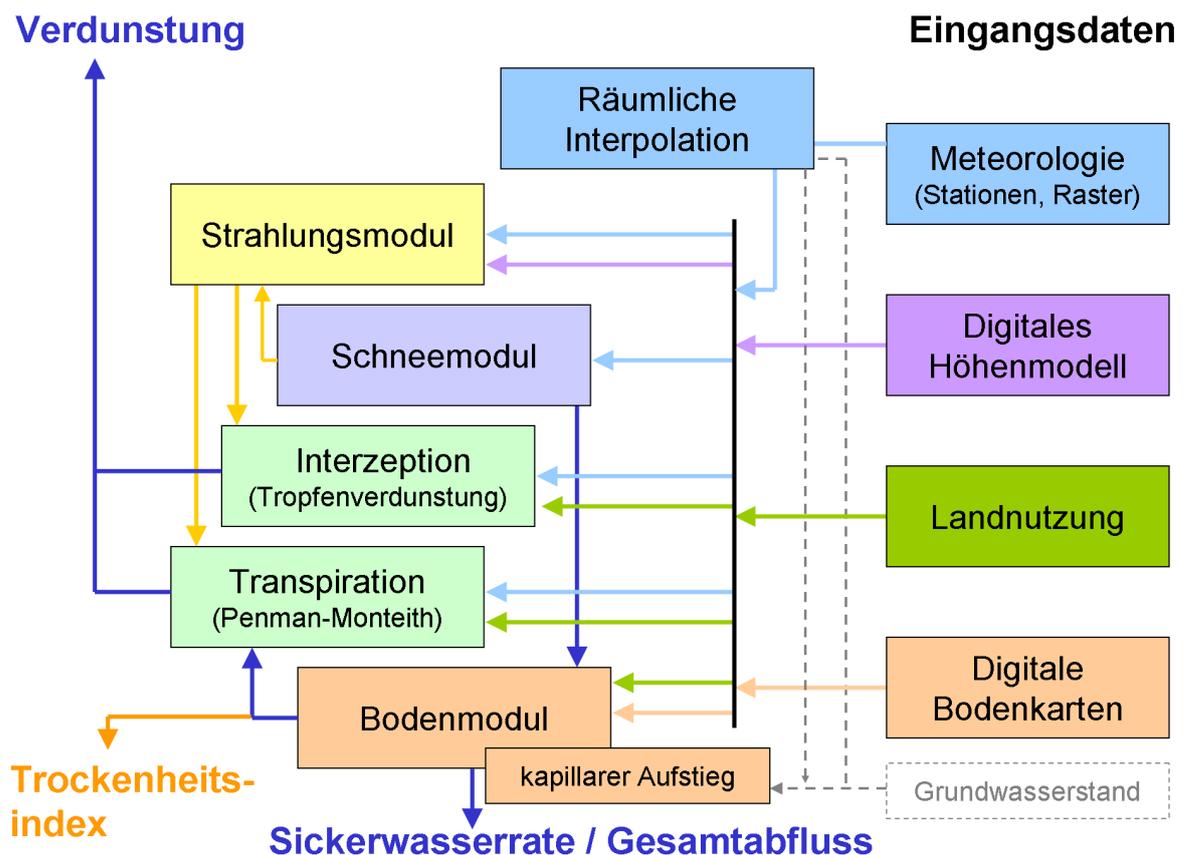


Abb. 2.1: Modularer Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und schematische Darstellung der benötigten Eingangsdaten.

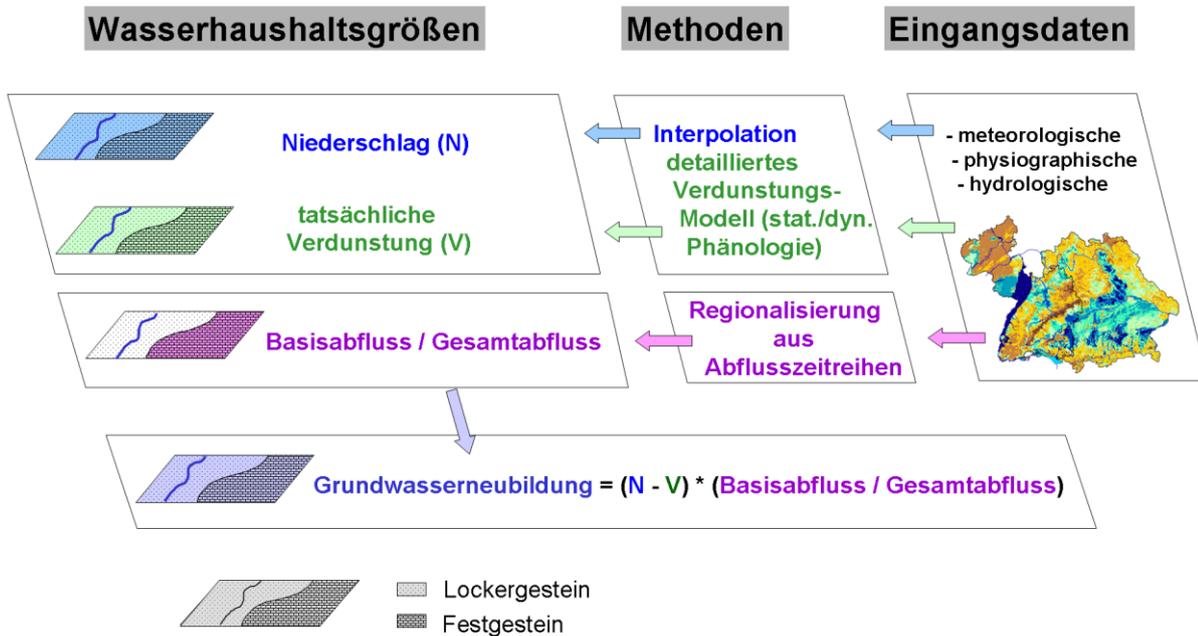


Abb. 2.2: Grundkonzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.

2.1.1 Regionalisierung meteorologischer Eingangsdaten

Der meteorologische Antrieb für das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW besteht aus Tageswerten für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windstärke (Messdaten). An Stelle der beiden zuletzt genannten Parameter können alternativ auch Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit als Modellinput verwendet werden. Als Zeitreihen bereitzustellen sind Tagessummen für Niederschlag und Sonnenscheindauer bzw. Tagesmittelwerte für alle anderen Parameter. Typischerweise besteht der meteorologische Antrieb aus stationsbezogenen Zeitreihen für die o. g. Parameter, aus welchen im Tages-schritt räumliche Verteilungen nach verschiedenen Verfahren erzeugt werden. Dabei können Distanzgewichte z. B. mit einer Höhenabhängigkeit kombiniert und Kriterien für die Auswahl der zu berücksichtigenden Nachbarstationen vereinbart werden. Alternativ ist die Vorgabe extern regionalisierter Daten möglich, wie z. B. tägliche REGNIE-Rasterdaten der Niederschlagsverteilung (Regionalisierung von Niederschlagshöhen durch den DWD).

Die an den Klimastationen erfassten Zeitreihen meteorologischer Zustandsgrößen weisen in aller Regel mehr oder weniger große Lücken auf. Diese können z. B. durch Geräteausfall bedingt sein. Zugleich unterliegen die Messnetze selbst einer stetigen Veränderung, welche dazu führt, dass Zeitreihen mit Aufgabe der Station enden oder neue Zeitreihen erst innerhalb des Simulationszeitraums beginnen. Bei der räumlichen Interpolation auf einen Zielpunkt muss deshalb für jeden Einzeltag und jeden Parameter geprüft werden, welche der Nachbarstationen für diesen Tag einen gültigen Messwert liefern. Je nach gewähltem Interpolationsverfahren müssen Messorte aus der Auswahl zu berücksichtigender Stationen entfernt oder hinzugenommen und die Gewichte der zu berücksichtigenden Werte neu berechnet werden. Die Regionalisierung meteorologischer Eingangsdaten erweist sich damit als rechen- und zeitaufwendig, sofern sie für eine große Zahl von Zielpunkten und lange Simulationszeiträume durchgeführt werden soll. Demgegenüber besitzen synthetische Zeitreihen oftmals die Eigenschaft, keine Lücken aufzuweisen, was insbesondere auf die im Rahmen dieser Bearbeitung verwendeten WETTREG-Szenarien zutrifft.

Die Auswahl zu berücksichtigender Nachbarstationen und die Berechnung der Gewichte, mit welchen sie in das Interpolationsergebnis für einen bestimmten Zielpunkt eingehen, muss in diesem Fall nur einmal für den ersten Tag des Simulationszeitraums erfolgen und kann dann

für alle weiteren Tage beibehalten werden. Mit dieser Vorgehensweise konnten die Rechenzeiten in erheblichem Umfang reduziert werden.

2.1.2 Schneemodul

Das Schneemodul beschreibt den Aufbau der Schneedecke durch Akkumulation und ihren Abbau vor allem durch Schmelzprozesse. Dazu erfolgt zunächst eine Aufteilung des Niederschlags in seinen flüssigen und festen Anteil in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Tab. 2.1). Im Übergangsbereich zwischen den Grenztemperaturen für nur flüssigen bzw. nur festen Niederschlag erfolgt ein linearer Übergang. Dabei kann auch flüssiges Wasser in der Schneedecke zurückgehalten werden, bis ihre Wasserhaltekapazität überschritten wird. Der feste Anteil der Schneedecke beginnt oberhalb eines Schwellenwertes in Abhängigkeit von der Lufttemperatur abzuschmelzen (Temperatur-Index-Verfahren). Fällt flüssiger Niederschlag auf die Schneedecke, so trägt die damit verbundene Energiezufuhr ebenfalls zur Schneeschmelze bei. Bei Temperaturen unterhalb der Grenztemperatur unterliegt in der Schneedecke gespeichertes flüssiges Wasser dem Wiedergefrieren. Dieser Prozess wird analog dem Schmelzen durch ein Temperatur-Index-Verfahren beschrieben, wobei das Wiedergefrieren jedoch mit geringerer Effizienz erfolgt. Eine Wasserabgabe aus der Schneedecke erfolgt erst, wenn deren Wasserhaltekapazität, ausgedrückt durch den maximalen Wasseranteil in der Schneedecke in Relation zum gesamten Wasseräquivalent, überschritten wird (ARMBRUSTER 2002).

Tab. 2.1: Parameter und voreingestellte Standardwerte des Schneemoduls.

Parameter	Beschreibung	Standardwert
T_rain	Temperatur bei welcher der Übergang von flüssigem zu festem Niederschlag beginnt [°C]	1.6
T_snow	Temperatur ab welcher der gesamte Niederschlag als Schnee fällt [°C]	-0.4
T_melt	Basistemperatur oberhalb welcher Schnee zu schmelzen beginnt [°C]	-0.5
TaGrad	Tag-Grad-Faktor für das Schmelzen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur [mm/°C/d]	1.8
cFreez	Koeffizient für das Wiedergefrieren von flüssigem Wasser [0..1]	0.1
TaPrec	Tag-Grad-Faktor für das Schmelzen durch Energiezufuhr mit flüssigem Niederschlag	0.0125
cWater	maximaler Anteil von flüssigem Wasser in der Schneedecke [0 ≤ cWater < 1]	0.1
Neu09	Schneefall [mm/d] bei welchem die Albedo der Schneedecke auf Neuschnee zurückgesetzt wird	3.0
albedo	Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden Oberflächen	0.4 → 0.9

Die Schneeschmelze wird über einen konzeptionellen Temperatur-Index-Ansatz sowie die Energiezufuhr mit flüssigem Niederschlag (abhängig von dessen Menge und Temperatur) gesteuert. Die Lufttemperatur dient im Temperatur-Index-Verfahren als Ersatzvariable, welche die Einflüsse von Einstrahlung und advektiver Wärmezufuhr integriert. Die Schneeschmelze steht hier explizit nicht im Zusammenhang mit einem Ventilationsglied, da die Windgeschwindigkeit unter den meteorologischen Eingangsdaten von Wasserhaushaltsmodellen die mit Abstand am schwierigsten in die Fläche übertragbare Größe und abseits von Standorten mit direkter Messung nur mit großen Unsicherheiten zu schätzen ist. Hinzu kommt die oft heterogene Datengrundlage aus Windstärken und Windgeschwindigkeiten, welche im ungünstigsten Fall außerdem in unterschiedlichen Höhen gemessen wurden.

Eine Schneeschmelze durch den Bodenwärmestrom wird nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die simulierte Schneedecke überwiegend im Winterhalbjahr auf einem Boden entwickelt, dessen Kälteinhalt die Energiezufuhr aus dem Erdinneren größtenteils puffert. Das beschriebene Schneemodul wurde im Rahmen der durchgeführten Simulationsrechnungen keiner speziellen Kalibrierung für Süddeutschland unterzogen.



2.1.3 Interzeption und Evapotranspirationsberechnung

Das Interzeptionsmodul beschreibt die Interzeption von Niederschlagswasser in mehreren Schichten der Vegetationsbedeckung und auf versiegelten Flächen. Die Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher erfolgt entsprechend der Variation der meteorologischen Zustandsgrößen innerhalb des Bestands aus jeder der bis zu sieben Vegetationsschichten mit unterschiedlicher Intensität.

Im Transpirationsmodul werden mehrere Verfahren zur Berechnung der Pflanzenverdunstung angeboten, darunter insbesondere zwei auf dem Ansatz nach Penman-Monteith basierende Varianten. Der bisherigen Standardmethode in GWN-BW liegt das Verdunstungsmodell TRAIN (MENZEL 1999) zu Grunde, bei dem der effektive Bestandeswiderstand in Abhängigkeit von Blattflächenindex, Bodenfeuchtedefizit und Lufttemperatur ermittelt wird. Demgegenüber berücksichtigt der hier verwendete und im Folgenden erläuterte Ansatz "Persephone" die Einflüsse von Bedeckungsgrad (Pflanzen- bzw. Bodenverdunstung) und Bodenfeuchte in separaten Schritten. Dabei orientiert sich die Parametrisierung von landnutzungsabhängigen Parametern wie minimalem Bestandeswiderstand oder Blattflächenindex an phänologischen Entwicklungsstadien, deren Eintrittszeitpunkte entweder witterungsabhängig berechnet werden können oder statisch höhenabhängig bestimmt werden.

Der saisonale Verlauf nutzungsabhängiger Parameter wird dabei durch bis zu acht Stützpunkte beschrieben (Tab. 2.2), wobei für die ersten sechs eine witterungsabhängige Berechnung der Eintrittszeitpunkte erfolgen kann. Es handelt sich um eine Implementierung der im Rahmen des KLIWEP-Projektes (Sachsen) und als Empfehlung für die LUBW zur Erweiterung der Prognosefähigkeit von Wasserhaushaltsmodellen erarbeiteten phänologischen Modelle (PÖHLER ET AL. 2007, PÖHLER 2008) in WaSiM-ETH (SCHULLA ET AL. 1998).

In Ergänzung zur Dynamisierung der Dauer der Vegetationsperiode werden – soweit seitens Pflanzenbau und Forst entsprechende Parametrisierungen vorhanden sind – auch Entwicklungsstadien innerhalb der Vegetationsperiode witterungsabhängig beschrieben. Aktuell betrifft dies für die Landnutzung Wald den Beginn des Blattaustriebs und die maximale Blattentfaltung, für Grünland den Beginn des Ergrünnens und die Vollblüte (erster Silageschnitt). Für landwirtschaftliche Kulturlflächen werden spezifische Parametrisierungen für neun Kulturarten in der Parameterdatei des Modells vorgehalten. Die mittlere allgemeine Ackernutzung für nicht näher spezifizierte Nutzung bzw. die unter Fruchtfolge befindliche Kulturlfläche, wird als Wintergetreide mit vier über Temperatursummen beschriebenen Entwicklungsphasen (Schossen, Ährenschieben, Gelbreife und Ernte) simuliert.

Tatsächlich sind für einzelne Nutzungen nicht alle der in Tab. 2.2 aufgeführten Eintrittszeitpunkte von Bedeutung. So entwickelt sich Grünland vergleichsweise kontinuierlich vom Ergrünnens bis zur Blüte; ein Schossen wird in diesem Fall nicht beschrieben. Gelbreife bzw. Teigreife sind nur für die Getreidesorten von Bedeutung, welche nach dem Erreichen ihrer vollen vegetativen Entfaltung zum Abreifen auf dem Acker verbleiben, dann aber schlagartig abgeräumt werden. Je nach Nutzungsform ergeben sich also effektiv Modelle mit vier, fünf oder sechs Stützpunkten.

Tab. 2.2: Phänologische Entwicklungsstadien.

Stützpunkt	phänologische Bedeutung
d1	Aufgang = Ende der Winterperiode
d2	Schossen / Beginn Längenwachstum / Beginn Blattentfaltung / Maitrieb
d3	Ährenschieben / Rispenschieben / max. Blattentfaltung / Blüte
d4	Gelbreife / Teigreife
d5	Getreide: Vollreife = Zustand am Tag der Ernte
d6	Getreide: Zustand nach der Ernte
d7	Beginn der Blattverfärbung / Erntetermin für Blattfrüchte
d8	Beginn Blattfall = Beginn der Winterperiode

Neben der witterungsabhängigen Berechnung von Eintrittszeitpunkten kann für jede phänologische Phase auch die statische Variante gewählt werden – für die beiden letzten Phasen ist dies immer der Fall (phänologische Phasen wie Blattverfärbung oder Blattfall zeigen im Unterschied zu den Frühjahrsphasen meist keine eindeutige Temperaturabhängigkeit). Weitere Eintrittszeitpunkte, welche auch bei dynamischer Beschreibung statisch behandelt werden, sind beispielsweise der Beginn der Entwicklung des Unterholzes in Wäldern (etwa einen Monat vor dem Blattaustrieb der Bäume) oder das Aufgehen von Wintergetreide, für das zwar Thermal-Time-Modelle parametrisiert werden könnten, was aber nur bei genauer Kenntnis der Saattermine sinnvoll wäre. Für einige Nutzungsformen wie "Brache" oder "Sträucher und Büsche" existieren noch keine Modelle für eine witterungsabhängige Beschreibung der phänologischen Entwicklung. Für sie werden alle Eintrittszeitpunkte statisch vorgegeben. Die Vorgabe von statischen Eintrittszeitpunkten bezieht sich immer auf eine bestimmte Meereshöhe; in der Standard-Parameter-Tabelle wird analog zu WaSiM-ETH eine Höhe von 400 m NN verwendet; der Höhengradient beträgt jedoch wie im Modell TRAIN nur 1.5 Tage je 100 Höhenmeter. Er kann bei Bedarf für jede Nutzung separat variiert werden.

Das neu eingeführte Schema für eine witterungsabhängige Parametrisierung der Landnutzung wurde einer Validierung unterzogen. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Validierung sind im Anhang dargestellt.

Im Rahmen der KLIWA-Szenarienberechnungen wurde die Parametrisierung der Landnutzung mit dynamischer Phänologie verwendet, um der für die Zukunft unterstellten Lufttemperaturzunahme und den sich hieraus ergebenden veränderten Eintrittszeitpunkten in der Pflanzenentwicklung Rechnung zu tragen. In der Tat ergeben sich in einzelnen Jahren sehr unterschiedliche phänologische Eintrittszeitpunkte mit allerdings sehr geringer Auswirkung auf die berechnete mittlere tatsächliche Verdunstungshöhe (siehe Anhang).

2.1.4 Bodenmodul und kapillarer Aufstieg

Das Bodenmodul zur Simulation der Auffüllung des Bodenspeichers durch Niederschlags- und Schneeschmelzwasser und seiner Entleerung durch Transpiration und Sickerwasserbildung wurde dem Niederschlag-Abfluss-Modell HBV (BERGSTRÖM 1976) entlehnt. Aufgrund seines konzeptionellen Charakters ist es auch für größere Untersuchungsräume auf einer Datengrundlage in kleinem Kartenmaßstab zu parametrisieren. Aus den Daten der Bodenkarte wird die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFKWe) abgeleitet (wobei sich die maximale Tiefe der durchwurzelteten Bodenzone aus der Landnutzung und der maximalen Gründigkeit des Bodens ergibt). Der Boden wird im Modell als ein Mischbodenkörper mit einem maximalen Bodenwassergehalt angesehen, der durch die nFKWe bestimmt wird. Die Bodenwasserzone wird durch Regen- und Schmelzwasser sowie Aufstiegswasser aus der Grundwasserzone versorgt. Sowohl die tatsächliche Verdunstung als auch die Weiterleitung eines Teils der Zuflüsse sind von der aktuellen Bodenfeuchte abhängig. Sofern die aktuelle Bodenfeuchte dem maximalen Bodenwassergehalt entspricht, wird der gesamte Zufluss weitergeleitet. Ansonsten erfolgt je nach Verhältnis von aktueller Bodenfeuchte zu maximalem Bodenwassergehalt in Abhängigkeit eines von der nFKWe abhängigen Parameters, der exponentiell eingeht, die Weiterleitung eines entsprechenden Teils des Zuflusses. Ausgehend von der aktuellen Bodenfeuchte wird die tatsächliche Verdunstung berechnet; je trockener der Boden ist, desto stärker wird die tatsächliche Verdunstung im Vergleich zur physikalisch möglichen potenziellen Evapotranspiration begrenzt.

Für Flächen mit hohem Grundwasserstand kann der kapillare Aufstieg entsprechend den Angaben der bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) abgeschätzt werden.



2.1.5 Trockenheitsindex

Als Trockenheitsindex wird im Folgenden die unter diesem Begriff im Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WABOA 2007) eingeführte Kenngröße bezeichnet. Sie gibt die in der Vegetationsperiode auftretende Anzahl von Tagen mit Unterschreitung eines Bodenwassergehaltes von 30 % an. Dies ist speziell für ackerbaulich genutzte Standorte von hoher Bedeutung, da diese Kenngröße ein Indikator für Situationen mit ungenügender Wasserversorgung der angebauten Kulturpflanzen (Trockenstress) bzw. für einen möglichen Beregnungsbedarf ist. Dieser aus dem Bodenwasserhaushalt abgeleitete Trockenheitsindex unterscheidet sich von anderen aus der Literatur bekannten Trockenheitsindizes, welche sich beispielsweise auf das Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Verdunstung oder auf das Verhältnis zwischen Niederschlag und Lufttemperatur (z. B. DWD) beziehen.

Der Trockenheitsindex ist kein primäres Simulationsergebnis, sondern eine Auswertung der simulierten Tageswerte der relativen Sättigung des Bodenwasserspeichers. Im Zuge der vorliegenden Bearbeitung wurde die Möglichkeit geschaffen, die Anzahl der Tage mit Unterschreitung eines Schwellenwertes der relativen Sättigung des Bodenspeichers für pflanzenverfügbares Wasser (hier: 30 % nFKWe) direkt aus GWN-BW heraus als Ergebnis auf Monatsbasis ausgeben zu können.

Bei der Ausgabe des Trockenheitsindex wird in GWN-BW vorläufig nur ein fest vorgegebener Schwellenwert von 30 % Sättigung unterstützt. Dieser wird als Schwellenwert aufgefasst, ab welchem spätestens die Pflanzenentwicklung durch Trockenstress beeinträchtigt wird. Eine Auswertung für andere Schwellenwerte müsste gegebenenfalls als nachgeschalteter Bearbeitungsschritt auf Ergebnisdateien mit Tageswerten der relativen Sättigung erfolgen. Gleiches gilt für die Ermittlung von Unterschreitungsdauern.

2.2 Ermittlung der Grundwasserneubildung

2.2.1 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Die Grundwasserneubildung wird gemäß DIN 4049-3 (1994) als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ definiert. Zur Grundwasserneubildung trägt großräumig vor allem aus Niederschlag gebildetes Sickerwasser bei. Als residuale Komponente der Wasserbilanz stellt die Grundwasserneubildung aus Niederschlag (GwN) den um die tatsächliche Verdunstung (V) und schnelle laterale Abflusskomponenten (A_0) reduzierten Anteil der Niederschlagshöhe (N) dar. Auf der Skala von Jahreswerten entspricht sie näherungsweise dem aus dem Grundwasserspeicher stammenden Anteil der Gesamtabflusshöhe (A), der als Basisabfluss (A_U) den Vorfluter auch noch in niederschlagsarmen Zeiten speist. Die Grundwasserneubildung ist ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen (LFU 2009). Dieser Aspekt ist von besonderer Bedeutung, da im Untersuchungsgebiet rund drei Viertel des Trinkwassers aus dem Grundwasser stammen. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in den nachfolgenden Bilanzgleichungen und in Abb. 2.3 dargestellt:

$$GwN = N - V - A_0 \quad (\text{mm/a})$$

$$\text{bzw. } GwN = A - A_0 \quad (\text{mm/a})$$

$$\text{bzw. } GwN = A_U \quad (\text{mm/a})$$

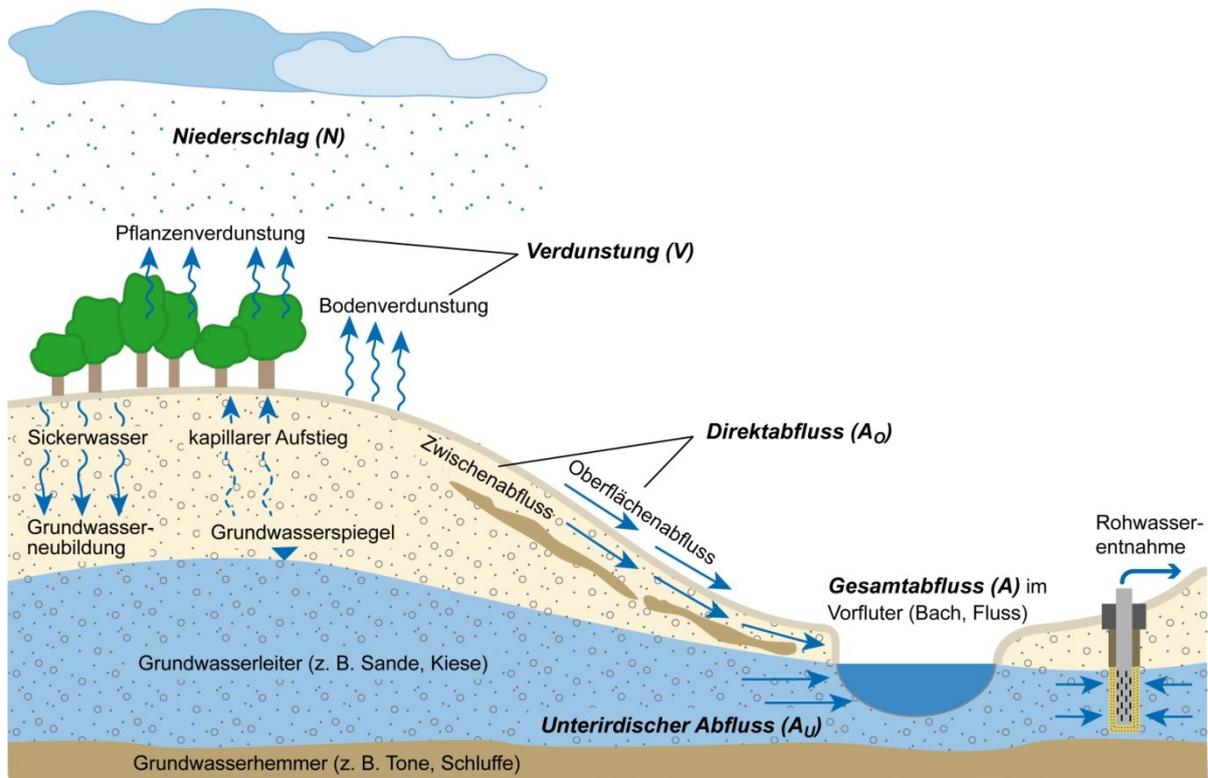


Abb. 2.3: Schematische Darstellung des Grundwasserhaushalts unter Berücksichtigung der wichtigsten modellrelevanten Bilanzgrößen.

2.2.2 Baseflow-Index

Ausgehend von der mittleren jährlichen Gesamtabflusshöhe als Ergebnis der Bodenwasserhaushaltsmodellierung erfolgt in einem weiteren Schritt die räumlich differenzierte Berücksichtigung der relevanten Direktabflussanteile wie Oberflächenabfluss (außerhalb versiegelter Flächen und Wasserflächen) oder Zwischenabfluss mit Hilfe des Baseflow-Index BFI. Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$\text{GwN} = A \cdot \text{BFI} \quad \text{mit } \text{BFI} = A_U / A$$

Dem BFI als nachgeschaltetem Reduktionsfaktor liegt die Annahme zu Grunde, dass er als Mehrjahreswert weitgehend unabhängig von der kurzfristigen Witterungs- und Abflussdynamik ist und primär von zeitlich vergleichsweise invarianten Einflussfaktoren wie Hydrogeologie, Boden, Landnutzung oder Relief geprägt wird. Die Ermittlung erfolgte in allen drei Bundesländern an Hand von langen Abflusszeitreihen (Tageswerte) für eine repräsentative Auswahl von Einzugsgebieten. Zu diesem Zweck wurden in Baden-Württemberg 105 (ARMBRUSTER 2002), in Bayern 158 (LFU 2009) und in Rheinland-Pfalz 137 Einzugsgebiete ausgewählt, in denen weitgehend homogene naturräumliche Verhältnisse und eine möglichst geringe anthropogene Beeinflussung der Abflüsse vorliegen.

Als Referenzgröße für den Basisabfluss wurden die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ), modifiziert nach KILLE (1970), aus den Tageswertzeitreihen abgeleitet. Diese wurde dann zu den mittleren Abflüssen (MQ) der jeweiligen Zeitreihen bzw. Einzugsgebiete in Relation gesetzt. In Baden-Württemberg und Bayern sind zur Ermittlung und flächendeckenden Regionalisierung zusätzlich multiple lineare Regressionsanalysen mit der Zielgröße BFI erfolgt. Die daraus resultierende räumliche Verteilung der BFI-Werte ist in Kapitel 3.1.5 dargestellt. Die entsprechenden Grundwasserneubildungsraten wurden für den Zeitraum 1961–1990 und 1971–2000 auch als landesweite Übersichtskarten publiziert (WaBoA 2007, LfU 2009). Für Rheinland-Pfalz liegt der BFI bezogen auf Grundwasserlandschaften vor.



3 Datenbasis und Datenaufbereitung

3.1 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 der Landnutzung, der Bodenkarte und dem Höhenmodell (Topographie) abgeleitet werden.

Die im Rahmen der Projektbearbeitung erfolgte Aufbereitung physiographischer Eingangsdaten hatte die Bereitstellung von separaten Teildatensätzen für die drei beteiligten Länder auf einer nach Datengrundlagen und Methodik der Aufbereitung so weit als möglich einheitlichen bzw. vergleichbaren Grundlage zum Ziel. Dabei konnten für Bayern die für die Grundwasserneubildungskarte (LFU 2009) erstellten Grundflächen ohne weitere Arbeitsschritte übernommen werden. Für Baden-Württemberg lagen physiographische Eingangsdaten bislang in Form von Rasterdaten vor, weshalb ausgehend von den vorhandenen Datengrundlagen ein neuer, aus Vektorgeometrien bestehender Eingangsdatensatz erstellt wurde. Für Rheinland-Pfalz wurden sämtliche Datengrundlagen bei den zuständigen Fachbehörden abgefragt und ebenfalls ein neuer Grundflächendatensatz erstellt.

Auf eine Zusammenführung der drei Landesmodelle zu einem gemeinsamen Datensatz wurde bewusst verzichtet. Dadurch wird einerseits der Tatsache Rechnung getragen, dass auf einigen Informationsebenen (Bodenkarte, BFI) durchaus Unterschiede bezüglich der jeweils verwendeten Datengrundlage verbleiben. Zugleich werden geometrische Verzerrungen bei der Projektion in ein gemeinsames Koordinatensystem vermieden. Dagegen werden die Stammdaten der Niederschlags- und Klimastationen in zwei Bezugsmeridianen des Gauss-Krüger-Koordinatensystems vorgehalten. Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte länderübergreifend.

3.1.1 Landnutzung

Als Landnutzung wurde die europaweit vorliegende Klassifikation von CORINE Land Cover 2000 (DLR 2005) mit 31 Nutzungsklassen verwendet (Abb. 3.1), die für GWN-BW in 16 simulationsrelevante Nutzungsklassen übersetzt wurden (Tab. 3.1). Dominierende Landnutzungen im Untersuchungsgebiet sind Wald- und Ackerflächen mit einem Anteil von jeweils rund 40 % an der Gesamtfläche. Siedlungsflächen werden im Modell in fünf nach angenommener Versiegelung unterschiedenen Klassen abgebildet, sind jedoch mit einem Gesamtanteil von lediglich 5 % von untergeordneter Bedeutung bei der großräumigen Betrachtung des Bodenwasserhaushalts.

Tab. 3.1: Landnutzungsklassen CORINE (linker Teil, n=31) und Zuordnung zu simulationsrelevanten Nutzungsklassen (rechter Teil, n=16) in den drei Bundesländern. Prozentangaben geben den angenommenen versiegelten Anteil an.

Code	CORINE-Nutzungsklasse	BY [km ²]	BW [km ²]	RP [km ²]	Nr	Klasse in GWN-BW
111	durchgängig städtische Prägung	42.7	17.7	9.1	1	Gebäude- und Freiflächen (75 %)
112	nicht durchgängig städt. Prägung	3233.6	2347.2	1067.2	2	Gebäude- und Freiflächen (50 %)
121	Industrie- und Gewerbeflächen	326.1	252.7	157.0	2	Gebäude- und Freiflächen (50 %)
122	Straßen, Eisenbahnen	21.2	15.2	7.4	2	Gebäude- und Freiflächen (50 %)
123	Hafengebiete	3.4	12.7	3.7	2	Gebäude- und Freiflächen (50 %)
124	Flughäfen	67.7	38.3	36.4	4	Gebäude- und Freiflächen (20 %)
131	Abbauflächen	103.7	49.4	42.7	5	Gebäude- und Freiflächen (-)
132	Deponien und Abraumhalden	3.3	3.0	4.6	5	Gebäude- und Freiflächen (-)
133	Baustellen	7.4	3.8	9.8	3	Gebäude- und Freiflächen (30 %)
141	Städtische Grünflächen	55.5	19.4	6.5	6	Bäume und Sträucher
142	Sport- und Freizeitanlagen	120.7	68.3	42.7	4	Gebäude- und Freiflächen (20 %)
211	nicht bewässertes Ackerland	20632.5	8842.6	4985.3	7	Acker
221	Weinbauflächen	61.0	326.7	839.4	8	Wein und Obst
222	Obst- und Beerenobstbestände	192.7	496.5	93.1	8	Wein und Obst
231	Wiesen und Weiden	9571.8	3816.6	2508.1	9	Grünland
242	komplexe Parzellenstrukturen	7523.4	4673.5	1208.5	7	Acker
243	Landwirtsch. & natürl. Bodenbedeckung	1999.2	720.1	458.9	7	Acker
311	Laubwälder	2739.8	2754.6	2845.7	10	Laubwald
312	Nadelwälder	15938.7	6237.8	1741.3	11	Nadelwald
313	Mischwälder	5516.2	4739.6	3446.3	12	Mischwald
321	natürliches Grünland	557.5	117.2	65.4	14	Freiland
322	Heiden und Moorheiden	189.1	3.8	3.2	14	Freiland
324	Wald-Strauch-Übergangsstadien	494.6	13.7	137.5	6	Bäume und Sträucher
331	Strände, Dünen und Sandflächen	0.3			15	Ödland
332	Felsflächen ohne Vegetation	167.2			16	Felsflächen ohne Vegetation
333	Flächen mit spärlicher Vegetation	137.7	0.8	0.9	15	Ödland
335	Gletscher und Dauerschneegebiete	0.3			16	Felsflächen ohne Vegetation
411	Sümpfe	93.7	48.7	7.1	14	Freiland
412	Torfmoore	150.6	29.5		14	Freiland
511	Gewässerläufe	140.5	51.1	99.1	13	Wasserfläche
512	Wasserflächen	484.2	38.2	28.6	13	Wasserfläche

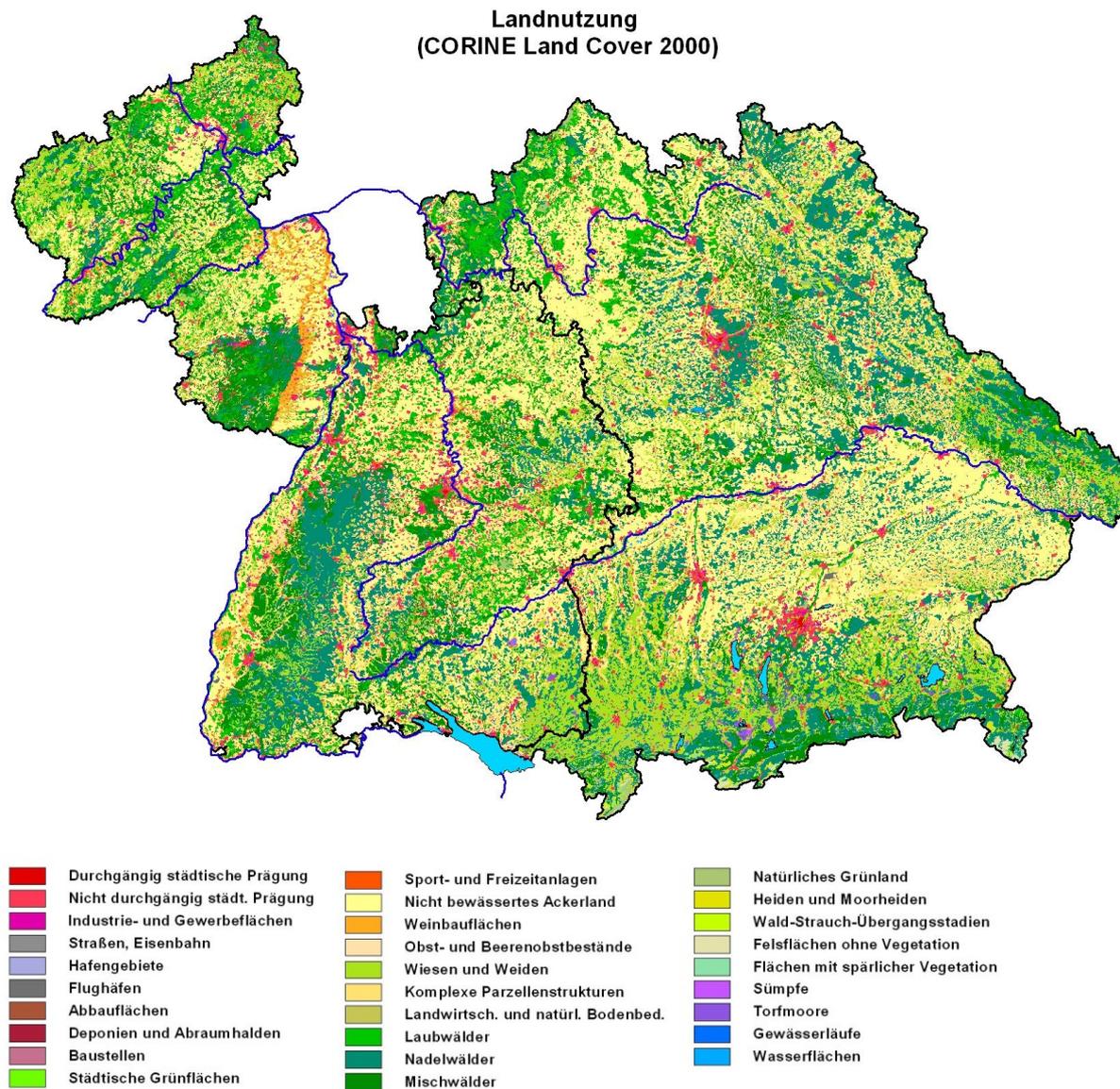


Abb. 3.1: Landnutzungsverteilung (CORINE Land Cover 2000) im KLIWA-Untersuchungsgebiet.

3.1.2 Böden

Die wichtigste Kenngröße zur Simulation des Bodenwasserhaushalts ist die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFKWe). Diese wurde aus den länderspezifischen Bodenkarten und, falls vorhanden, den entsprechenden Typprofilen abgeleitet. Die verfügbare Bodeninformation für Rheinland-Pfalz im Maßstab 1:200 000 mit einem horizontweise auswertbaren Typprofil für jede Bodeneinheit liefert im Ländervergleich die beste Datengrundlage. In Baden-Württemberg liegt die Bodenübersichtskarte 1:200 000 in gleicher Auflösung aber ohne Typprofil vor. Die zur Parametrisierung des Bodenwasserhaushalts benötigten Kenngrößen werden dort in stärker empirisch-qualitativer Weise aus Flächenattributen ermittelt bzw. abgeschätzt. Für Bayern ist mit landesweiter Abdeckung nur die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1 Mio. verfügbar; diese ordnet den kartierten Bodeneinheiten (Bodenformengesellschaften) zwar ebenfalls ein Typprofil für die vorherrschende Bodenform zu, weist aber eine deutlich schlechtere Auflösung mit Geometrien bis zur Größenordnung von 100 km² auf.

Die höchsten nFKWe-Werte von bis zu 350 mm werden auf Waldstandorten wegen der dort besonders tief reichenden Durchwurzelung erreicht. Die unterschiedlichen Maßstäbe der Bodenkarten der drei KLIWA-Länder werden in der räumlichen Verteilung der nFK bis 1 m Bodentiefe (Abb. 3.2) sichtbar.

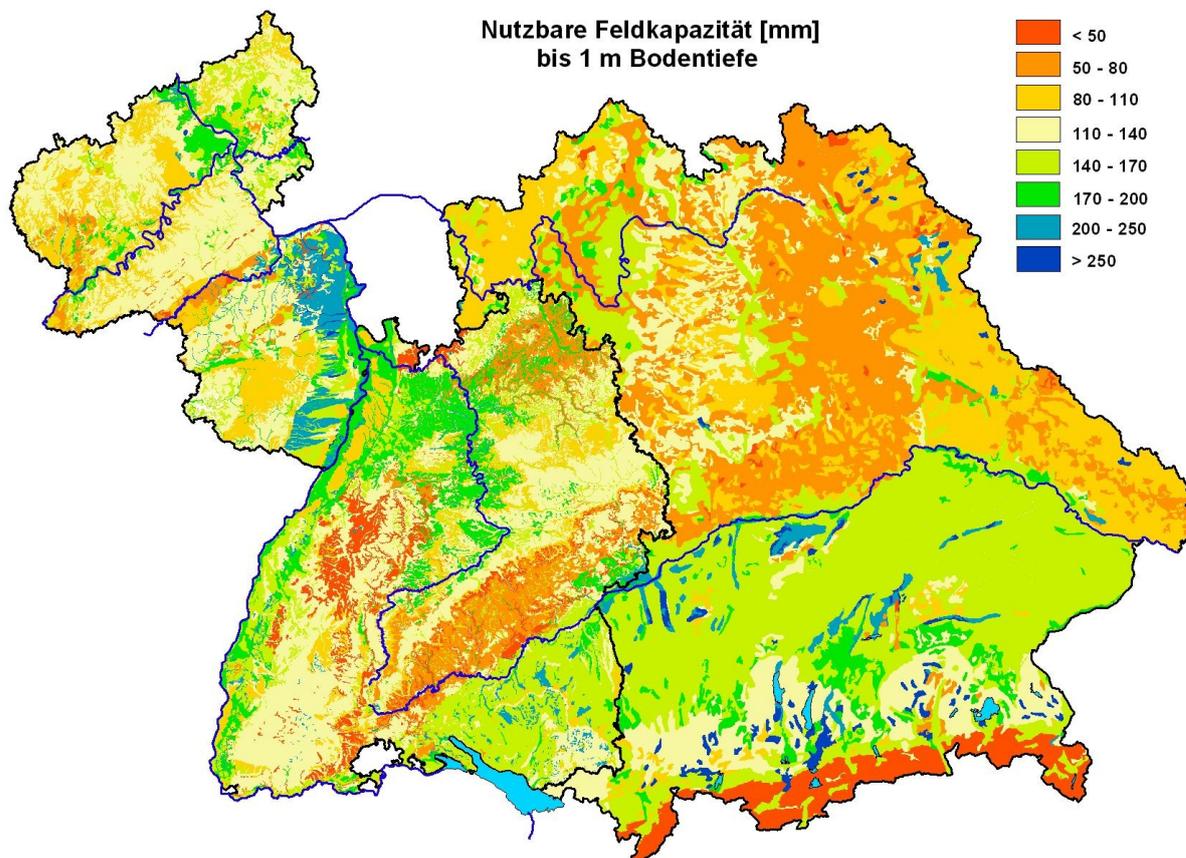


Abb. 3.2: Verteilung der nutzbaren Feldkapazität bis 1 m Bodentiefe nach Bodenübersichtskarten 1:200 000 für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie 1:1 Mio. für Bayern, Angaben in mm.

3.1.3 Topographie

Für die Modellierung mit GWN-BW werden Geländehöhe (Abb. 3.3), Hangneigung (Abb. 3.4) und Exposition als Topographieinformation benötigt. Diese wurden für die drei Länder aus den jeweils vorliegenden Höhenmodellen bestimmt. In Baden-Württemberg bildete das digitale Höhenmodell 1:50 000 (DHM50) die Datengrundlage. Die mittlere Geländehöhe und Hangneigung der Grundflächen (vgl. Kap. 3.2) wurde als Mittelwert der unter ihnen liegenden 50 m-Rasterzellen berechnet. Die auf diese Weise ermittelte mittlere Höhenlage der Grundflächen liegt zwischen 91 und 1 386 m NN, die Hangneigung zwischen 0 und 38.4 Grad. Für die Exposition dagegen ist eine einfache Mittelwertbildung nicht zulässig, da etwa die mittlere Exposition für zwei nach 45° (Nordost) und 315° (Nordwest) gerichtete Teilflächen nicht 180° (Süd) sondern 0° bzw. 360° (Nord) ist. Die mittlere Exposition der Grundflächen wird deshalb mittels Vektoraddition aus den beiden Komponenten (dx, dy) der Richtungsvektoren der Exposition aller unter der jeweiligen Grundfläche liegenden Rasterzellen berechnet.

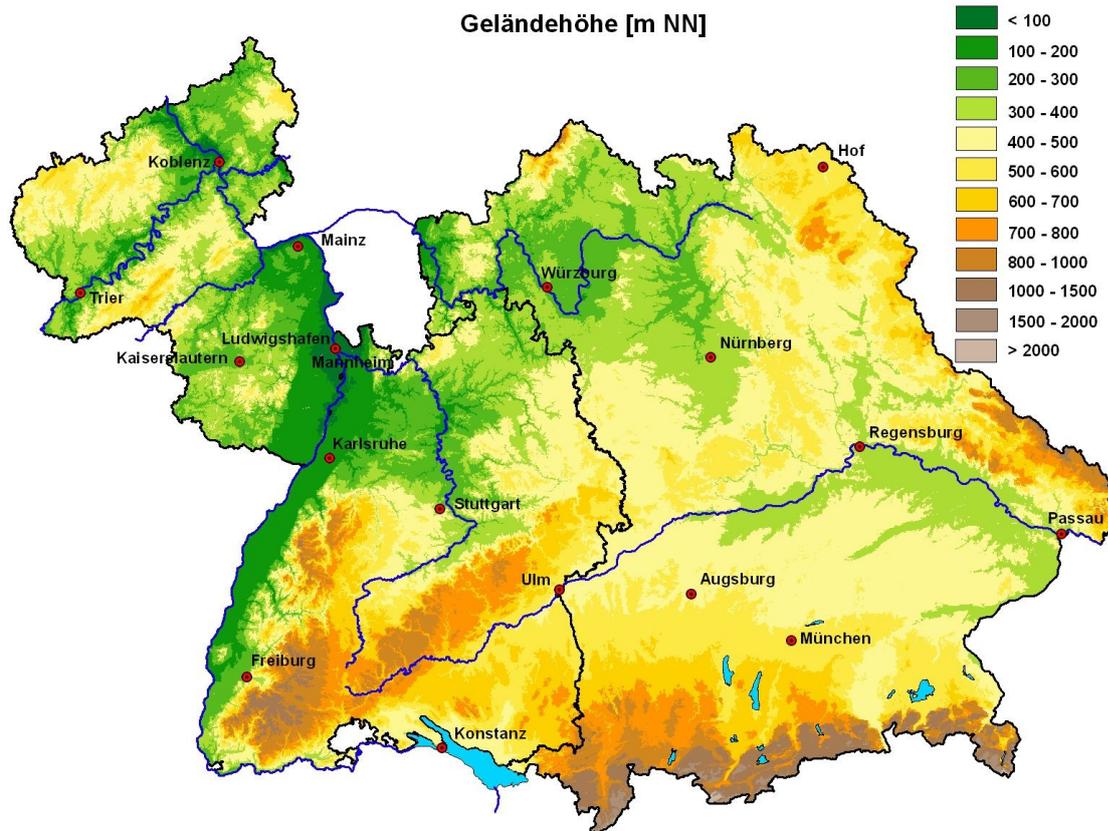


Abb. 3.3: Verteilung der Geländehöhen im Untersuchungsgebiet, Angaben in m NN.

In Rheinland-Pfalz wurden Geländehöhe, Hangneigung und Exposition durch Auswertung der unter den Grundflächen liegenden 10 m-Rasterzellen (DHM10) ermittelt. Für eine Fläche mittlerer Größe werden dabei 5 700 Rasterzellen berücksichtigt; das Minimum liegt im vorliegenden Fall mit einer Mindestgröße von 0.04 km² bei 394 ausgewerteten Rasterzellen. Die einer Grundfläche zugeordnete Geländehöhe und Hangneigung ergibt sich aus dem Mittelwert der unter ihr liegenden Rasterzellen. Für die Exposition wird der Wert, wie oben beschrieben, durch Vektoraddition bestimmt. Die mittlere Höhenlage der Grundflächen liegt zwischen 50 und 802 m NN, die Hangneigung zwischen 0.02 und 41.8 Grad. Das Höhenmodell wurde analog Baden-Württemberg und Bayern auf ein 50 m-Raster aggregiert.

In Bayern wurde die modellrelevante Topographieinformation ebenfalls aus dem landesweit vorliegenden digitalen Höhenmodell 1:50 000 (DHM50) ermittelt, die Vorgehensweise entspricht weitgehend derjenigen in Baden-Württemberg. Die mittlere Höhenlage der Grundflächen liegt zwischen 103 und 2 638 m NN, die Hangneigung zwischen 0 und 59 Grad.

Für das im Bodenwasserhaushaltsmodell integrierte Abschattungsmodul, welches im Zuge der Berechnung der stündlichen Strahlungsbilanz der Grundflächen eine mögliche Abschattung durch Horizontüberhöhung abprüft, werden Höhenmodelle benötigt, die weit über das jeweilige Modellgebiet hinausreichen, um auch eine Abschattung durch außerhalb der Landesgrenzen gelegene Höhenzüge feststellen zu können. Eine Schwierigkeit dabei ist, dass die verfügbaren Höhenmodelle der Länder eng auf die eigenen Verwaltungsgrenzen zugeschnitten sind. Sie reichen im besten Fall ein Stück weit in benachbarte Bundesländer hinein, keinesfalls jedoch in die Nachbarstaaten. Die Höhenmodelle der Bundesländer wurden daher im Bereich eines jeweils großzügig bemessenen Ausschnitts aus anderen Datenquellen ergänzt.

Die solchermaßen zusammengesetzten Höhenmodelle bestehen aus

- dem Höhenmodell des jeweiligen Landes selbst,
- ggf. einem zuvor auf die gleiche Auflösung aggregierten und in das gleiche Koordinatensystem projizierten Höhenmodell eines Nachbarlandes,
- dem in das Koordinatensystem des Landesmodells projizierten und dabei auf die gewünschte feinere Auflösung interpolierten Höhenmodell GTopo30 des USGS (frei verfügbar).

Wo der von der jeweiligen Landesbehörde zur Verfügung gestellte Datensatz (in Baden-Württemberg und Bayern DHM50, in Rheinland-Pfalz das auf 50 m aggregierte DHM10) einen Wert aufweist, wurde dieser verwendet. Sofern für Teilbereiche keine Höhendaten aus den Bundesländern vorlagen, wurde ersatzweise der aus dem USGS-Datensatz (GTopo30) entnommene Wert herangezogen. Die so in einheitlicher 50 m-Auflösung zusammengesetzten Höhenmodelle wurden abschließend zur Verwendung im Abschattungsmodul auf 250 m aggregiert.

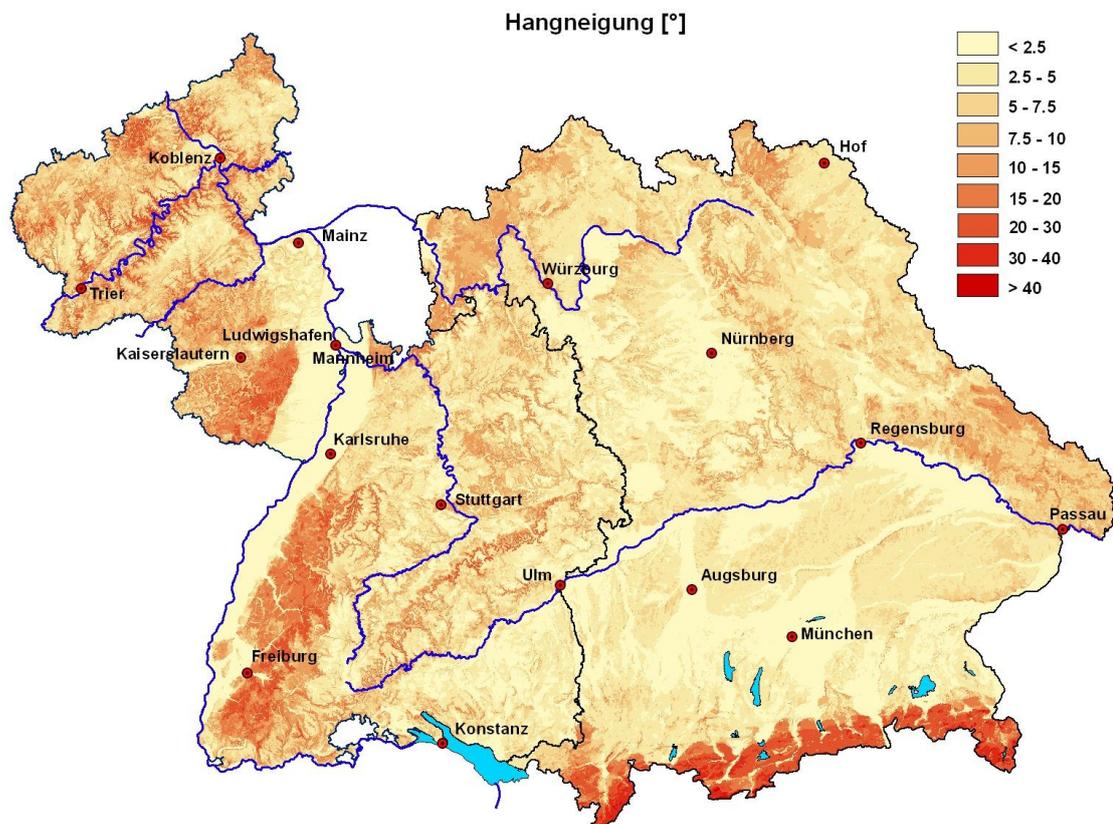


Abb. 3.4: Verteilung der Hangneigung im Untersuchungsgebiet, Angaben in Winkelgrad.

3.1.4 Grundwasserflurabstand und kapillarer Aufstieg

In Bereichen, in denen die Bodenkarte einen Grundwassereinfluss ausweist, wird bei der Bodenwasserhaushaltsmodellierung der kapillare Aufstieg berücksichtigt. In Bereichen ohne Grundwassereinfluss nach Bodenkarte erfolgt kein kapillarer Aufstieg. Zur Abschätzung kapillarer Aufstiegsraten ist die Ableitung des maßgeblichen Flurabstandes, die Mächtigkeit der Böden, das Ausmaß der Grundwasserbeeinflussung (relativer Anteil der von kapillarem



Aufstieg betroffenen Bereiche an der von der Bodenform eingenommenen Fläche) und die für die Aufstiegsraten maßgebliche Bodenart erforderlich.

Für den Oberrheingraben konnte auf eine detaillierte Flurabstandskarte für mittlere Verhältnisse zurückgegriffen werden. Weiterhin wurde kleinräumig im Südosten Baden-Württembergs (Donau bei Riedlingen, Riß ab Oberessendorf sowie Teilbereiche entlang Iller und Aitrach), in denen Messnetzgeometrie und Beobachtungsdichte dies zulassen, neue Flurabstandskarten konstruiert bzw. bei zu geringer Dichte oder ungünstiger räumlicher Anordnung der Messstellen einzelnen Tälern pauschal mittlere Flurabstände zugewiesen. Für die außerhalb davon verbleibenden Grundflächen mit Grundwassereinfluss nach Bodenkarte wurden pauschale Schätzwerte zugewiesen (0.75 m in Mooren und 1.25 m unter allen anderen Bodenformen). Für die grundwassernahen Flächen außerhalb des Oberrheingrabens in Rheinland-Pfalz konnte der mittlere Flurabstand auf Grundlage der mit der Bodenkarte verknüpften Typprofile meist aus der Tiefenlage der Gr-Horizonte (Gley) abgeschätzt werden. Für Bayern wurde ein Datensatz mit mittleren Flurabständen im 200 m-Raster genutzt.

Da der Zusammenhang zwischen Aufstiegsweg und Aufstiegsrate nichtlinear verläuft, ist eine Mittelwertbildung über größere Flächen mit innerhalb der Geometrie stark schwankenden Flurabständen problematisch. Deshalb dürfen Bereiche ohne kapillaren Aufstieg nicht mit einbezogen werden, sondern werden durch den Parameter "Ausmaß der Grundwasserbeeinflussung" separat berücksichtigt. In der Mehrzahl aller Substrate findet bei mehr als 150 cm Aufstiegsweg kein kapillarer Aufstieg mehr statt (MORHARD 2009). Relevant sind demnach bei Durchwurzelungstiefen von 0.6 m, 1.0 m und 1.5 m, wie sie für die Landnutzungsklassen des CORINE-Datensatzes parametrisiert wurden, nur Flurabstände bis 2.1 m (≈ 2.0 m), 2.5 m bzw. 3.0 m (Tab. 3.2). Im Zuge der Erstellung der Eingangsdatensätze wurden für jede Grundfläche jeweils der relative Flächenanteil mit einem Flurabstand kleiner des jeweiligen Schwellenwertes und der mittlere Flurabstand in diesem Anteil bestimmt. Für Grünland wurde an Stelle eines Aufstiegsweges von 1,5 m als Grenzwert die "runde Zahl" Flurabstand ≤ 2.0 m gewählt (= 1.4 m kapillarer Aufstiegsweg).

Tab. 3.2: Modellrelevante Nutzungsklassen mit angenommenen Durchwurzelungstiefen und Schwellenwerten für den Grundwasserflurabstand, bei welchem noch kapillarer Aufstieg erfolgt.

Nutzungsklasse	effektive Durchwurzelungstiefe	kapillarer Aufstieg bei Flurabstand bis (ca.)
Grünflächen und parkähnliche Vegetation im Bereich von Siedlungen und anderen teilweise bebauten Flächen (CORINE-Klassen 111-142)	60 cm	2.0 m
Grünland	60 cm	2.0 m
Ackerflächen, Mischflächen mit Landwirtschaft und natürlicher Bodenbedeckung	100 cm	2.5 m
natürliches Grünland, Strauch-, Wald-Übergangsstadien, Heiden und Moorheiden	100 cm	2.5 m
Sümpfe und Torfmoore	100 cm	2.5 m
Wälder	150 cm	3.0 m
Wein & Obst	150 cm	3.0 m
Flächen mit spärlicher Vegetation (CORINE-Klasse 333)	60 cm	2.0 m
Felsflächen, Dauerschneeflächen, Gewässerflächen	---	kein kapillarer Aufstieg

3.1.5 Baseflow-Index

Der vieljährige mittlere Quotient aus Basisabfluss und Gesamtabfluss (A_U/A , Baseflow-Index) wurde in Baden-Württemberg mit Ausnahme der quartären Lockergesteinsgrundwasserleiter (BFI=1) im Einzugsgebietsmaßstab ermittelt und regionalisiert. Zur Übertragung auf die Grundflächen wurde der gebietsbezogene Quotient A_U/A zunächst in 50 m-Auflösung gerasert und anschließend der Mittelwert aus den unter jeder Grundfläche liegenden Zellen gebildet. Für Bayern wurde der Quotient A_U/A bzw. BFI auf Einzugsgebietsebene ermittelt und mit Hilfe von multiplen linearen Regressionsanalysen auf ein 200 m-Raster übertragen. Demgegenüber ist der BFI in Rheinland-Pfalz deutlich gröber aufgelöst und liegt bezogen auf einzelne Grundwasserlandschaften vor. Dabei treten hier die in den Talsohlen der Mittelgebirge vorhandenen Lockergesteinsfüllungen mit direkter Sickerung zum flussbegleitenden Grundwasser in aller Regel nicht mehr in Erscheinung. Um für die in diesen Bereichen gelegenen Grundflächen nicht fälschlicherweise den BFI des angrenzenden Festgesteins bzw. gemittelt über die gesamte Grundwasserlandschaft zu übernehmen, wurden die quartären Lockergesteinsfüllungen wie in Baden-Württemberg mit einem BFI von 1.0, auf Basis der Hydrogeologischen Übersichtskarte (1:200 000), in den Datensatz eingearbeitet.

Neben den beschriebenen methodischen Unterschieden und hinsichtlich der räumlichen Auflösung wird im bayerischen BFI-Datensatz der Anteil versiegelter Flächen mit Hilfe eines zusätzlichen pauschalen Reduktionsfaktors je nach Versiegelungsgrad berücksichtigt, so dass unter einer Siedlungsfläche stets eine Rasterzelle mit einem geringeren Anteil an Basisabfluss liegt. In Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz wird dagegen einer Siedlungsfläche zunächst der (höhere) BFI der Umgebung zugeordnet. Als Konsequenz aus diesen Unterschieden wird für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz der BFI mit der Sickerwassermenge (die durch den Versiegelungsanteil reduziert ist) multipliziert, in Bayern wird der BFI gemäß der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Zusammenhänge direkt auf den Gesamtabfluss angewendet. Die räumliche Verteilung der BFI-Werte zeigt trotz der Unterschiede in der Methodik zur Ermittlung eine über die Ländergrenzen hinweg sehr plausible und die Naturräume widerspiegelnde Verteilung (Abb. 3.5). Mögliche methodisch bedingte Randeffekte treten lediglich zwischen Bayern und Baden-Württemberg auf, an der Grenze von Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg auf Grund der Ländergrenze im Rheintal hingegen nicht (jeweils BFI=1).

Insgesamt zeichnen sich die verschiedenen Naturräume innerhalb des KLIWA-Untersuchungsraums durch ein sehr breites Spektrum von BFI-Werten aus. So sind die auffallend geringen Anteile von Basisabfluss im Nordwesten charakteristisch für das rheinische Schiefergebirge mit den dort vorherrschenden geringen Durchlässigkeiten. Dem gegenüber sind die quartären Talfüllungen längs von Rhein und Donau (inkl. der südlichen Zuflüsse) durch meist sehr hohe BFI-Werte in der Größenordnung von 1 gekennzeichnet.

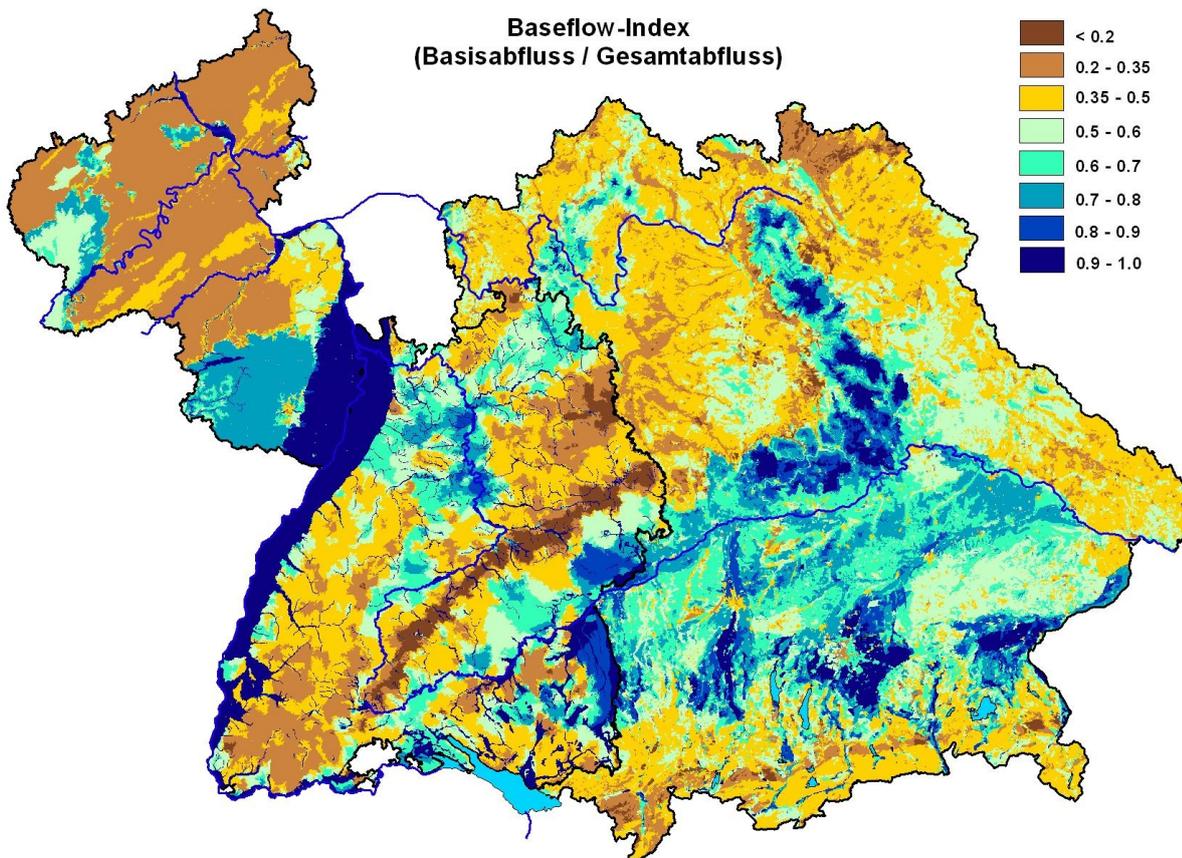


Abb. 3.5: Darstellung des länderspezifisch ermittelten Baseflow-Index (Quotient Basisabfluss/Gesamtabfluss) von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.

3.2 Grundflächen

Die räumliche Differenzierung der Modellergebnisse ergibt sich aus der für die Modellierung erforderlichen Unterteilung des Modellgebiets in Flächen von einheitlicher Landnutzung und Bodeneigenschaften (Grundflächen). Bei der Erstellung der physiographischen Eingangsdatensätze wurde deshalb darauf geachtet, eine nach Datengrundlage und Methodik der Aufbereitung in allen Bereichen weitgehende Konsistenz zu erreichen. So basieren die Grundflächen für die drei Länder auf einer Verschneidung der CORINE-Landnutzung mit der jeweils am besten aufgelösten, landesweit verfügbaren Bodenkarte und anschließender Bereinigung um bei der Verschneidung entstehende Kleinstflächen ($< 0.04 \text{ km}^2$). Flächen größer 10 km^2 wurden durch Überlagerung mit einem 2.5-km Raster weiter unterteilt.

Der endgültige Grundflächenbestand für Baden-Württemberg umfasst 65 645 Flächen, für Rheinland-Pfalz 34 816 und für Bayern 66 005 Grundflächen (Tab. 3.3). Insgesamt entstanden somit 166 466 Grundflächen mit jeweils einheitlicher Landnutzung-nFKWe-Kombination, welche die drei Landesflächen mit insgesamt $126 170 \text{ km}^2$ abbilden. Von der Zahl der Flächen dominieren kleine Einheiten bis 1 km^2 . Bezogen auf die eingenommene Gesamtfläche ist die Größenklasse 1 bis 5 km^2 in allen drei Ländern am stärksten vertreten. In Bayern wurden auch wenige sehr große Grundflächen mit Größen zwischen 10 und 445 km^2 gebildet (Abb. 3.6).

Tab. 3.3: Häufigkeitsverteilung der Grundflächengrößen in den drei Bundesländern.

Größe [km ²]	Anzahl	Gesamtfläche [km ²]	Anteil [%]	Land
0.04 - 0.25	32 472	3881	10.9	BW
0.25 - 1.0	24 467	11 941	33.4	BW
1.0 - 5.0	8 122	16 059	44.9	BW
5.0 - 10.0	584	3 857	10.8	BW
Summe	65 645	35 739	100	BW
0.04 - 0.25	16 491	1 935	9.7	RP
0.25 - 1.0	13 395	6 632	33.4	RP
1.0 - 5.0	4 594	9 109	45.9	RP
5.0 - 10.0	336	2 180	11.0	RP
Summe	34 816	19 856	100	RP
0.01 - 0.25	25 275	2 869	4.1	BY
0.25 - 1.0	27 709	14 004	19.8	BY
1.0 - 5.0	11 005	22 206	31.5	BY
5.0 - 10.0	1 180	8 130	11.5	BY
10.0 - 100.0	807	18 328	26.0	BY
100.0 - 445.0	29	5 039	7.1	BY
Summe	66 005	70 576	100	BY
Summe	166 466	126 170.2	100	KLIWA

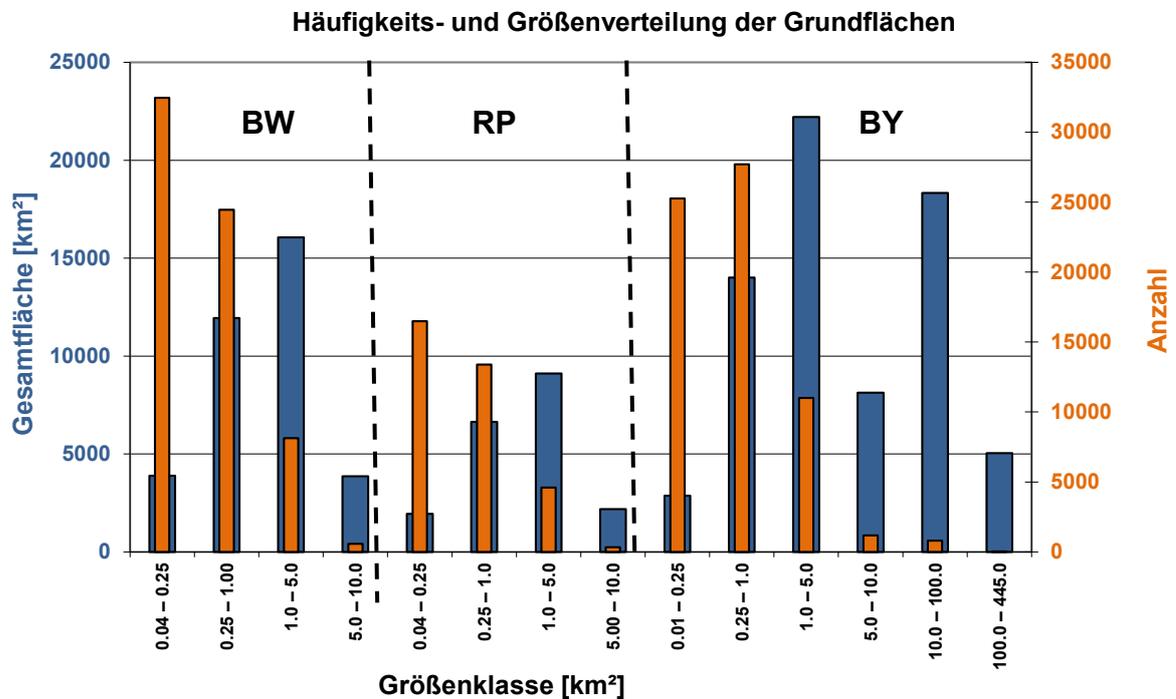


Abb. 3.6: Häufigkeitsverteilung der Grundflächengrößen im Untersuchungsgebiet, blau = nach abgedeckter Fläche, orange = nach Anzahl.



3.3 Klimadaten

Der meteorologische Antrieb für das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW besteht aus Tageswerten für unkorrigierten Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windstärke. Bei der nachfolgend beschriebenen Datengrundlage der WETTREG-Szenariendaten handelt es sich um stationsbezogene Tageswertreihen.

3.3.1 Homogenisierte Zeitreihen

WETTREG ist ein statistisches Regionalisierungsverfahren, das auf Basis von Stationsdaten für diejenigen Stationen Ergebnisse generiert (Realisation), an denen auch Messreihen zur Verfügung stehen. WETTREG bestimmt das Klimasignal nicht direkt aus den Szenariorechnungen des globalen Klimamodells, sondern über die Kausalkette von sich ändernden Häufigkeiten der Wetterlagen in den täglichen Realisierungen des globalen Klimamodells, die hohe oder tiefe Temperaturwerte und geringen oder starken Niederschlag verursachen (SPEKAT ET AL. 2007).

Eingangsdaten sind meteorologische Messdaten von Klimastationen und Niederschlagsstationen in täglicher Auflösung, die einem Aufbereitungsprozess unterzogen werden, um Reihen in der erforderlichen Qualität, u. a. hinsichtlich Lücken und Ausreißern, zu erhalten. Die auf diese Weise entstandenen „homogenisierten Zeitreihen“ bilden die Datengrundlage für den Wettergenerator und sie sind auch Vergleichsgrundlage für die Beurteilung der Übereinstimmung von WETTREG-generierten Reihen für den Ist-Zustand 1971–2000 mit den vorliegenden Beobachtungen. Daher wurden die „homogenisierten Zeitreihen“ für ausgewählte Stationen gegen die Beobachtungsdaten abgeglichen, was zum Teil nicht vollständig erklärbare Unterschiede erbrachte.

Ein weiterer Abgleich wurde zwischen den „homogenisierten Messdaten“ und den 10 Realisationen des WETTREG2006-Modells für den Ist-Zustand (1971-2000) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Jahresmittelwerte von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit an 14 untersuchten Stationen von homogenisierter Reihe und den 10 Realisationen sich praktisch nicht unterscheiden, d. h. die Jahresmittelwerte sowohl jeder einzelnen Realisation wie auch der Ursprungsreihe stimmen i.d.R. auf 0.1 bis maximal 0.2 °C bzw. m/s überein. Eine Variabilität ist dagegen für Niederschlag und Sonnenscheindauer vorhanden, wobei letztere ihrer Größenordnung nach einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Simulation des Bodenwasserhaushalts besitzt und nicht eingehend analysiert wurde.

Systematisch und zugleich sensitiv für die Simulation des Bodenwasserhaushalts sind die Abweichungen beim Niederschlag. An allen 14 zufällig ausgewählten, über das Projektgebiet verteilten Stationen sind sämtliche zehn Realisationen trockener als die „homogenisierten Messdaten“, d.h. selbst die jeweils feuchteste der zehn Realisationen kommt nicht an die mittlere Jahressumme der homogenisierten Reihe heran. Im Mittel liefern die Realisationen 4.6 % weniger Niederschlag (-5.5 % bis -3.4 %) als die homogenisierte Reihe (siehe Tab.3.4).

Die vorliegenden Szenariendaten im Untersuchungsgebiet umfassen eine geringere Anzahl von Stationen als die homogenisierten Reihen. So stehen 1 209 homogenisierten Zeitreihen nur 1 192 Reihen in den Szenariendaten gegenüber. Zu 17 Stationen aus dem Kollektiv mit homogenisierten Zeitreihen wurden keine Szenariendaten generiert, umgekehrt findet sich dagegen stets eine Zuordnung.

Tab. 3.4: Vergleich der mittleren Niederschlagshöhe von homogenisierter Reihe und 10 Realisationen für den Ist-Zustand (1971–2000) an 14 ausgewählten Stationen.

Niederschlag [mm/a]		10 Realisationen			
Station	homogen.	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittel/homogen.
PIRMASENS	901.2	864.1	845.2	880.1	0.959
KOBLENZ-HORCHHEIM	625.4	591.0	580.1	601.7	0.945
MAINZ	604.9	579.1	566.3	593.4	0.957
KARLSRUHE (WST)	767.2	738.0	715.9	757.8	0.962
HEILBRONN	747.1	721.6	705.4	738.5	0.966
HINTERZARTEN	1456.3	1379.4	1321.2	1413.9	0.947
SIGMARINGEN-LAIZ	787.7	748.4	738.0	764.9	0.950
ISNY	1646.4	1555.9	1523.2	1589.2	0.945
NOERDLINGEN	651.2	626.5	607.6	640.7	0.962
WUERZBURG (WST)	556.6	529.7	507.3	544.9	0.952
BAYREUTH	725.1	692.1	663.3	704.2	0.954
REGENSBURG (WST)	635.9	605.8	577.3	616.2	0.953
TOELZ,BAD	1468.2	1407.1	1362.5	1435.3	0.958
WENDELSTEIN (WST)	1668.8	1583.0	1542.8	1626.7	0.949

3.3.2 WETTREG-Szenariendaten

Im Rahmen des KLIWA-Projektes wurden die zum damaligen Zeitpunkt (2009) für Süddeutschland verfügbaren regionalen Klimaszenarien regionenspezifisch ausgewertet. Darauf aufbauend wurde entschieden, im Rahmen von KLIWA zunächst lediglich die beiden auf statistischen Grundlagen beruhenden Klimaprojektionen WETTREG2003/B2 (nur BW und BY) und WETTREG2006/A1B zu verwenden (KLIWA 2009). Daher wurde auch für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung vor allem die regionale Klimaprojektion WETTREG2006 verwendet, welche vom UBA beauftragt wurde und somit deutschlandweit vorliegt (SPEKAT ET AL. 2007). Der WETTREG2006-Datensatz stützt sich auf Wetterlageninformationen aus dem aktuellen Globalmodell ECHAM5 mit dem Emissionsszenario A1B. Es wurden Berechnungen für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und orientierend auch für die ferne Zukunft (2071-2100) durchgeführt. Ergänzend wurden auf Grundlage des seinerzeit von KLIWA beauftragten Szenariendatensatzes WETTREG2003 (ECHAM4/B2) Berechnungen (KLIWA, 2006) durchgeführt, die sich jedoch auf die „alten“ KLIWA-Länder Bayern und Baden-Württemberg beschränken mussten, da diese Antriebsdaten für Rheinland-Pfalz nicht vorliegen. Im Mittelpunkt der Auswertungen zu Bodenwasserhaushalt, Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung standen jedoch die mit WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) erzeugten Ergebnisse für die nahe Zukunft.

Das Bodenwasserhaushaltsmodell wurde mit sämtlichen vorliegenden Tageswertzeitreihen der oben genannten WETTREG-Datensätze angetrieben, um schließlich für die regionalisierten Eingangs- und Ergebnisgrößen 30-jährige Jahres-, Halbjahres- und Monatsmittelwerte zu erhalten (vgl. Tab. 5.1).

Der für die Szenarienrechnungen verwendete WETTREG2006-Datensatz (ECHAM5/A1B) umfasst 183 Klima- und 1 292 Niederschlagsstationen, welche auch die an das KLIWA-Untersuchungsgebiet angrenzenden Länder Saarland, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Thüringen und die Schweiz teilweise abdecken (Abb. 3.7). Für Frankreich, Österreich und Tschechien lagen keine Daten vor. Zusammen mit den homogenisierten Messreihen (1971-2000) lagen somit 1 830 Jahre mit Tageswerten für Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit vor (Tab. 3.5), die im Rahmen



der notwendigen Konvertierung in das Zielformat auch einer umfassenden Plausibilitätsprüfung unterzogen wurden.

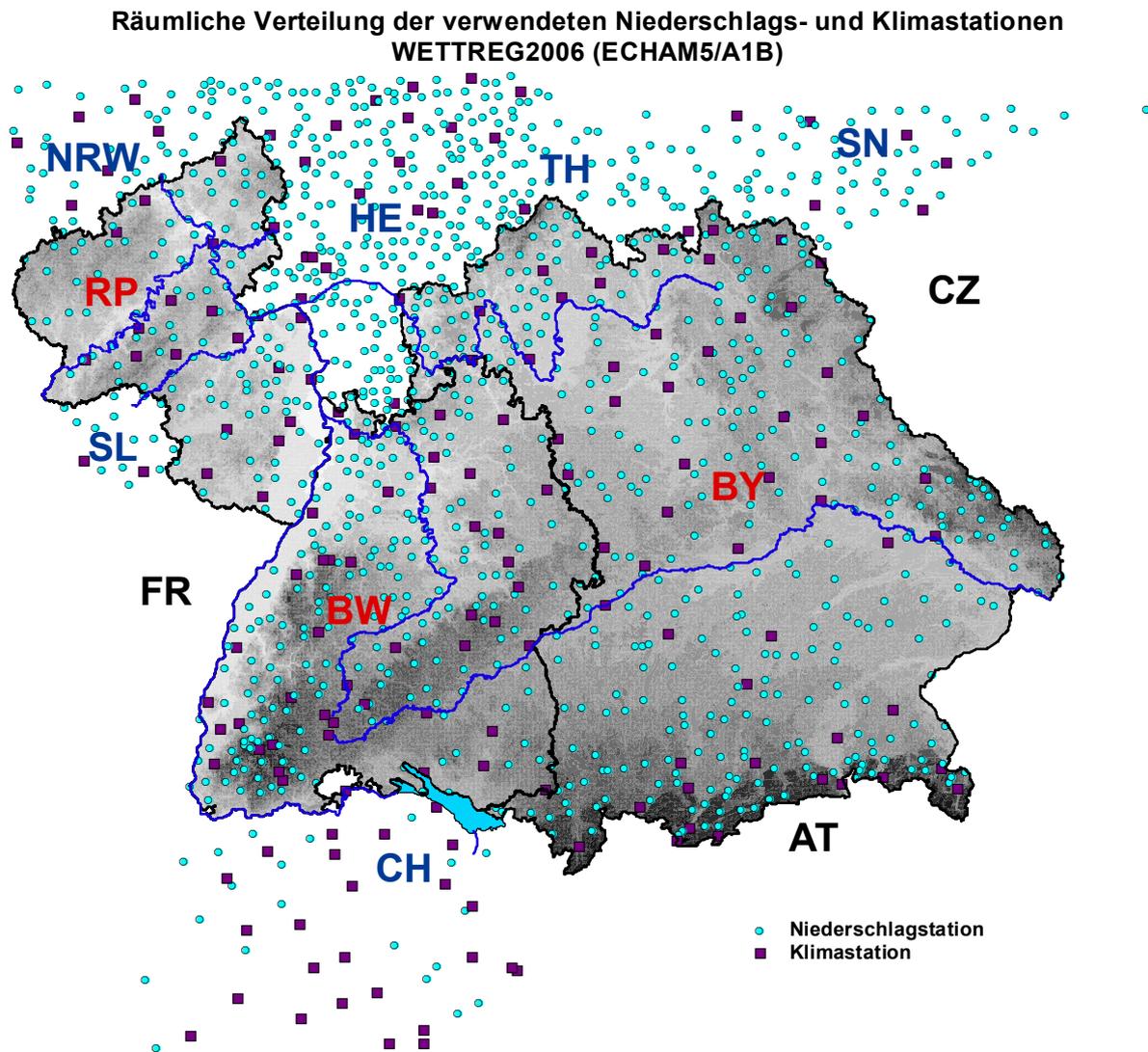


Abb. 3.7: Räumliche Verteilung der verwendeten Niederschlags- und Klimastationen, WETTREG2006 ECHAM5/A1B. KLIWA-Länder = rot, Nachbarländer mit Daten = blau, Nachbarländer ohne Daten = schwarz.

Als Ergebnis der Kontrolle extremer oder potenziell fragwürdiger Einzelwerte lässt sich festhalten, dass beim Niederschlag die Extremwerte in den Zukunftsszenarien größer und häufiger werden. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit nimmt die Häufigkeit winterlicher Ereignisse mit sehr geringen Werten < 20 %, wie sie in den Hochlagen von Alpen und Mittelgebirgen tatsächlich mitunter beobachtet werden, überraschend stark zu. Dies könnte entgegen dem Trend zu milderem Wintern durchaus mit dem Auftreten einzelner Wetterlagen zusammenhängen. Außerdem zeigt sich, dass der statistische Szenariengenerator auch an solchen Stationen in den Hochlagen immer wieder Witterungssituationen mit extrem trockener Luft einstreut. Es handelt sich dabei jedoch um wenige Einzelfälle. Generell sehen die in den Szenariendaten auftretenden Extremwerte im Hinblick auf Wertebereich und Häufigkeit plausibel aus.

Tab. 3.5: Umfang der Datengrundlage für die Szenarienrechnungen mit WETTREG2006 (ECHAM5/A1B).

	Realisationen (Stichproben)	Dekaden	Jahre	(Modell)-Jahre
„Homogenisierte Reihen“	1	3	10	30
Ist-Zustand (1971-2000)	10	3	20	600
Nahe Zukunft (2021-2050)	10	3	20	600
Ferne Zukunft (2071-2100)	10	3	20	600
Summe	31	12	70	1 830

Die festgestellten Differenzen, insbesondere auch die systematische Abweichung zwischen homogenisierten Ausgangsreihen und niederschlagsärmeren Realisationen, stellen die Verwendbarkeit der WETTREG-Daten für die durchzuführenden Szenariosimulationen nicht in Frage. Sie zeigen jedoch deutlich, dass auf Grundlage synthetischer Daten gewonnene Ergebnisse für die Zukunft immer nur mit den Ergebnissen auf Basis entsprechender synthetischer Realisationen für den Ist-Zustand verglichen werden dürfen. Dies umso mehr, als fünf Prozent weniger Niederschlag (siehe Kap. 3.3.1) unter süddeutschen Klimabedingungen zu prozentual noch deutlich weniger Sickerwasserbildung führen kann.

3.4 Initialisierung von Schneedecke und Bodenspeicher

Zu Beginn einer Berechnung mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell ist ein plausibler Anfangszustand der verschiedenen Speicher sicherzustellen, damit auch die Simulationsergebnisse am Anfang der betrachteten Zeitspanne interpretiert werden können. Die Initialisierung der Speicherfüllung für Bodenwassergehalt und Schneedecke erfolgte daher für alle Simulationen mit den vorab ermittelten mittleren, im Vergleichszeitraum 1971-2000 zum Jahreswechsel (31.12.) berechneten Startwerten, wodurch insbesondere die Verteilung von Bereichen mit mehr oder weniger vollständiger Füllung des Bodenwasserspeichers und die in Bayern regional erhebliche Rücklage im Schneespeicher berücksichtigt wurden. Der mit Standardwerten (Boden vollständig gesättigt, kein Schnee) initialisierte Simulationslauf zur Bestimmung der Startwerte erfolgte auf Grundlage der homogenisierten Zeitreihen. Die räumliche Verteilung der mittleren Speicherfüllung zum Jahreswechsel ist für die beiden zu initialisierenden Speicher – Bodenwassergehalt und Rücklage in der Schneedecke – in den Abbildungen 3.8 und 3.9 dargestellt.

Wie erwartet sind die Böden in großen Teilen Süddeutschlands zu Jahresbeginn bereits weitgehend gesättigt (Abb. 3.8). Im landesweiten Mittel liegt die Speicherfüllung bei 90 % (Rheinland-Pfalz, Bayern) bzw. knapp 93 % (Baden-Württemberg). Gleichwohl sind auch Regionen erkennbar, in denen der Bodenwasserspeicher meist nur zu 70 bis 80 % gefüllt ist. Dies betrifft Rheinhessen und Teile des nördlichen Oberrheingraben, weite Teile Mittelfrankens sowie Bereiche in Unterfranken, im Mittleren Neckarraum und auf der Schwäbischen Alb. Im letzteren Fall ist vermutlich nicht mangelnder Niederschlag ursächlich, sondern Böden mit nur 50 bis 75 mm Speichervermögen für pflanzenverfügbares Wasser.

Damit reicht bereits eine auch in Wintermonaten auftretende Verdunstung von 10 bis 15 mm aus, um die Böden um 20 % ihrer Kapazität zu entleeren. Der gleiche Effekt dürfte im Alpenraum auftreten, wo allerdings zusätzlich noch fallender Niederschlag bevorzugt in der Schneedecke festgehalten wird, so dass erst wieder Schneeschmelze einsetzen muss, damit Wasser in den Bodenspeicher gelangen kann.

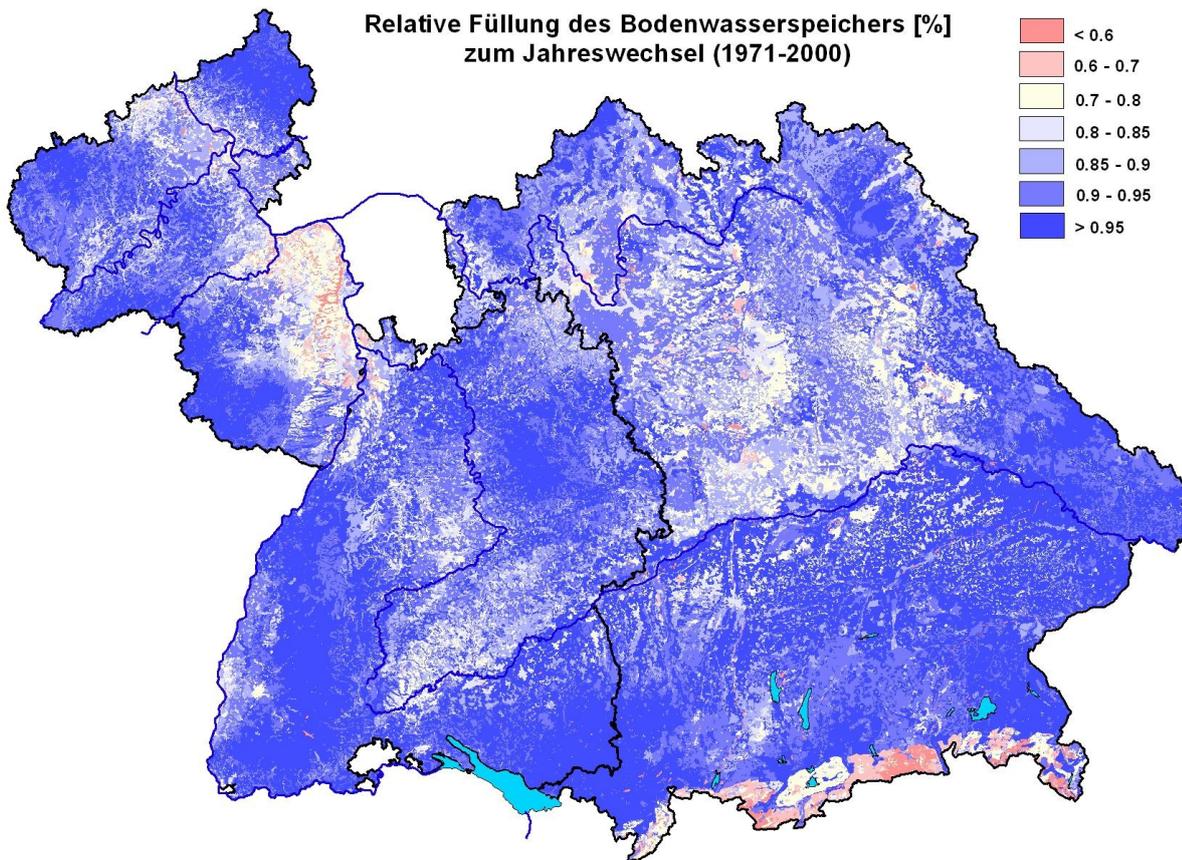


Abb. 3.8: Mittlere relative Füllung des Bodenwasserspeichers zum Jahreswechsel (1971-2000).

Aus der Darstellung des im Mittel zu Jahresbeginn in Form von Schnee gespeicherten Wasseräquivalents (Abb. 3.9) geht zunächst hervor, dass in weiten Teilen der drei Länder zum Jahreswechsel häufig gar kein oder nur sehr wenig Schnee liegt. Dies gilt insbesondere für Rheinland-Pfalz, wo zum Jahreswechsel mit höherer Wahrscheinlichkeit nur in der Eifel und im Westerwald eine geschlossene Schneedecke erwartet werden kann. Die Schneehöhe liegt bei mittleren Werten von etwa 5 bis 10 cm, nur im Hohen Venn bei etwas mehr als 15 cm (Tab. 3.6). Einzeljahre können selbstverständlich abweichen.

In Baden-Württemberg finden sich mit dem Schwarzwald und der Schwäbischen Alb zwei größere Regionen mit um den Jahreswechsel häufig flächenhaft ausgeprägter Schneedecke (Tab. 3.6). Dabei nimmt die im Südschwarzwald weiträumig verbreitete Rücklage von 50 bis 100 mm Wasseräquivalent (25 bis 50 cm Schneehöhe) eine den Wasserhaushalt nennenswert beeinflussende Dimension an. In den Gipfellagen der Feldbergregion werden bis zu 80 cm Schneehöhe erreicht. Demgegenüber ist auf der Schwäbischen Alb eine zwar flächenhafte, indes nur geringmächtige Schneedecke von einigen wenigen Zentimetern anzutreffen.

Auch in Bayern sind einerseits größere Teile der Landesfläche zum Jahreswechsel in der Regel weitgehend schneefrei, andererseits liegen zwei Regionen häufiger unter einer ausgeprägten Schneedecke. Es sind dies der gesamte Nordosten des Landes (Bayerischer Wald, Oberpfälzer Wald, Fichtelgebirge, das Bayerische Vogtland und die östlichen und nördlichen Teile der Frankenalb) und der Alpenraum mitsamt dem Alpenvorland. Hier erstreckt sich dieser Bereich nordwärts bis auf die Höhe von Starnberger See und Ammersee. Angaben zu den im Mittel zum Jahreswechsel zu erwartenden Schneehöhen können Tabelle 3.6 entnommen werden. In allen Fällen können die Verhältnisse in Einzeljahren erheblich von den hier diskutierten langjährigen Mittelwerten abweichen.

Im Übrigen sind die ausgehend von dem in der Schneedecke gespeicherten Wasseräquivalent gemachten Angaben zur Schneehöhe als grobe Schätzwerte anzusehen.

Tab. 3.6: Mittlere Rücklage in der Schneedecke zum Jahreswechsel in den Gipfellagen ausgewählter Mittelgebirgsregionen Süddeutschlands und der bayerischen Alpen (1971-2000).

Region	Schneespeicherfüllung [mm]	Schneehöhe ca. [cm]
Eifel und Westerwald	10 - 20	5 - 10
Hohes Venn	32.5	15
Südschwarzwald	50 - 100	25 - 50
Feldberggebiet	160	80
Schwäbische Alb	10 - 20	5 - 10
Rhön (Hochlagen)	50	25
Fichtelgebirge	50 - 75	25 - 35
Bayerischer Wald	100 - 150	50 - 75
Bayerische Alpen	500	250

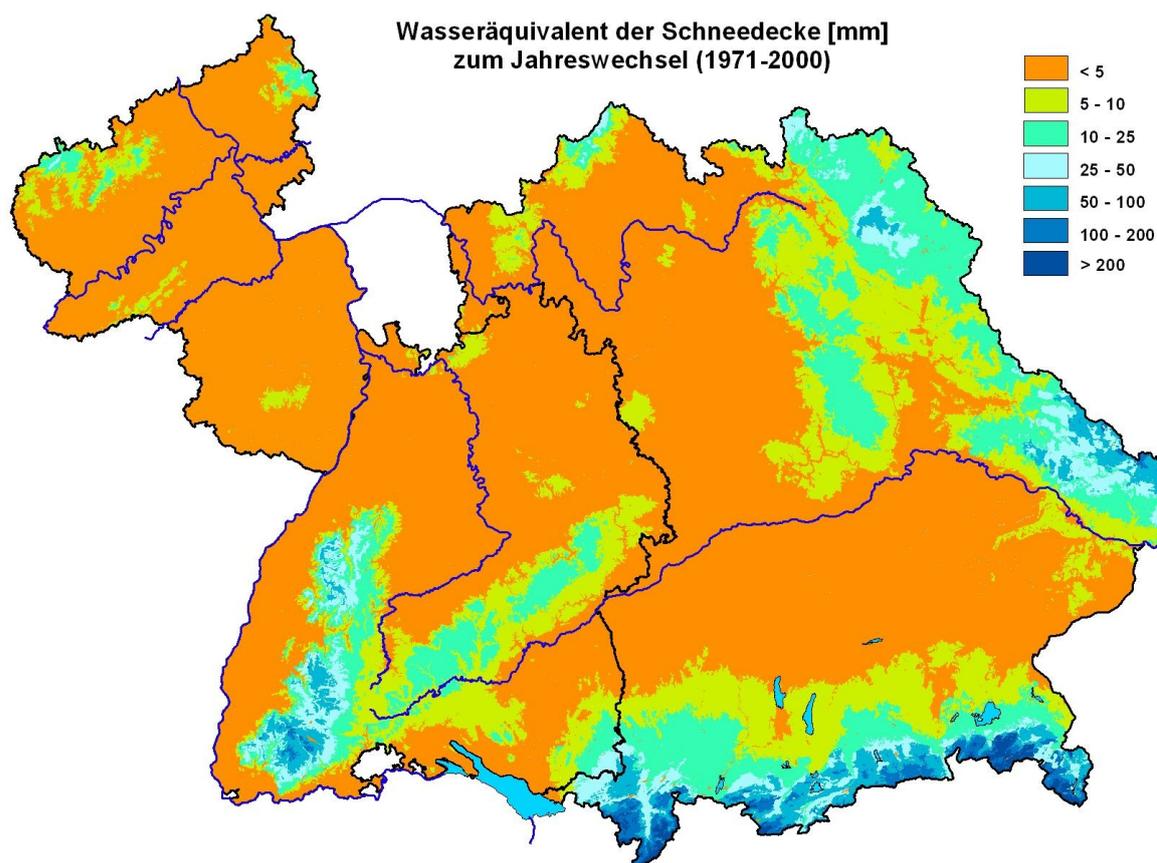


Abb. 3.9: Mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke zum Jahreswechsel (1971-2000), Angaben in mm.



4 Plausibilisierung der Modellergebnisse

4.1 Validierung an Abflussdaten

Eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung von Szenariosimulationen ist die Prognosefähigkeit des Modells. Dabei wird vorausgesetzt, dass das eingesetzte Bodenwasserhaushaltsmodell (inkl. der anschließenden Ermittlung der Grundwasserneubildung) in der Lage ist, auf der Basis gemessener Daten den Wasserhaushalt in der Vergangenheit möglichst realitätsnah abzubilden. Ist dies der Fall und liegen die zukünftigen Verhältnisse innerhalb des Anwendungsbereichs des Modells, so ist modellseitig auch für den Szenariozeitraum mit plausiblen Ergebnissen zu rechnen. Um dies zu überprüfen, werden gemessene Daten im Sinne einer Validierung den entsprechenden Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Im vorliegenden Fall wurde dazu ein gebietsbezogener Mittelwert der flächendifferenzierten Gesamtabflusshöhe (Modellergebnis) dem am Pegel abgeleiteten mittleren Abfluss gegenübergestellt. In gleicher Weise wurde auch die simulierte Grundwasserneubildung mit Hilfe des pegelbezogenen Basisabflusses validiert (MoM_{NQ}_{red}, ermittelt gemäß KILLE 1970). Diese Art der Validierung wurde in insgesamt 293 Einzugsgebieten (EZG) für den Gesamtabfluss bzw. 269 Einzugsgebieten für den Basisabfluss (in Baden-Württemberg 50 EZG, in Bayern 139 EZG und in Rheinland-Pfalz 104 bzw. 80 EZG) durchgeführt. In Tabelle 4.1 sind die Validierungsergebnisse länderweise dargestellt.

Tab. 4.1: Simulierte Gesamtabflusshöhe und Grundwasserneubildung aus Niederschlag – Validierung der Ergebnisse an Hand von Pegeldaten (MQ und MoM_{NQ}_{red} gemäß KILLE 1970) in ausgewählten Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Angaben in mm/a.

Land	MQ	simuliert	simuliert-gemessen	simuliert/gemessen	MoM _{NQ} _{red}	simuliert	simuliert-gemessen	simuliert/gemessen
BW	516.0	539.1	23.1	1.045	216.6	228.7	12.1	1.056
BY	384.1	422.7	38.6	1.101	196.7	204.7	8.0	1.041
RP	290.8	322.5	31.7	1.109	126.4	128.8	2.4	1.019

Prinzipiell zeigt sich im Mittel eine recht gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den pegelbezogenen Daten. Bezogen auf die drei Bundesländer ergibt sich für den Gesamtabfluss über alle Einzugsgebiete eine leichte Überschätzung von etwa 5-10 %. Die Grundwasserneubildung liegt mit 2-6 % ebenfalls geringfügig höher als die aus den Pegeldaten abgeleiteten Basisabflüsse. Bei der Analyse der festgestellten Abweichungen sind sowohl die Unsicherheiten der Modelleingangsdaten als auch die des Modells selbst zu berücksichtigen. So wurden z. T. erhebliche Unterschiede zwischen den homogenisierten Niederschlagsdaten von WETTREG und den eigentlichen Messdaten für den Zeitraum 1971-2000 festgestellt. Weiterhin zeigt ein Vergleich auf Basis der in Bayern zu anderen Zwecken verwendeten REGNIE-Daten (regionalisierte Niederschlagsdaten des DWD) geringere Abweichungen als oben dargestellt. Den hier aufgeworfenen Fragen, auch im Zusammenhang mit der Korrektur des Niederschlagsmessfehlers, wird im Rahmen weitergehender Untersuchungen zum Gebietswasserhaushalt in Teilbereichen nachgegangen.

Betrachtet man die Ergebnisse der Validierung unter Berücksichtigung aller gebietsbezogenen Mittelwerte, so ergibt sich das in Abb. 4.1 dargestellte Bild. Dabei zeichnet sich der Gesamtabfluss durch ein hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2=0.9$ aus, während die Grundwasserneubildung auf Grund zusätzlicher, potentiell fehlerbehafteter Eingangsgrößen (Baseflow-Index) erwartungsgemäß etwas stärker streut ($R^2=0.73$). Insgesamt können die simulierten Werte für die Grundwasserneubildung und den Gesamtabfluss als plausibel angesehen werden.

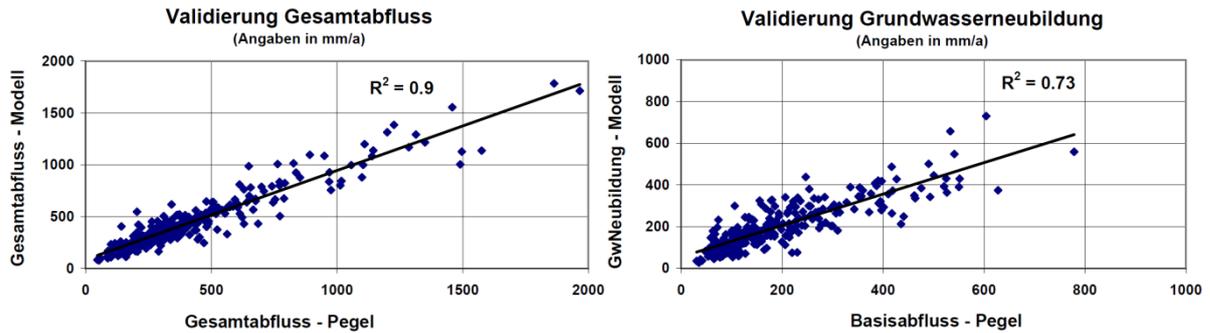


Abb. 4.1: Validierung von Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2000. Gegenüberstellung von simulierten (GWN-BW) und gemessenen Werten (Pegeldaten) auf der Basis von 293 Einzugsgebieten für den Gesamtabfluss bzw. 269 Einzugsgebieten für den Basisabfluss in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Angaben in mm/a.

4.2 Abgleich mit den Ergebnissen von KLIWA-Heft 14 (Niedrigwasser)

Im Rahmen von KLIWA wurden mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen in Baden-Württemberg (LARSIM) sowie in Teilen von Bayern (WaSiM-ETH) und Rheinland-Pfalz (LARSIM) Szenariosimulationen zur möglichen Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse durchgeführt. Die Modellergebnisse wurden anschließend im Hinblick auf die Entwicklung verschiedener Niedrigwasserkennwerte statistisch ausgewertet und zusammenfassend als KLIWA-Heft 14 (Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz) publiziert. Da als regionales Klimaszenario dieselben WETTREG2006-Daten wie bei den Bodenwasserhaushaltssimulationen verwendet wurden, stellte sich die Frage, ob die Ergebnisse beider Untersuchungen vergleichbar bzw. zumindest zueinander konsistent sind. Dabei erscheint plausibel, dass klimatisch induzierte Verschärfungen der Niedrigwassersituationen in den Gewässern mit entsprechenden Klimasignalen im Bereich des Bodenwasserhaushalts korrelieren sollten. Auch wenn die Simulation des Bodenwasserhaushalts mit GWN-BW lediglich die Abflussbildung in der Fläche und nicht die Auffüllung und Entleerung der Gebietsspeicher mit der daraus resultierenden Abflusskonzentration im Gerinne (Niedrigwasserabfluss) und dem anschließenden Routing beschreibt, sollten im Rahmen eines systematischen Vergleichs zumindest folgende Aspekte untersucht werden:

- die Größenordnung der Änderungen,
- das grobe räumliche Verteilungsmuster.

Vorab war zu klären, welche der zahlreichen Auswertegrößen überhaupt für einen Ergebnisvergleich in Betracht kommen. Dabei wurde deutlich, dass ein 1:1-Vergleich von Kennwerten, wie z.B. der monatlichen Niedrigstwerte (Abflussbildung aus Bodenwasserhaushalt gegenüber Abfluss im Gerinne), methodisch bedingt nicht möglich ist. Da das Bodenwasserhaushaltsmodell keine Retention bzw. Dämpfung durch die Gebietsspeicher, insbesondere durch die tiefere ungesättigte Zone und den Grundwasserleiter zeigt, werden hier erwartungsgemäß sehr viel höhere Einzelwerte als bei den gerinnebezogenen Daten beobachtet. Vergleichbarkeit zwischen Modellergebnissen ist somit nur dann gegeben, wenn dieser Effekt auch bei den aus dem Bodenwasserhaushalt resultierenden Abflüssen in irgendeiner Weise berücksichtigt werden kann.



Zu diesem Zweck wurde versuchsweise eine jahreszeitlich gewichtete Kenngröße auf der Basis der Veränderungen des Abflusses (Q) der jeweils trockeneren (tr) und feuchteren Jahreshälfte (fe) abgeleitet (MORHARD 2011):

$$\text{Abfluss-Index}_{\text{GWN-BW}} = (0.75Q(\text{tr}) + 0.25Q(\text{fe}))$$

Mit Hilfe dieses Index sollte die zur Niedrigwassersituation im Gerinne führende trockenere Jahreshälfte, in der eine Speicherentleerung erfolgt, stärker gewichtet werden, ohne jedoch die feuchtere Jahreshälfte, in der eine Speicherfüllung erfolgt, gänzlich zu ignorieren. Dieser Vorgehensweise liegt die Modellvorstellung eines Gebietsspeichers mit einem zur Speicherfüllung proportionalen Abfluss zugrunde, bei dem die zuvor erfolgten Speicherzuflüsse einen umso geringeren Einfluss auf die aktuelle Speicherfüllung und damit auch den aktuellen Abfluss aus dem Speicher besitzen, je weiter sie zeitlich zurückliegen.

Beim Vergleich der Änderungssignale dieses Kennwertes zeigen sich in den meisten Bereichen Rückgänge zwischen 0 und 20 %, was etwa den durchschnittlichen Abnahmen der MNQ-Werte auf Basis der Pegeldata entspricht. Auch die räumliche Verteilung zeigt weitreichende Übereinstimmungen mit jeweils vergleichsweise großen Abweichungen im Osten Baden-Württembergs und den südlichen Teilen des bayerischen Maingebiets und geringeren Änderungen nördlich und westlich davon. In kleineren Teilbereichen, wie etwa dem Schwarzwald oder dem Naheeingangsgebiet, lassen sich die aus den Pegeldata abgeleiteten Änderungen des Abflusses mit diesem einfachen Indexwert jedoch nur unzureichend abbilden, da hier offensichtlich kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen einer Änderung der Speicherfüllung im Winterhalbjahr und der Entwicklung der sommerlichen Verhältnisse erkennbar ist. Trotzdem kann von einem grundsätzlich schlüssigen und konsistenten Gesamtbild gesprochen werden, wie die beiden folgenden Abbildungen deutlich zeigen.

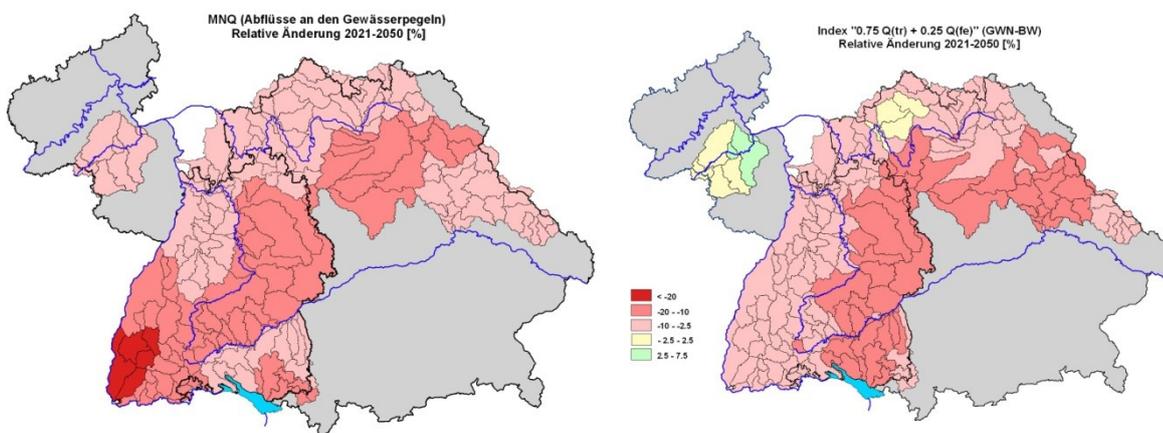


Abb. 4.2: Änderung der Niedrigwasserabflüsse MNQ gemäß KLIWA Heft 14 (links) im Vergleich zur Änderung eines jahreszeitlich gewichteten Index, abgeleitet aus der Bodenwasserhaushaltsmodellierung (rechts). Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in Prozent.

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Auswertungsumfang

5.1.1 Wasserbilanz- und Zustandsgrößen

Mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW wurde auf der Basis von Klimaparametern (Zeitreihen) und physiographischen Daten (flächhaften Standortfaktoren) der Bodenwasserhaushalt der drei Bundesländer in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung simuliert (vgl. Kap. 3).

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;
- **Gesamtabflusshöhe:** 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;
- **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 Bodenspeichers in Trockenperioden.



5.1.2 Darstellungsebenen

Die Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsmodellierung sowie der BFI (Baseflow-Index) und die Grundwasserneubildung liegen auf Basis von Grundflächen vor. Um der vergleichsweise groben räumlichen Differenzierung der regionalen Klimaszenarien gerecht zu werden, wurden die hoch aufgelösten Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsmodellierung räumlich aggregiert und die folgenden drei Darstellungsebenen eingeführt:

- 3 Bundesländer,
- 11 KLIWA-Regionen,
- 25 Naturräume (naturräumlich-hydrogeologische Einheiten).

Sämtliche Auswertungen wurden für alle drei Darstellungsebenen vorgenommen. Da auf Basis der großräumigen KLIWA-Regionen die hier maßgeblichen Einflussfaktoren Boden, Landnutzung, Hydrogeologie und Relief nicht ausreichend detailliert berücksichtigt werden können, wurden die naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten (Abb. 5.1) gegenüber anderen KLIWA-Veröffentlichungen als zusätzliche Ebene eingeführt. Im weiteren Verlauf der Erläuterungen werden exemplarische Ergebnisse für die Bundesländer und die Naturräume vorgestellt. Die vollständigen Auswertungen für alle Darstellungsebenen sind im digitalen Anhang zu finden.

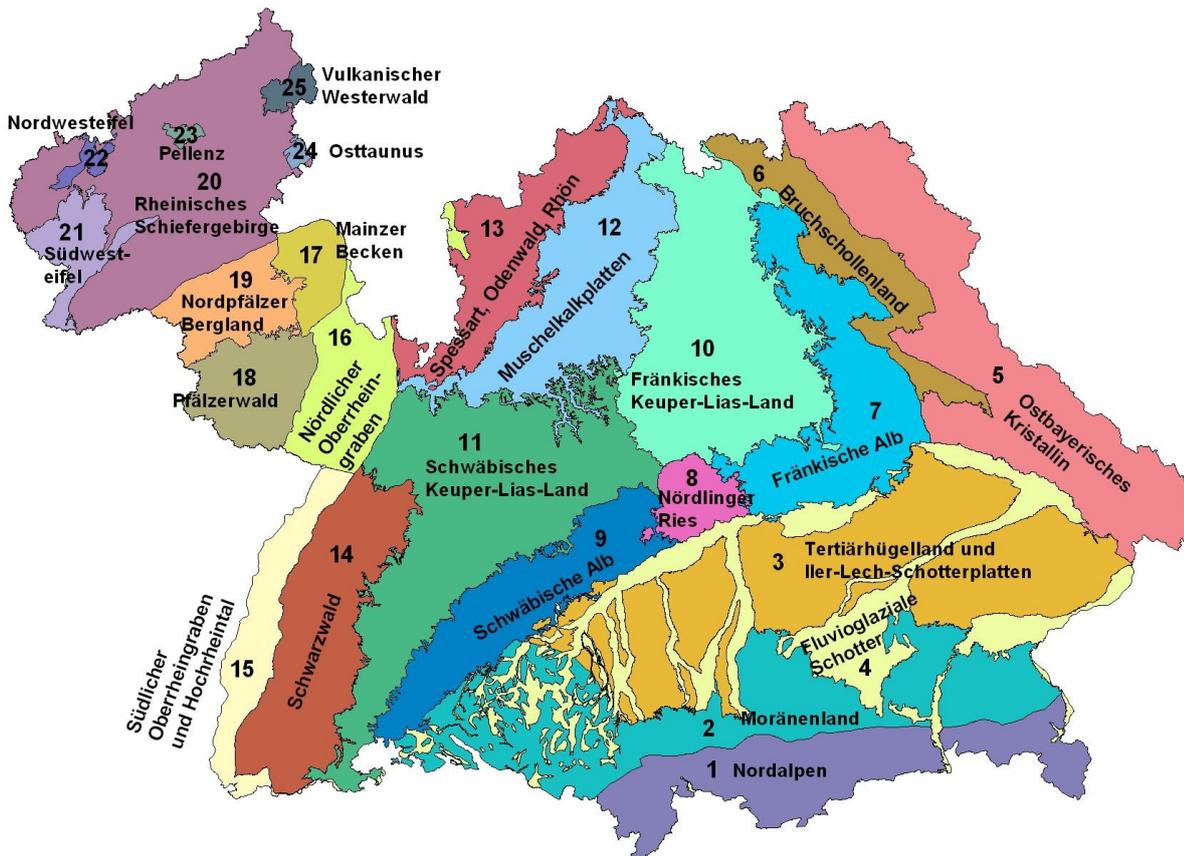


Abb. 5.1: Darstellungsebene naturräumlich-hydrogeologische Einheiten (n=25) für die räumliche Auswertung der Simulationsergebnisse.

5.1.3 Auswerteziträume und -methoden

Ziel der Auswertungen war der Vergleich mehrerer Dreißigjahreszeiträume in der Vergangenheit und der Zukunft. Im Einzelnen wurden folgende Zeitabschnitte untersucht:

1971-2000 (Ist-Zustand, gemessen + simuliert),
2021-2050 (Nahe Zukunft, simuliert),
2071-2100 (Ferne Zukunft, simuliert).

Für alle drei Zeiträume und Bundesländer wurden die Daten des regionalen statistischen Klimamodells WETTREG2006, angetrieben durch das Globalmodell ECHAM5 (Emissionsszenario A1B) als Modellinput für das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW verwendet. Da es sich hierbei um dieselbe Datenbasis wie bei zahlreichen anderen KLIWA-Untersuchungen handelt, können die Ergebnisse auch zu Vergleichszwecken herangezogen werden (z.B. Niedrigwasser, vgl. Kap. 4). Die Veränderungen vom Ist-Zustand (simuliert) zur nahen und fernen Zukunft wurden mit absoluten und prozentualen Werten dokumentiert. Die im Text beschriebenen und in den Grafiken dargestellten Änderungen beziehen sich jeweils auf die rechnerisch ermittelten Werte. Diese werden unabhängig von den tatsächlichen Unsicherheiten mit maximal einer Nachkommastelle angegeben.

Neben der „nahen Zukunft“ wurden auch Szenariosimulationen für den Zeitraum 2071-2100 („ferne Zukunft“) durchgeführt. Die hierzu verwendeten regionalen Klimaszenarien sollen mögliche Entwicklungstendenzen des Klimageschehens in 60 bis 90 Jahren widerspiegeln. Es muss jedoch betont werden, dass die Szenariosimulationen für die ferne Zukunft mit nochmals deutlich höheren Unsicherheiten als die der nahen Zukunft behaftet sind (KLIWA 2009). Diese Unsicherheiten sind beim Vergleich und der Interpretation der Ergebnisse unbedingt zu berücksichtigen.

Darüber hinaus wurden nochmals Simulationen auf der Basis des Vorgängermodells WETTREG2003 (Globalmodell ECHAM4, Emissionsszenario B2) durchgeführt. Erste exemplarische Ergebnisse für Baden-Württemberg und Bayern wurden bereits 2006 vorgestellt (NEUMANN & GUDERA 2007). Da die entsprechenden Ergebnisse seinerzeit jedoch nicht flächendeckend und außerdem mit Hilfe unterschiedlicher Wasserhaushaltsmodelle ermittelt wurden, sind sie methodisch nur schwer vergleichbar. Mit Aufstellung des gemeinsamen länderübergreifenden Modells für die WETTREG2006-Simulationen sollten die früheren Ergebnisse daher nochmals nachvollzogen werden. Da WETTREG2003 nur für Baden-Württemberg und Bayern vorliegt und auch nur für das Szenario „nahe Zukunft“, konnte die „ferne Zukunft“ (2071-2100) nicht ausgewertet werden. Rheinland-Pfalz blieb dementsprechend bei der WETTREG2003-Simulation ebenfalls unberücksichtigt. Alle vorliegenden Ergebnisse auf der Basis von WETTREG2003 sind im digitalen Anhang dokumentiert.

Als statistische Kenngrößen wurden die mittleren Jahreswerte sowie Halbjahres- und Monatsmittelwerte (soweit möglich) für jede Dreißigjahresperiode ausgewertet. Die Ergebnisse wurden als Karten und Ringdiagramme aufbereitet. Die Ringdiagramme dienen dabei vor allem der ergänzenden Visualisierung der innerjährlichen Verhältnisse und beziehen sich im weiteren Verlauf des Textes auf die absoluten Änderungen. Die entsprechenden Ringdiagramme der relativen Änderungen (%) sind im digitalen Anhang zu finden. Darüber hinaus wurden die Werteverteilungen der Auswertegrößen an Hand von ausgewählten Perzentilen in Form von Box-Plot-Diagrammen näher betrachtet. Aufbau und Inhalt der Ringdiagramme und Boxplots sind im digitalen Anhang sowie im zugehörigen Kapitel im Anhang (S.109) detailliert beschrieben. Die Auswertung kürzerer Zeitfenster (z.B. Dekaden, Einzeljahre oder Tageswerte) war nicht Ziel der Untersuchungen. Den Gesamtumfang der durchgeführten Auswertungen fasst Tabelle 5.1 zusammen.



Tab. 5.1: Auswertungsumfang der durchgeführten Simulationen zum Bodenwasserhaushalt und zur Grundwasserneubildung, jeweils bezogen auf die acht Wasserbilanz- und Zustandsgrößen (Parameter) und drei räumliche Darstellungsebenen.

Auswertungsumfang für die Parameter		1971-2000 Homogenisierte Reihen	WETTREG2006 ECHAM5/A1B			WETTREG2003 ECHAM4/B2	
			1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lufttemperatur ▪ Niederschlag ▪ Tatsächliche Verdunstung ▪ Gesamtabflusshöhe ▪ Sickerwasserrate ▪ Grundwasserneubildung ▪ Trockenheitsindex ▪ Wasseräquivalent der Schneedecke <p>Jeweils bezogen auf</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bundesländer ▪ KLIWA-Regionen ▪ Naturräume 							
Ringdiagramme ¹ (Aussagen für mittlere Monatswerte, Halbjahre, Jahre)	Absolute Werte	X	X	X	X	X	X
	Rel. Änderungen			X	X		X
	Abs. Änderungen			X	X		X
Box-Plots ² (Aussagen für mittlere Jahres- und Halbjahreswerte ¹)	Perzentile	X	X	X	X	X	X
Karten aller drei Länder (Gesamt-raum) (Aussagen für 30jährige Mittelwerte)	Absolute Werte	X					
	Rel. Änderungen			X	X		X
	Abs. Änderungen			X	X		X
¹ Methodisch bedingt keine zeitlich aufgelösten Auswertungen für den Parameter Grundwasserneubildung ² Keine Auswertungen für den Parameter Wasseräquivalent der Schneedecke							

5.2 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist für den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung eine wesentliche Größe, da sie über das Sättigungsdefizit der Luft unmittelbar verdunstungsrelevant ist. Sie beeinflusst damit auch den Anteil des Niederschlags, der regional für Abfluss, Sickerwasser- und Grundwasserneubildung überhaupt zur Verfügung steht. Darüber hinaus steuert sie den Aggregatzustand des gefallen Niederschlags (flüssig/fest) sowie die Befüllung (Schneeakkumulation) und das Entleeren des modellinternen Schneespeichers. Temperaturbedingte Änderungen dieser Prozesse und Zustände wirken sich damit in der Summe sowohl räumlich als auch zeitlich direkt auf den gesamten Bodenwasserhaushalt aus, so dass die Temperatur hier als eigenständige Auswertegröße mit aufgenommen wurde.

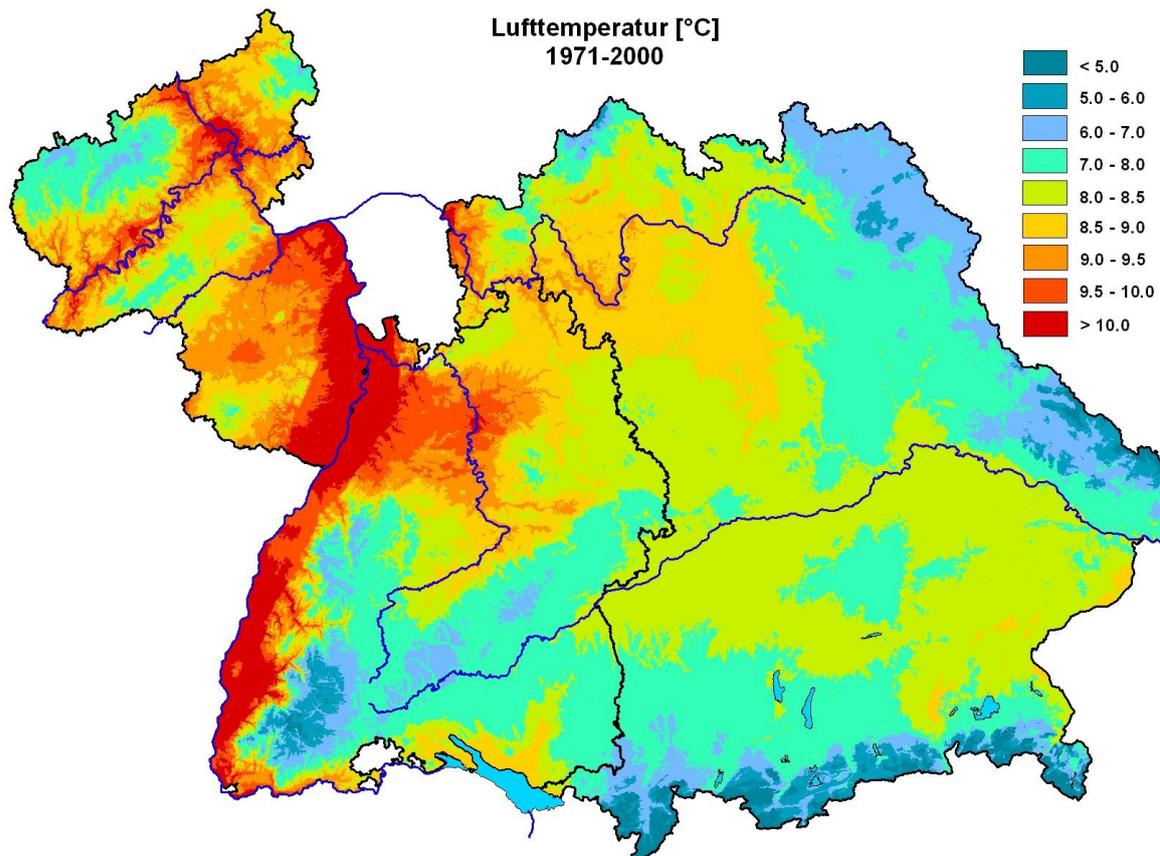


Abb. 5.2: Mittlere jährliche Lufttemperatur. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in °C.

Die mittlere Jahrestemperatur lag in der Vergangenheit zwischen ca. 6-7°C am Alpenrand und in den östlichen Mittelgebirgen und mehr als 10°C längs des Rheins (Abb. 5.2 und 5.3). Im Jahresverlauf werden in allen Naturräumen die Extremwerte im Januar (Minimum) und Juli/August (Maximum) erreicht (Abb. 5.4).

Für die nahe Zukunft (Abb. 5.5) werden mit WETTREG2006 relativ einheitliche Temperaturzunahmen von knapp 1°C bezogen auf den dreißigjährigen Mittelwert prognostiziert. Die größten Abweichungen mit Werten von ca. 1.5°C zeigen die Monate Dezember bis Februar. Bis auf den September (ca. 1°C) weisen alle anderen Monate nur geringe Temperaturzunahmen (< 1°C) auf. Auffällig ist, dass sich ein derartiges Bild unabhängig von der räumlichen Untergliederung in allen Teilen des Untersuchungsgebietes zeigt. Auf Grund dieser sehr geringen räumlichen Differenzierung wird hier auf die Darstellung von Karten zur Veränderung verzichtet.



Lufttemperatur im hydrologischen Jahr – 1971-2000

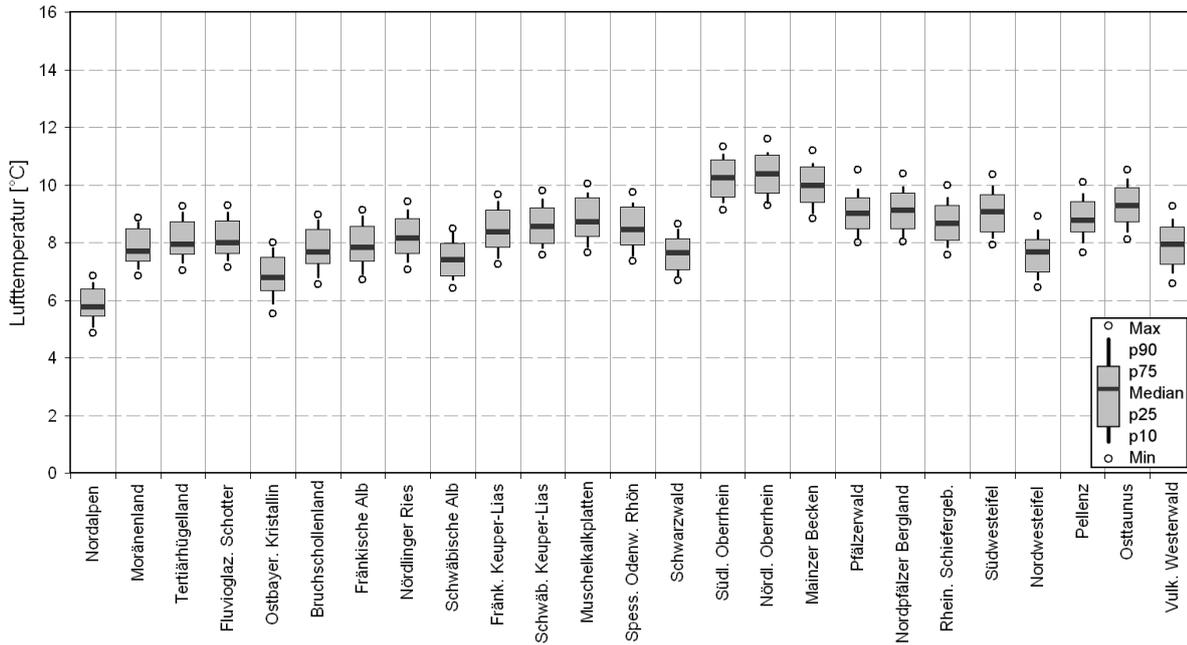


Abb. 5.3: Box-Plot-Diagramm der mittleren Lufttemperatur in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in °C.

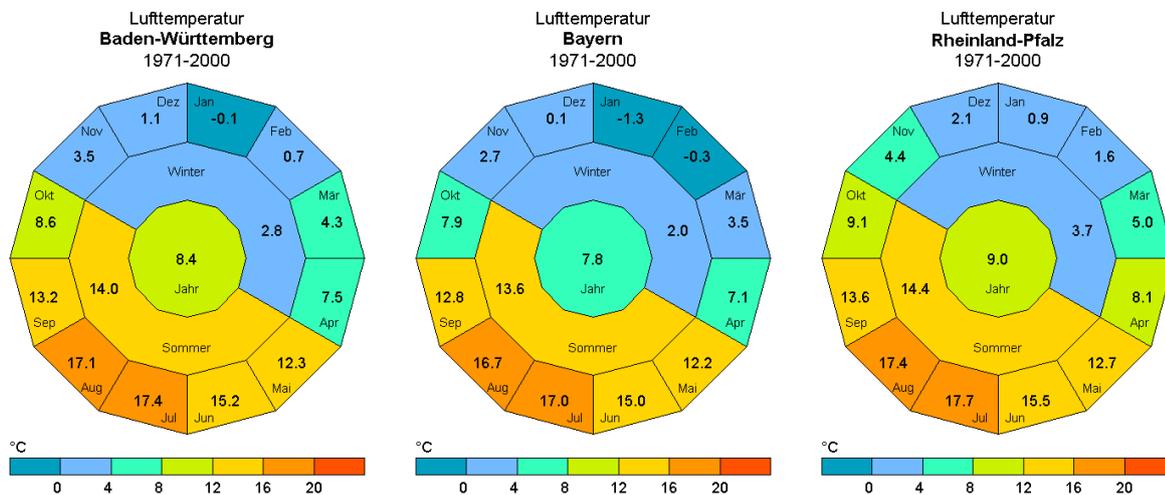


Abb. 5.4: Mittlere innerjährliche Variabilität der Lufttemperatur in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in °C.

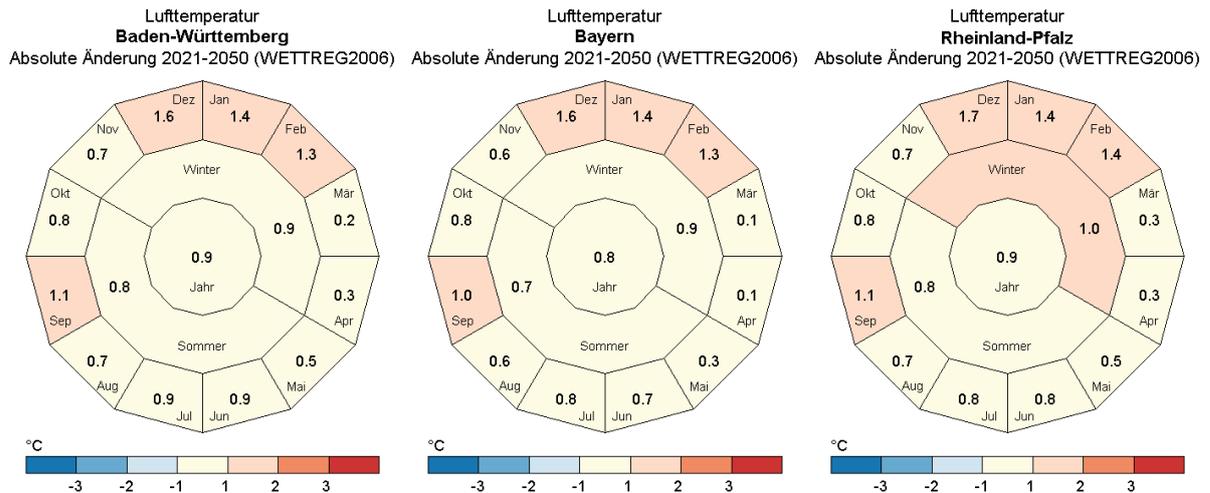


Abb. 5.5: Mittlere innerjährliche Änderung der Lufttemperatur in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in °C.

5.3 Niederschlag

Der Niederschlag steht in der Wasserbilanz auf der Einnahmeseite (positive Bilanzgröße) und bildet für die Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Abfluss und Grundwasserneubildung die wichtigste Steuergröße. Er beschreibt letztlich das Wasserdargebot, das maximal für alle übrigen Prozesse zur Verfügung steht. Änderungen der Niederschlagshöhe, des Niederschlagsregimes aber auch der Niederschlagsart (flüssig/fest), 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 den höhenabhängig regionalisierten, hier nicht um mögliche systematische Verluste bei der Messung korrigierten Stationsdaten.

5.3.1 Periode 1971-2000

Die mittleren jährlichen Niederschläge in den untersuchten Naturräumen lagen in der Vergangenheit zwischen ca. 500 mm/a im Mainzer Becken und rund 1 400 - 1 700 mm/a im Schwarzwald und im Bereich der Alpen (Abb. 5.6 und 5.7). Die übrigen Mittelgebirgslagen und das Voralpenland zeichnen sich durch mittlere Jahresniederschläge von etwa 800 mm/a bis max. 1 200 mm/a aus. Zahlreiche weitere Naturräume in allen drei Bundesländern sind außerdem durch vergleichsweise niedrige Niederschlagswerte von etwa 700 mm/a gekennzeichnet. Das Niederschlagsmittel der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern liegt in einer ähnlichen Größenordnung (930 - 960 mm/a), während Rheinland-Pfalz mit rd. 780 mm/a gut 20 % darunter liegt. Betrachtet man das Niederschlagsregime, so zeigt sich, dass auf Länderebene (Abb. 5.8) und in den meisten Naturräumen die Sommerniederschläge über denen des Winterhalbjahrs liegen. Lediglich in Teilbereichen der westlichen Mittelgebirge Eifel, Westerwald, Hunsrück, Spessart, Rhön und Schwarzwald fällt im Winter mehr Niederschlag als im Sommer (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang).

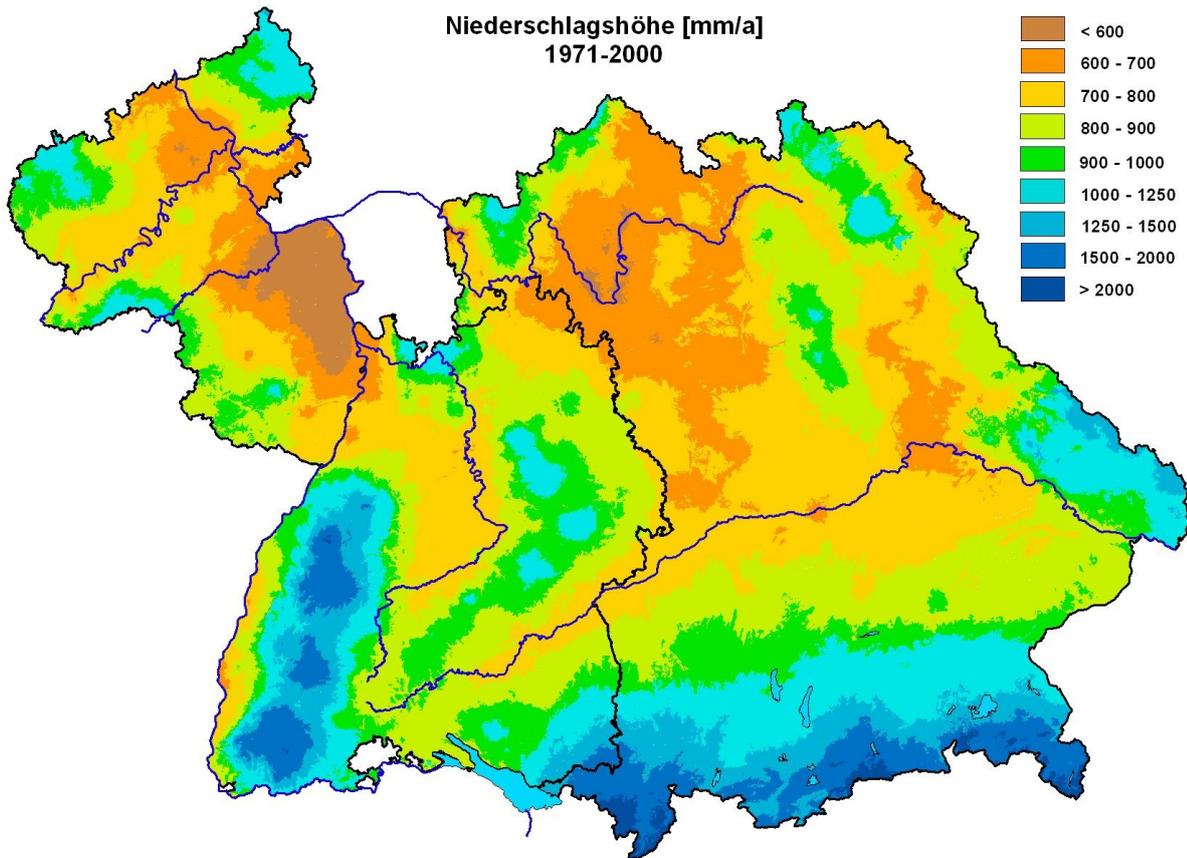


Abb. 5.6: Mittlerer jährlicher Niederschlag. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

Niederschlagshöhe im hydrologischen Jahr – 1971-2000

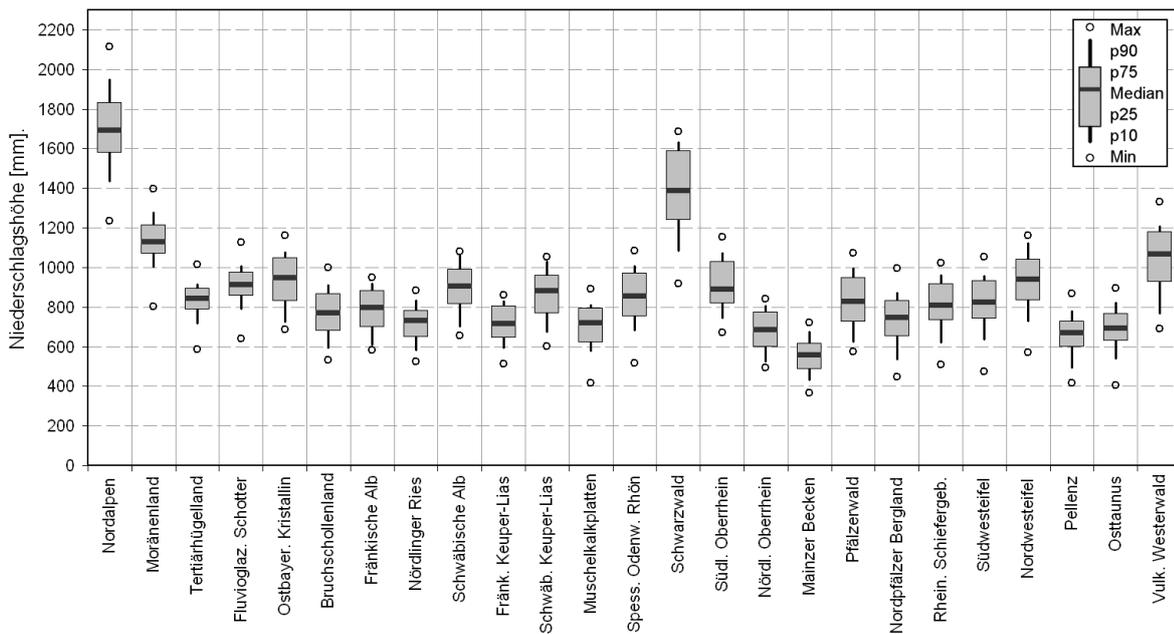


Abb. 5.7: Box-Plot-Diagramm des mittleren Niederschlags in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

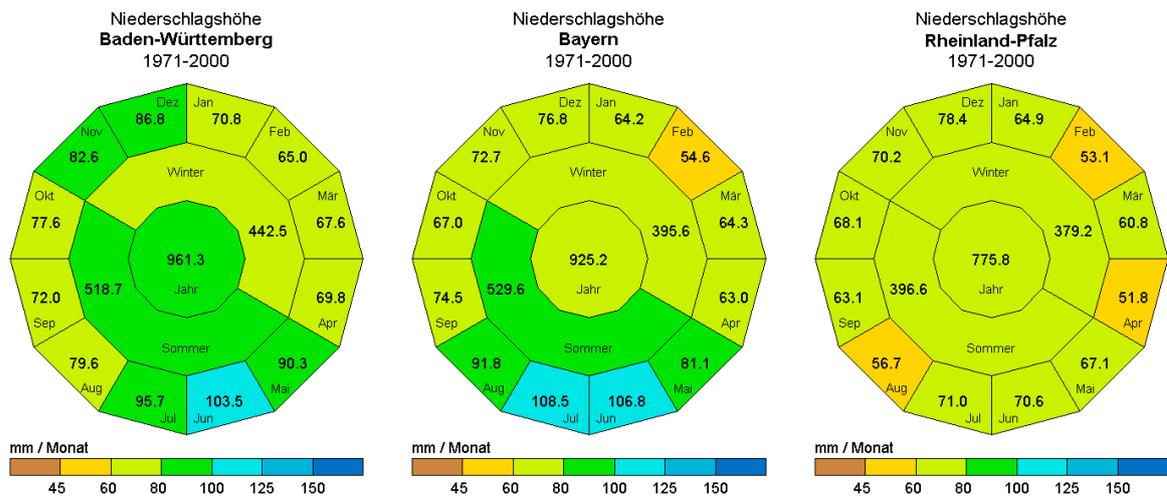


Abb. 5.8: Mittlere innerjährliche Variabilität des Niederschlags in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.3.2 Periode 2021-2050

Die Szenarien zeigen für die nahe Zukunft nur geringe Änderungen des mittleren Jahresniederschlags in einer Größenordnung von maximal 50 mm/a (Abb. 5.9). Dies entspricht je nach Naturraum maximal 5 % Zunahme, z.B. in der Eifel oder knapp 3 % Abnahme in den Alpen (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang). Die Unterschiede fallen deutlicher aus, wenn man die hydrologischen Halbjahre heranzieht. Die Abb. 5.10 zeigt für alle drei Länder eine Zunahme der Niederschlagshöhe im Winter (zwischen 15 mm und 35 mm) und eine Abnahme im Sommer (zwischen 15 mm und 35 mm), d. h. eine innerjährliche Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr. Bezogen auf einzelne Monate kann dieses Klimaänderungssignal allerdings nochmals sehr viel deutlicher ausfallen. Dies betrifft einzelne Wintermonate mit starken Zunahmen, die in den westlichen Teilen des Untersuchungsraumes z.T. mehr als 20 % betragen können. Demgegenüber sind in den meisten Naturräumen Abnahmen in den Sommer- und Herbstmonaten zu verzeichnen. Da die Entstehung von Sickerwasser und die damit einhergehende Grundwasserneubildung vorwiegend im verdunstungsarmen Winterhalbjahr stattfinden, hat diese Änderung des Niederschlagsregimes weitreichende Auswirkungen auf alle folgenden Bilanzgrößen. In Kombination mit der beschriebenen Temperaturzunahme ergeben sich auch deutliche Auswirkungen auf das Verdunstungsgeschehen (vgl. Kap. 5.4).

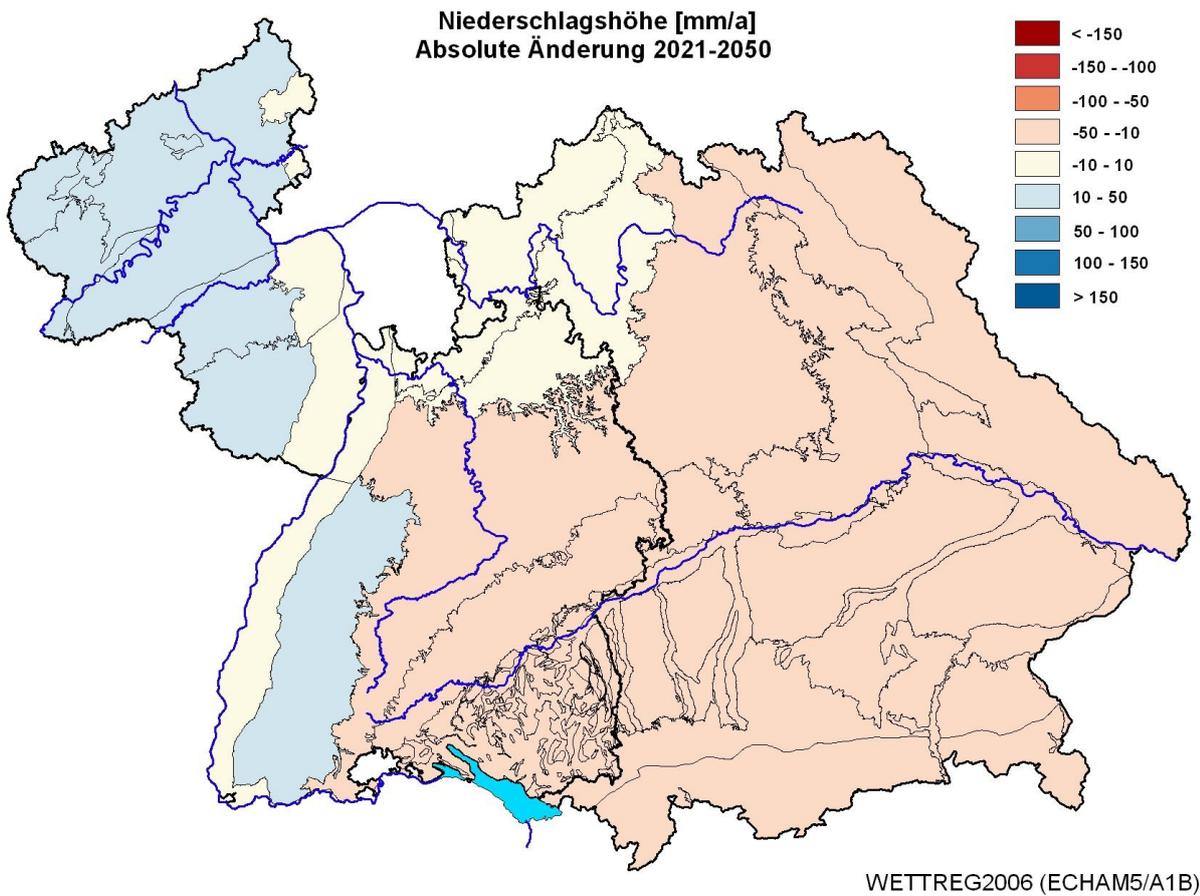


Abb. 5.9: Mittlere Änderung der Niederschlagshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

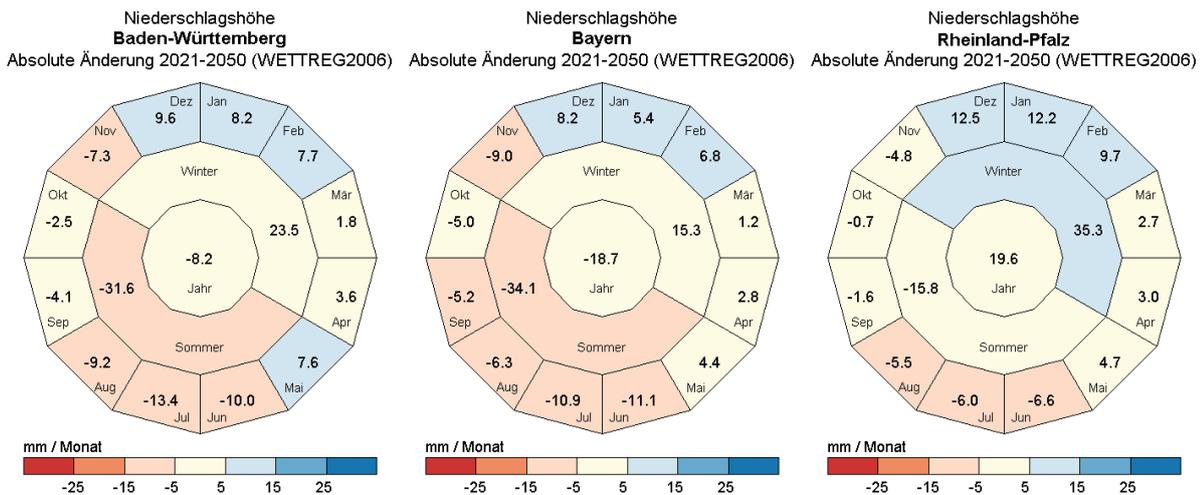


Abb. 5.10: Mittlere innerjährliche Änderung des Niederschlags in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.4 Tatsächliche Verdunstung

Die tatsächliche oder aktuelle Verdunstung ist die zentrale Ergebnisgröße der Bodenwasserhaushaltsmodellierung. Sie ist vor allem von Temperatur, Niederschlagsangebot, Bodeneigenschaften und Landnutzung abhängig und von entscheidender Bedeutung für die Höhe und jahreszeitlichen Verteilung der verschiedenen Abflusskomponenten. Änderungen des Niederschlags, der Temperatur und weiterer Einflussfaktoren (z.B. Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit) sind somit in unterschiedlichem Maße immer auch verdunstungsrelevant. Die Verdunstung wird zudem stark von Standortfaktoren wie Boden, Landnutzung und Relief beeinflusst. 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. Die vorliegenden Auswertungen beziehen sich auf eine Variante von GWN-BW, mit der eine witterungsabhängige Beschreibung phänologischer Eintrittstermine möglich ist („dynamisierte Vegetation“). Dabei werden die Zeitpunkte, zu denen die Vegetation einen bestimmten Entwicklungsstand erreicht standort- und witterungsabhängig über Temperatursummen berechnet.

5.4.1 Periode 1971-2000

Im Vergleich zu den anderen Wasserhaushaltsgrößen zeigt die Verdunstung eine vergleichsweise geringe Bandbreite (Abb. 5.11). Die drei Bundesländer liegen im Mittel bei etwa 500 mm/a wobei die Unterschiede zwischen dem niederschlagsreicheren Baden-Württemberg und dem relativ trockenen Rheinland-Pfalz bei der Verdunstung nur etwa 10 % betragen. Die meisten Naturräume bewegen sich im Jahresmittel etwa zwischen 450 und 550 mm/a (Abb. 5.12). Eine Sonderstellung nimmt der Südwesten Baden-Württembergs mit Werten von etwa 600 mm/a ein. Die Verdunstung ist vor allem temperaturbedingt in den Sommermonaten sehr viel höher als im Winterhalbjahr und kann in einzelnen Naturräumen (z.B. Moränenland) maximale Werte von bis zu 100 mm/Monat erreichen. In den Wintermonaten beträgt die Verdunstung in vielen Fällen lediglich 10-15 mm/Monat (Abb. 5.13).

Die Verdunstung kann regional einen sehr unterschiedlichen Anteil an der Niederschlagshöhe ausmachen. In Baden-Württemberg und Bayern verdunsten im vieljährigen Mittel etwa 55 % des Niederschlags wieder, so dass damit etwa 45 % abflussrelevant werden. In Rheinland-Pfalz liegt der Anteil des verdunstenden Wassers am Niederschlag bei etwa 63 %, womit nur noch 37 % für die oberirdischen und unterirdischen Abflusskomponenten verbleiben. Noch deutlicher wird dieses Bild, wenn man die verschiedenen Naturräume betrachtet. Während im niederschlagsarmen Mainzer Becken mehr als 80 % des Niederschlags wieder verdunstet, beträgt dieser Anteil im Schwarzwald nur etwa 45 % und in den Alpen sogar nur gut 30 %. Dies zeigt deutlich, in welcher Weise auf regionaler Ebene die Verdunstung innerhalb der Gesamtwasserbilanz Einfluss auf die übrigen Bilanzgrößen Gesamtabfluss, Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung nimmt.

Detaillierte Vergleiche der verschiedenen Verdunstungsansätze haben gezeigt, dass sich auf Grundlage der dynamisierten Vegetationsentwicklung nur marginale Änderungen der mittleren monatlichen und jährlichen Verdunstungsraten für den Ist-Zustand ergeben (MORHARD 2011). Eine kurze Erläuterung dieser Ergebnisse befindet sich im Anhang.

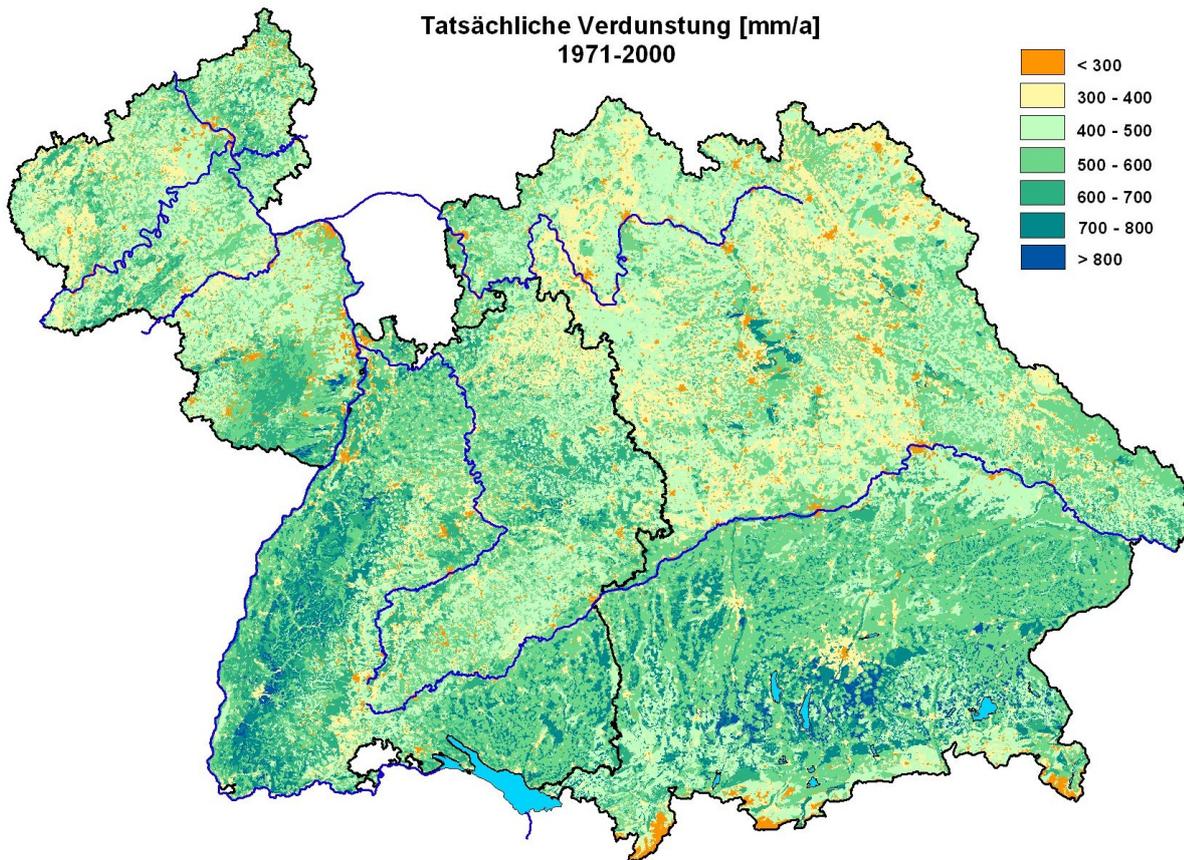


Abb. 5.11: Mittlere jährliche tatsächliche Verdunstung. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

Tatsächliche Verdunstung im hydrologischen Jahr – 1971-2000

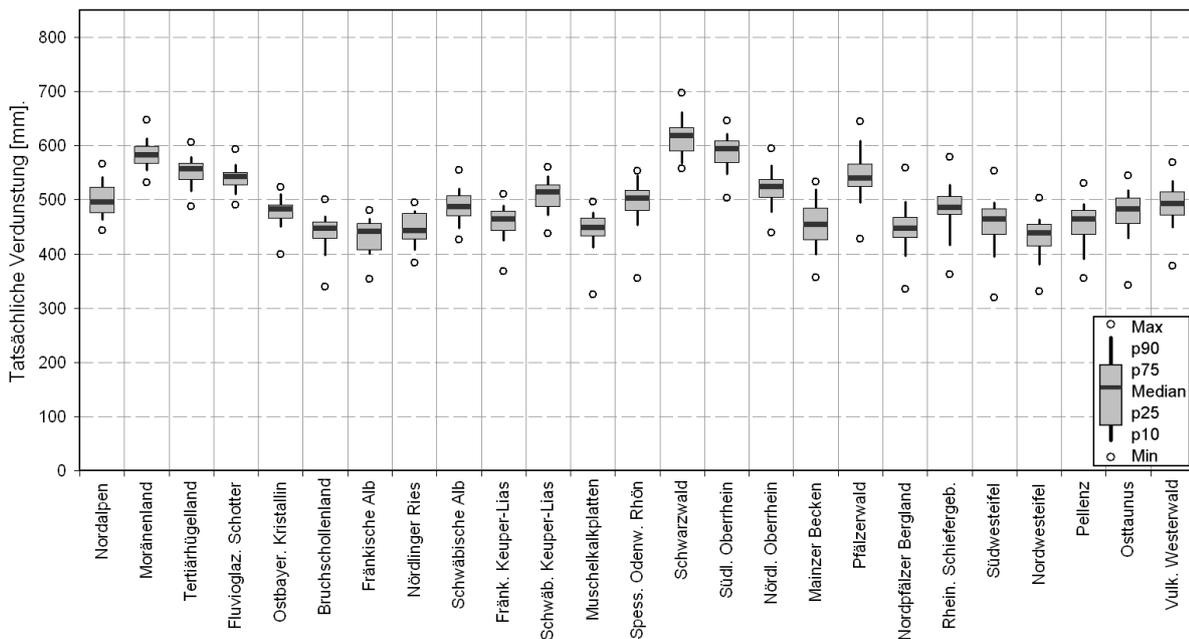


Abb. 5.12: Box-Plot-Diagramm der mittleren tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

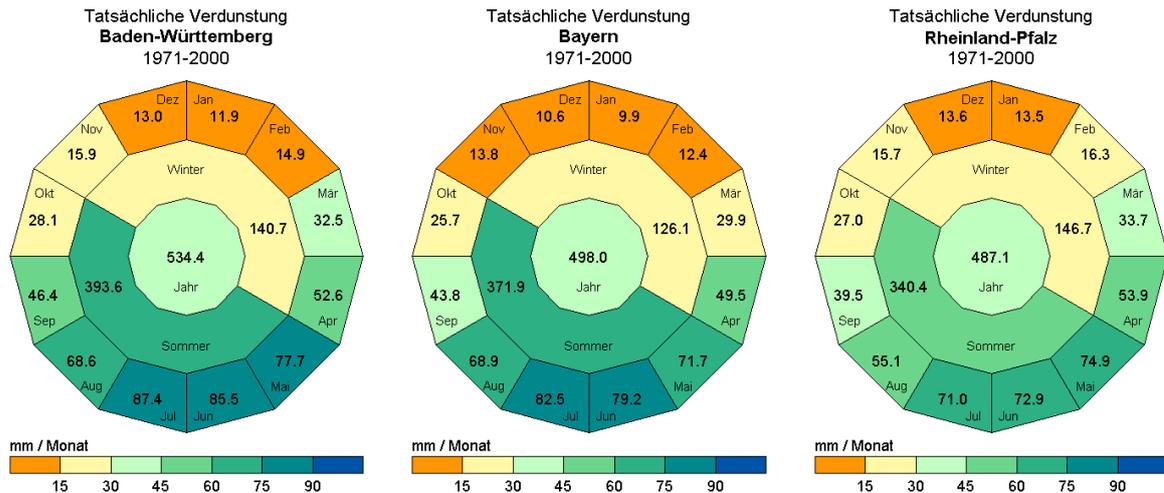


Abb. 5.13: Mittlere innerjährliche Variabilität der tatsächlichen Verdunstung in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.4.2 Periode 2021-2050

Die Verdunstung wird primär durch die Temperatur, die dadurch gesteuerte Vegetationsentwicklung sowie das regional verfügbare Wasserdargebot beeinflusst. Da die Temperaturentwicklung in allen Bereichen des KLIWA-Gebietes einen ähnlichen Verlauf nimmt, ist in der Regel das für die Verdunstung zur Verfügung stehende Wasser die entscheidende Größe für mögliche räumliche Unterschiede. Betrachtet man die Periode 2021-2050 so zeigen sich im Kartenbild (Abb. 5.14) für weite Teile Süddeutschlands keine nennenswerten Änderungen der Verdunstung gegenüber dem Ist-Zustand („Gegenwart“). Dies betrifft insbesondere die Regionen mit geringen bis mittleren Niederschlägen, z. B. in Nordbayern und in weiten Teilen Baden-Württembergs. Spürbare Änderungen zu Gunsten der Verdunstung ergeben sich hingegen für Eifel und Westerwald, in denen zugleich auch die deutlichsten Niederschlags-signale (Zunahmen) simuliert werden. Dieses zusätzliche Wasser steht damit zumindest teilweise auch einer temperaturbedingt erhöhten Evapotranspiration zur Verfügung. Weiterhin fällt der Rheingraben auf, sowie die Bereiche der quartären Flusstalfüllungen (Rhein, Donau und südliche Zuflüsse), wo oft ergiebige Bodenspeicher erhöhte Verdunstungsraten begünstigen. Zuletzt sei noch auf Schwarzwald, Alpenvorland und Alpen hingewiesen. In diesen Regionen stellt unabhängig von der Niederschlagsentwicklung die Verfügbarkeit von Wasser keinen limitierenden Faktor für die Verdunstung dar, so dass hier ausschließlich die Temperaturzunahme als steuernde Größe wirksam wird.

Im Jahresverlauf fallen auf Ebene der Bundesländer vor allem temperaturbedingte Zunahmen der Verdunstung in den Monaten Dezember bis Mai auf (Abb. 5.15). Demgegenüber zeigen die Sommermonate Juli und August einheitlich abnehmende Verdunstungsraten, die vermutlich eine Folge des Niederschlagsdefizits zu dieser Zeit sind. Betrachtet man einzelne Naturräume und ihren jährlichen Verlauf, so zeigt sich in allen Bereichen ein tendenziell sehr ähnliches Bild. Relevante Abweichungen vom Mittel resultieren dabei vor allem aus dem regional unterschiedlichen Wasserdargebot in Abhängigkeit von den Eigenschaften des örtlichen Bodenspeichers.

Die Verdunstung wirkt im Hinblick auf die Veränderungen bei der Abflussbildung ausgleichend, zumindest auf Ebene der Länder. Die innerjährliche Umverteilung des Niederschlagsdargebots wird durch die entsprechende Veränderung der Verdunstung teilweise kompensiert. So steigt im Winterhalbjahr die Verdunstung an, während diese im Sommer-



halbjahr leicht abnimmt. Auf naturräumlicher Ebene bilden in dieser Hinsicht die Nordalpen und das Moränenland im Südosten des KLIWA-Gebietes eine Ausnahme. Hier ergibt sich trotz abnehmenden Niederschlagsdargebots im Sommer eine Zunahme der Verdunstung (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang).

Auf der Grundlage einer dynamisierten Vegetationsentwicklung ergeben sich somit für die nahe Zukunft nur geringfügige Änderungen der simulierten Verdunstungsraten.

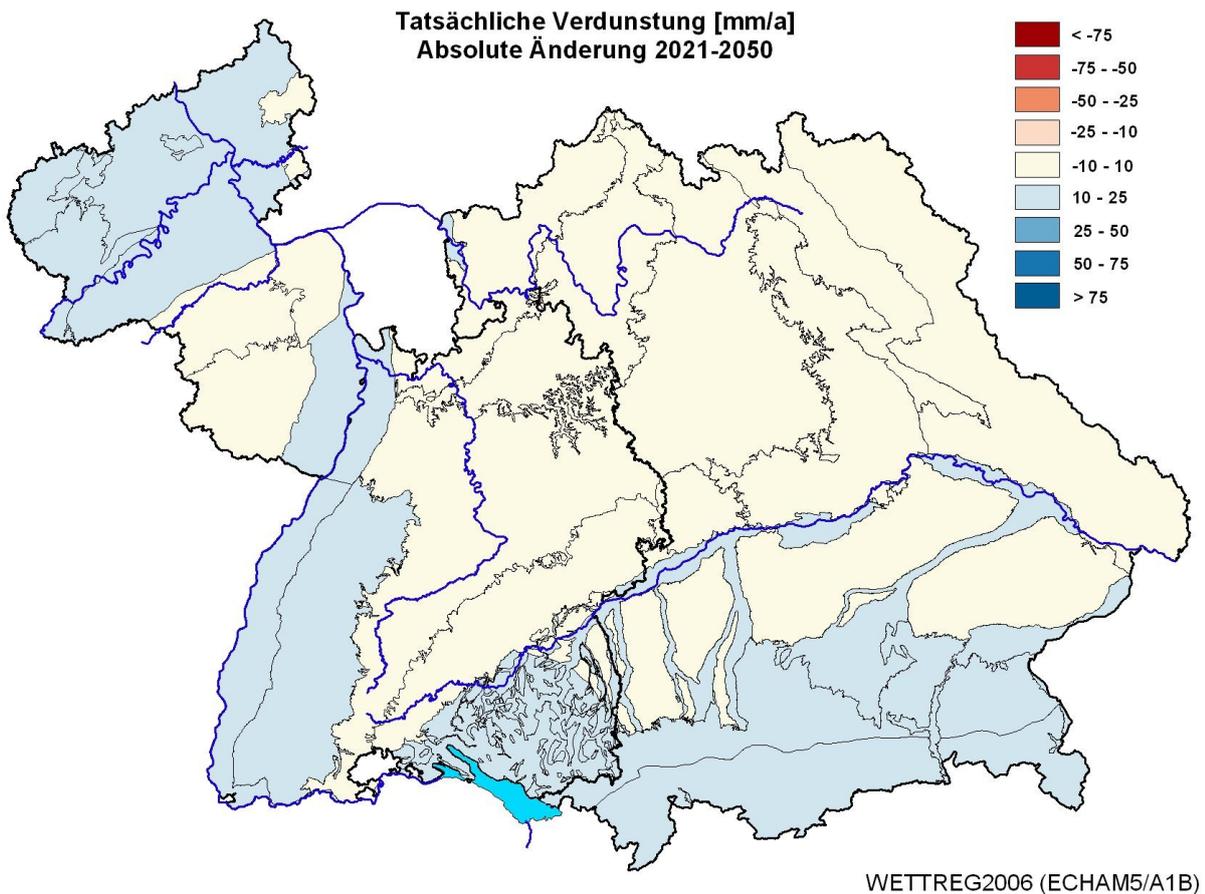


Abb. 5.14: Mittlere Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

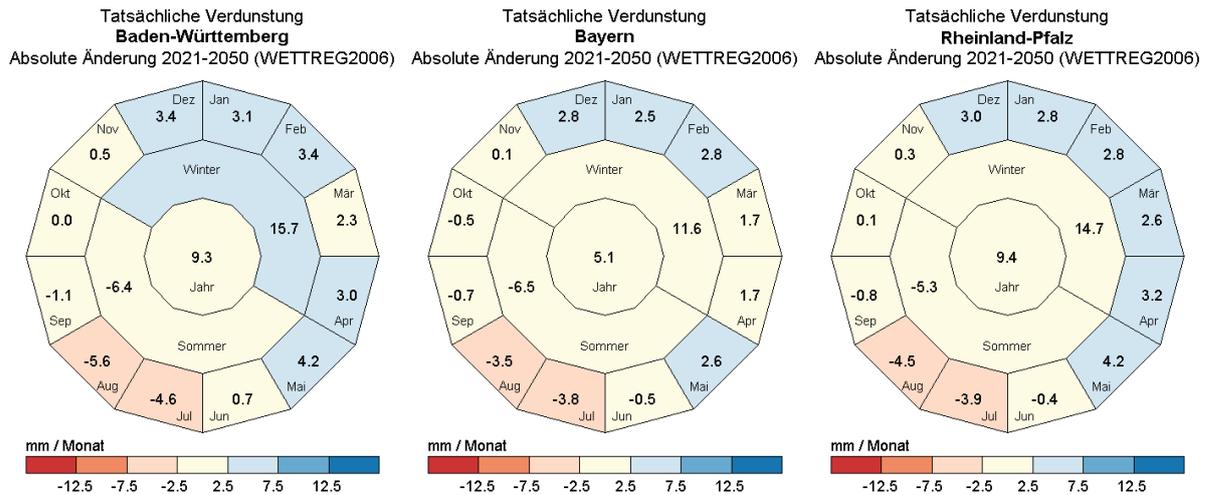


Abb. 5.15: Mittlere innerjährliche Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.5 Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate

Die Gesamtabflusshöhe ist als Wasserbilanzgröße gleichbedeutend mit der Differenz aus Niederschlag und tatsächlicher Verdunstung. 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 damit die Summe der Abflusskomponenten Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss (Interflow) sowie Basisabfluss (Grundwasserabfluss) dar (vgl. Abb. 2.3). Beeinflusst wird der Gesamtabfluss von allen Faktoren, die bereits im Zusammenhang mit Niederschlag und Verdunstung erwähnt wurden. Auf ebenen, gut durchlässigen Standorten (ohne Oberflächenabfluss) beschreibt der Gesamtabfluss die maximal für die Grundwasserneubildung zur Verfügung stehende Wassermenge und kann näherungsweise dieser gleichgestellt werden.

Die Sickerwassermenge entspricht dem Wasservolumen, das den Bodenspeicher des Modells der Schwerkraft folgend in Richtung Grundwasser verlässt. Sickerwassermenge und Gesamtabfluss unterscheiden sich (im Mittel) 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 Gesamtfläche ausgewiesen. Die Unterschiede sind damit großräumig so gering, dass beide Größen bezogen auf langjährige Verhältnisse und die hier zu Grunde gelegten Raumeinheiten nahezu gleichbedeutend sind.

5.5.1 Periode 1971-2000

Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate zeichnen sich durch ein sehr breites Wertespektrum aus. Während sich die beiden Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern mit flächengemittelten Werten von knapp 430 mm/a in derselben Größenordnung bewegen, liegt Rheinland-Pfalz auf Grund der vergleichsweise geringen Niederschläge um mehr als 30 % niedriger (Abb. 5.16). Betrachtet man gezielt einzelne Naturräume, so fallen noch sehr viel größere regionale Abweichungen auf.



Treten im Bereich der Nordalpen mit mehr als 1200 mm/a niederschlagsbedingt mit Abstand die höchsten Werte auf, so werden im Mainzer Becken beispielsweise nur Gesamtabflusshöhen bzw. Sickerwasserraten von etwa 100 mm/a simuliert. In der Mehrzahl der Naturräume in Süddeutschland liegt der Gesamtabfluss bzw. die Sickerwasserrate etwa zwischen 250 und 400 mm/a (Abb. 5.17).

Bezogen auf den innerjährlichen Verlauf ergeben sich in der Regel deutliche Unterschiede zwischen den Sommermonaten mit tendenziell niedrigen Werten und den abflussstarken Wintermonaten (Abb. 5.18). Dies ist vor allem auf die ausgeprägte jahreszeitliche Differenzierung der Verdunstung zurückzuführen, die wiederum stark durch die Temperatur beeinflusst wird. Demgegenüber stellt sich der regionale Einfluss des Niederschlagsjahresgangs auf die Gesamtabflusshöhe sehr viel uneinheitlicher dar. Für den jahreszeitlichen Verlauf in einzelnen Naturräumen ergeben sich daher zum Teil sehr deutliche Unterschiede. Während zahlreiche Naturräume in den trockeneren Regionen in Rheinland-Pfalz, aber z. B. auch im Bereich von Unterfranken, über mehrere Monate sogar im Bereich negativer Wasserbilanzen (Verdunstung > Niederschlag) und Gesamtabflusshöhen um 0 mm/a liegen können, ergeben sich für die meisten anderen Naturräume im Sommerhalbjahr zumindest noch mittlere monatliche Werte von ca. 10-30 mm (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang). Da sich diese Zahlen auf langjährige Mittelwerte beziehen, können einzelne Extremjahre naturgemäß noch sehr viel gravierender ausfallen. Im Hinblick auf die Grundwasserneubildung ist dies von großer Bedeutung, da für die Grundwasserneubildung als Bilanzrest letztlich immer nur ein begrenzter Anteil der regionalen Gesamtabflusshöhe (bzw. Sickerwasserrate) relevant sein kann. Gerade in den beispielhaft aufgeführten Gebieten mit einem sehr hohen Gesamtabfluss bzw. sehr hohen Sickerwasserraten wird ein erheblicher Anteil dieser beiden Bilanzgrößen in schnelle Abflusskomponenten transformiert, was somit die Grundwasserneubildung entsprechend reduziert.

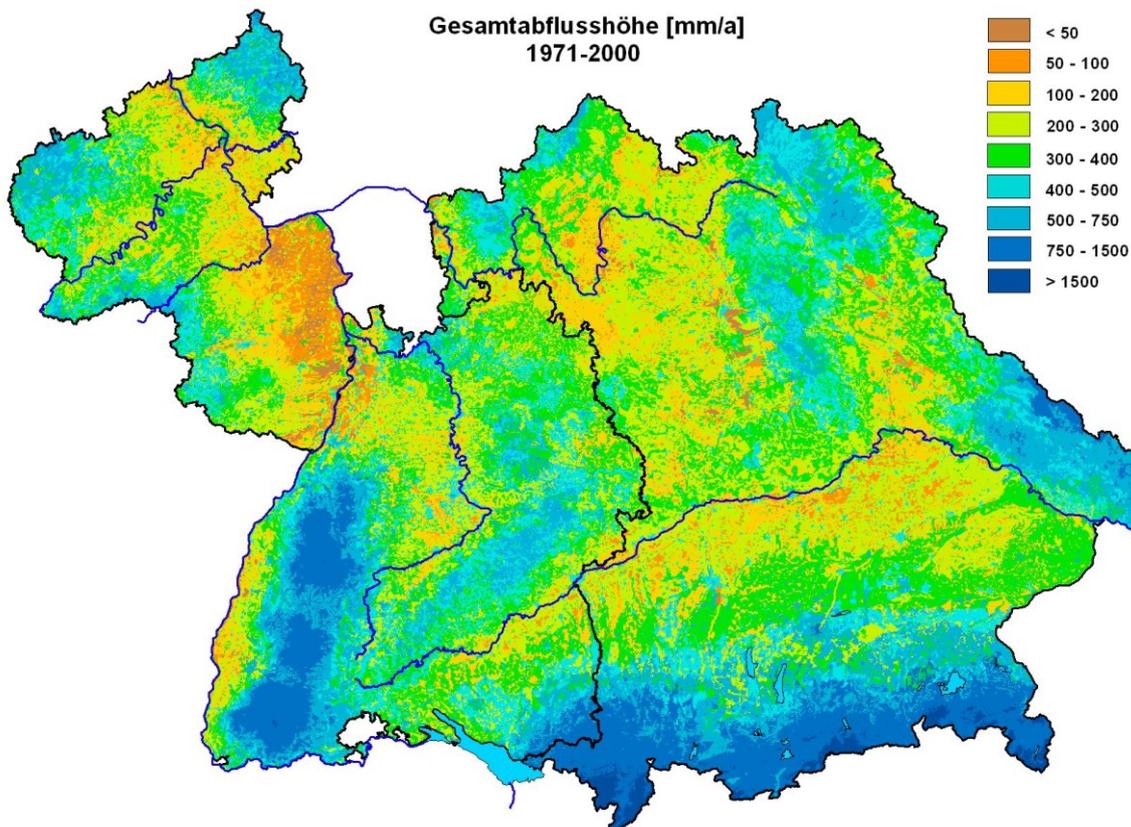


Abb. 5.16: Mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

Gesamtabflusshöhe im hydrologischen Jahr – 1971-2000

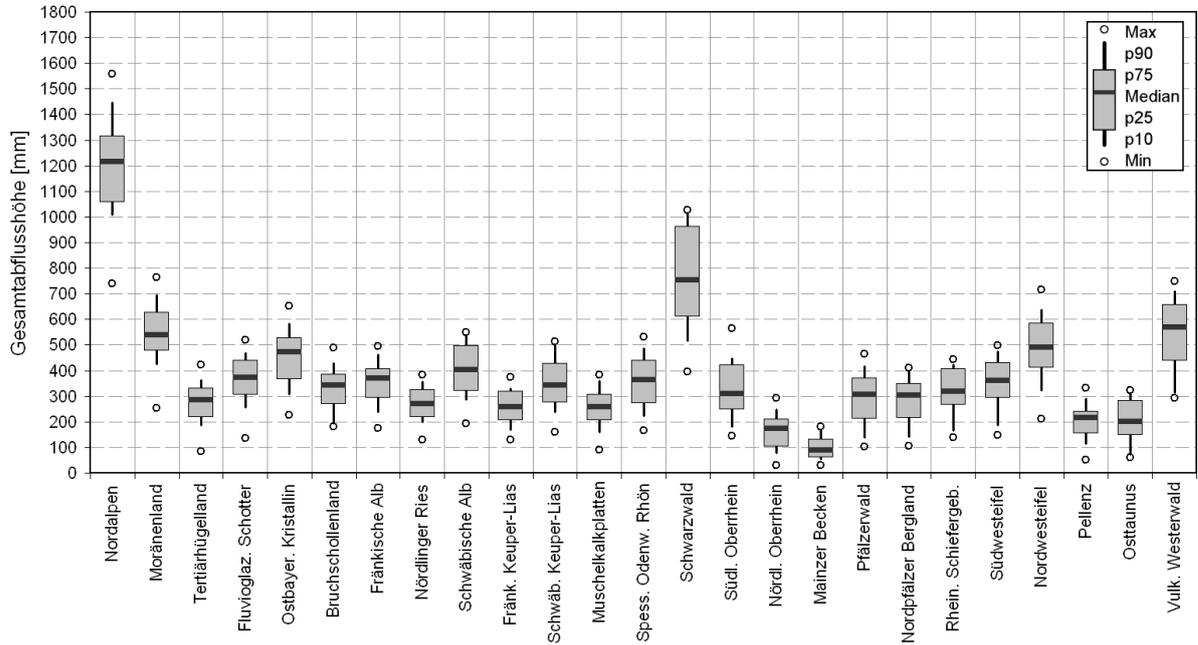


Abb. 5.17: Box-Plot-Diagramm der mittleren Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

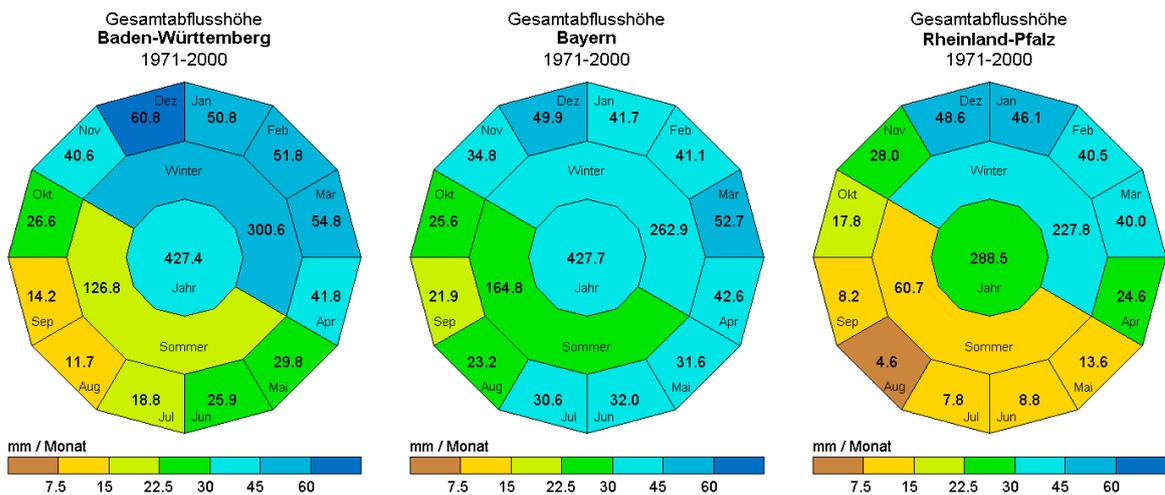


Abb. 5.18: Mittlere innerjährliche Variabilität der Gesamtabflusshöhe in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.



5.5.2 Periode 2021-2050

Bei der Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate ergeben sich im Jahresmittel für Baden-Württemberg und Bayern Abnahmen von etwa 20 mm/a, während für Rheinland-Pfalz leichte Zunahmen (ca. 10 mm/a) zu verzeichnen sind (Abb. 5.19). Die entsprechenden prozentualen Änderungen betragen maximal 4-5 % im Jahresmittel. Auf Ebene der Naturräume werden die höchsten absoluten Abweichungen von fast 70 mm/a (entspricht rd. 6 %) im Bereich der Nordalpen erwartet. Demgegenüber stehen Zunahmen in Eifel und Hunsrück von rd. 25 mm/a, was prozentual etwa 5-8 % entspricht. Alle übrigen Naturräume bewegen sich innerhalb dieser Bandbreite und fallen damit im Mittel nicht sonderlich auf.

Betrachtet man die Änderungssignale im Jahresverlauf, so zeigen sich sehr viel deutlichere Auswirkungen. Während im Sommerhalbjahr eine Tendenz hin zu spürbar geringeren Werten festgestellt werden kann, treten im Winterhalbjahr vor allem in Folge der erhöhten Niederschläge auch geringfügig höhere Gesamtabflüsse und Sickerwasserraten auf (Abb. 5.20). Bezogen auf einzelne Naturräume bedeutet dies in der Regel Zunahmen im einstelligen Prozentbereich (Winter) gegenüber Abnahmen in einer Größenordnung von 10-20 % und zum Teil sogar noch darüber (Sommer). In nahezu allen Naturräumen fallen insbesondere die Monate Juli und August mit den größten Abnahmen auf. Auch wenn es sich dabei um prozentuale Änderungen von oftmals 30 % und mehr handelt, so ist dies doch gleichbedeutend mit absoluten Änderungen von durchschnittlich maximal 5 mm. Insgesamt ist damit auch für Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate die innerjährliche Umverteilung der Niederschläge gegenüber den Veränderungen der Verdunstung der dominierende Faktor.

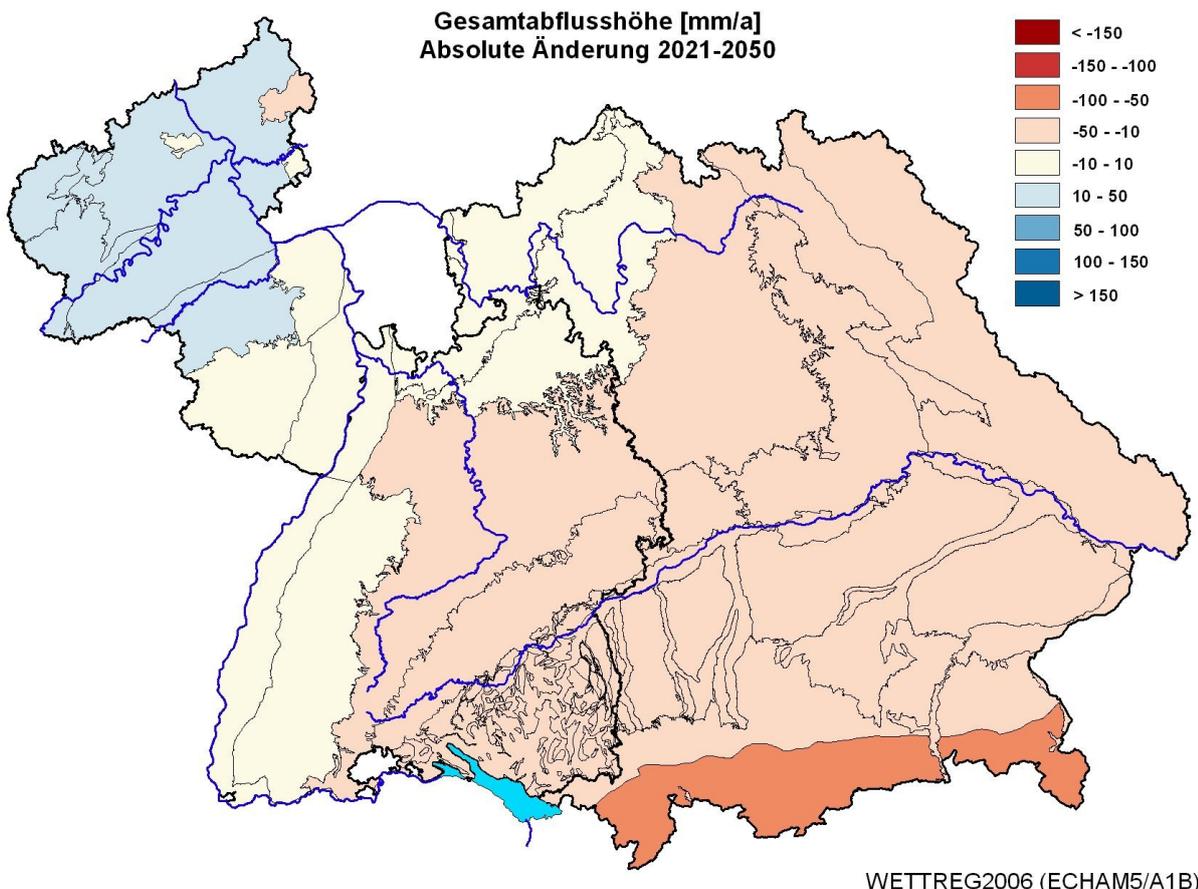


Abb. 5.19: Mittlere Änderung der Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

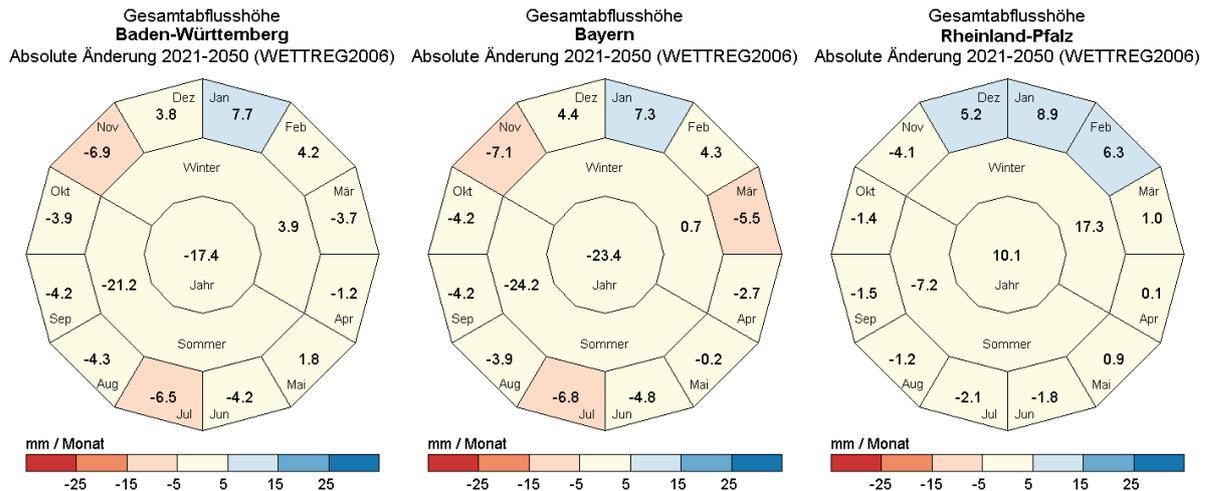


Abb. 5.20: Mittlere innerjährliche Änderung der Gesamtabflusshöhe in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.6 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung ist wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung und ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen. Als meist kleinster Anteil und Bilanzrest reagiert die Grundwasserneubildung aus Niederschlag besonders empfindlich auf Änderungen aller weiteren Wasserbilanzgrößen. Im vorliegenden Fall wurde die Grundwasserneubildung auf Grundlage der mit GWN-BW simulierten Sickerwasserrate (bzw. des Gesamtabflusses) als Grundwasserneubildung aus Niederschlag abgeschätzt. Dabei dient der regionalisierte BFI (Baseflow-Index) zur Berücksichtigung der schnellen lateralen Abflusskomponenten (vgl. Kap. 2.2.2). 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.

5.6.1 Periode 1971-2000

In Abb. 5.21 ist die Grundwasserneubildung als dreißigjähriges Mittel (1971-2000) für den Untersuchungsraum dargestellt. Die räumliche Differenzierung zeigt deutlich den Einfluss der regionalen klimatischen Verhältnisse, insbesondere der Niederschlagsverteilung. So zeichnen sich z.B. das niederschlagsreiche Voralpenland und die Mittelgebirgsregionen von Nordwesteifel, Pfälzerwald und Schwarzwald durch hohe Grundwasserneubildungsraten von über 250-300 mm/a aus (Abb. 5.22). Dem stehen z.B. große Teile von Rheinland-Pfalz gegenüber, die niederschlags- und verdunstungsbedingt nur eine sehr geringe bzw. keine nennenswerte Grundwasserneubildung aufweisen. Als Extrembeispiel ist hier insbesondere das Mainzer Becken mit mittleren Werten von lediglich 0-50 mm/a zu nennen.

Regional sind auch neubildungsrelevante Effekte von Boden, Landnutzung, Relief und der hydrogeologischen Gegebenheiten erkennbar. Als anschauliches Beispiel sei auf die Fränkische bzw. Schwäbische Alb mit Werten von 200-300 mm/a hingewiesen. Dieser Bereich hebt sich trotz ähnlicher Niederschläge deutlich vom Albvorland mit seiner sehr geringen Grundwasserneubildung ab. Auch das Rheinische Schiefergebirge weicht auf Grund der ungünstigen Speichereigenschaften des anstehenden Gesteins mit vergleichsweise niedri-



gen Neubildungsraten deutlich von den benachbarten, ähnlich niederschlagsreichen Mittelgebirgen ab. Die genannten Beispiele veranschaulichen, in welcher Weise je nach Standort die Bilanzkomponente „Grundwasserneubildung“ durch Niederschlag, Verdunstung und schnelle Abflusskomponenten in unterschiedlichem Maße beeinflusst wird.

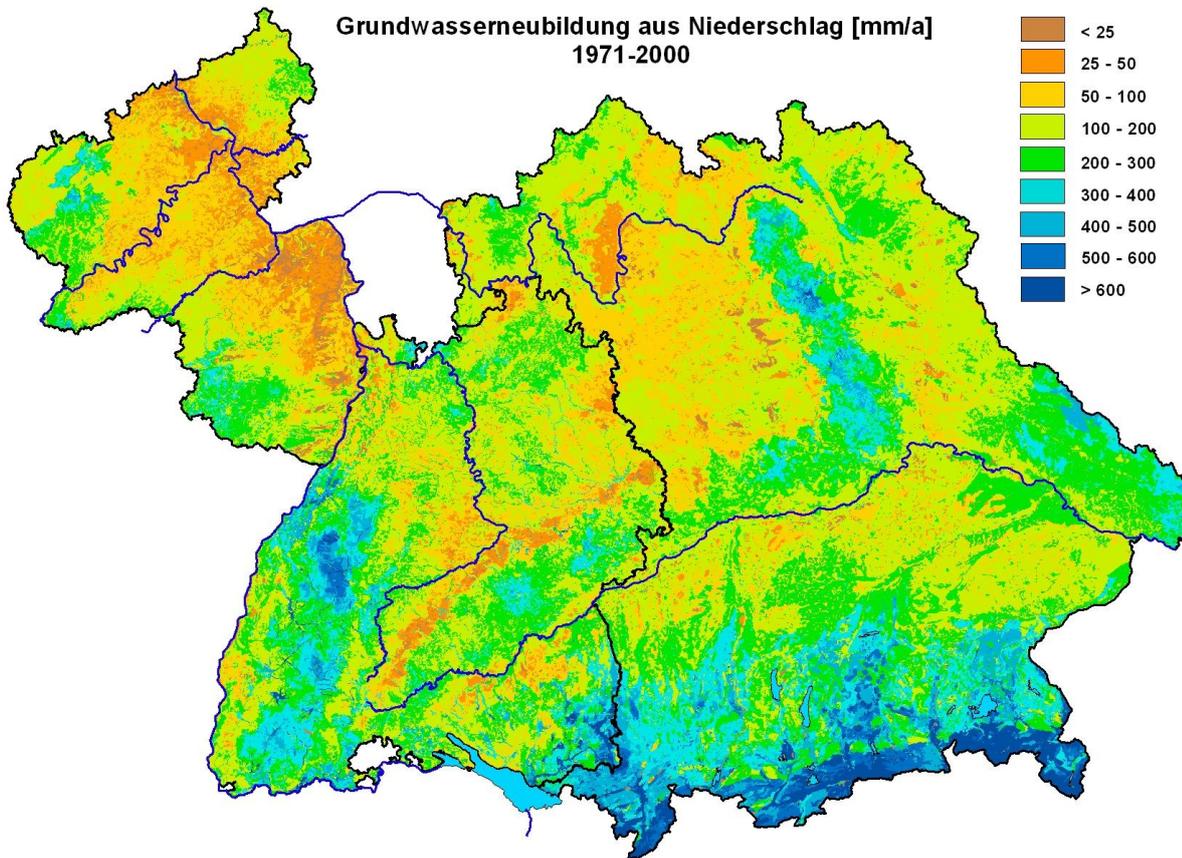


Abb. 5.21: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

Grundwasserneubildung im hydrologischen Jahr – 1971-2000

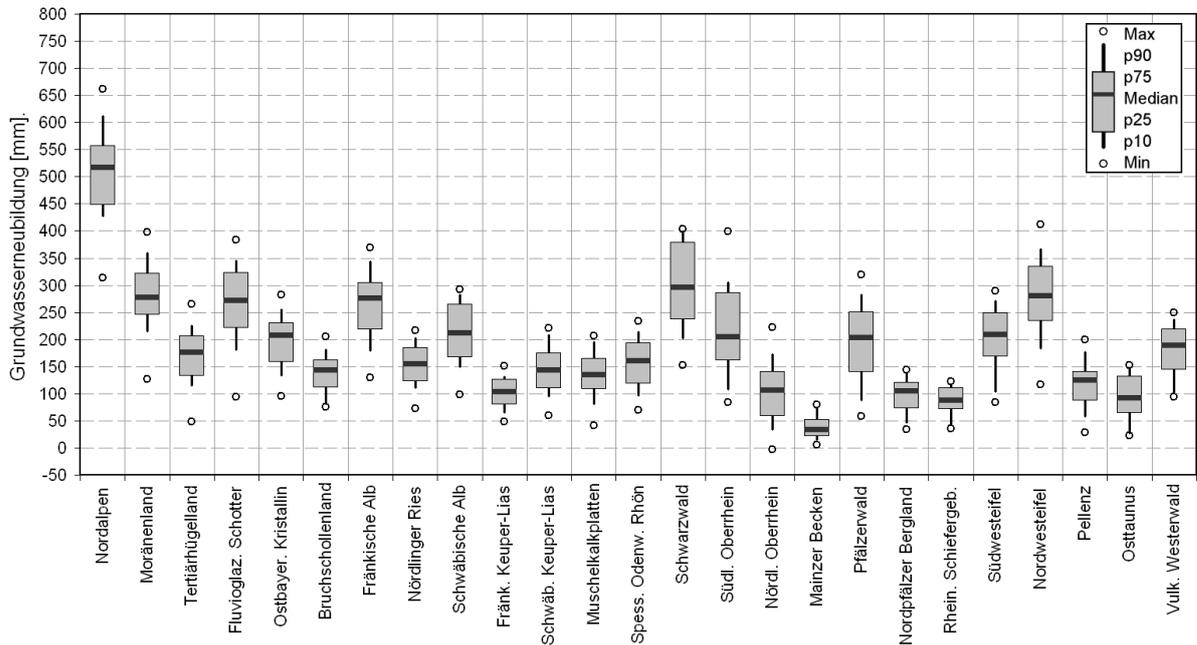


Abb. 5.22: Box-Plot-Diagramm der mittleren Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

5.6.2 Periode 2021-2050

Die absoluten Änderungen der dreißigjährigen Mittelwerte der Grundwasserneubildung zeigen für die nahe Zukunft eine ähnliche Entwicklung und räumliche Verteilung wie bereits für den Niederschlag und die Sickerwasserrate (Gesamtabflusshöhe) beschrieben (Abb. 5.23). Leichten Zunahmen von wenigen mm/a im Nordwesten (Rheinland-Pfalz) stehen Bereiche mit geringen Abnahmen insbesondere am Alpenrand gegenüber. Dazwischen befinden sich weite Teile Baden-Württembergs und Bayerns, die kein eindeutiges Änderungssignal bzw. nur sehr geringe Abnahmen aufweisen. Insgesamt kann man somit von einer Nordwest-Südost-Differenzierung innerhalb des KLIWA-Untersuchungsraums sprechen (geringe Zunahme im Nordwesten versus geringe Abnahme im Südosten). Im Hinblick auf das zukünftige Grundwasserdargebot werden diese räumlichen Entwicklungstendenzen voraussichtlich jedoch nicht zu überregionalen Problemen bei der Grundwasserbewirtschaftung führen.

Die Bereiche, in denen bisher großräumig die geringsten Neubildungsraten zu verzeichnen waren („Mangelgebiete“), könnten unter Umständen vielmehr durch eine leichte Verbesserung der Situation gekennzeichnet sein. Demgegenüber treten die deutlichsten Abnahmen in den eigentlichen „Überschussgebieten“ auf, wo bisher schon die höchsten Grundwasserneubildungsraten beobachtet wurden. Auch wenn hier keine monatlichen Auswertungen durchgeführt werden konnten, zeichnet sich zumindest an den in der Vergangenheit gemessenen Grundwasserständen und Quellschüttungen bereits eine Änderung der innerjährlichen Verhältnisse ab. So zeigen zahlreiche Zeitreihen bereits eine signifikante Tendenz zu einem früheren jährlichen Maximum als in der Vergangenheit (KLIWA 2011).

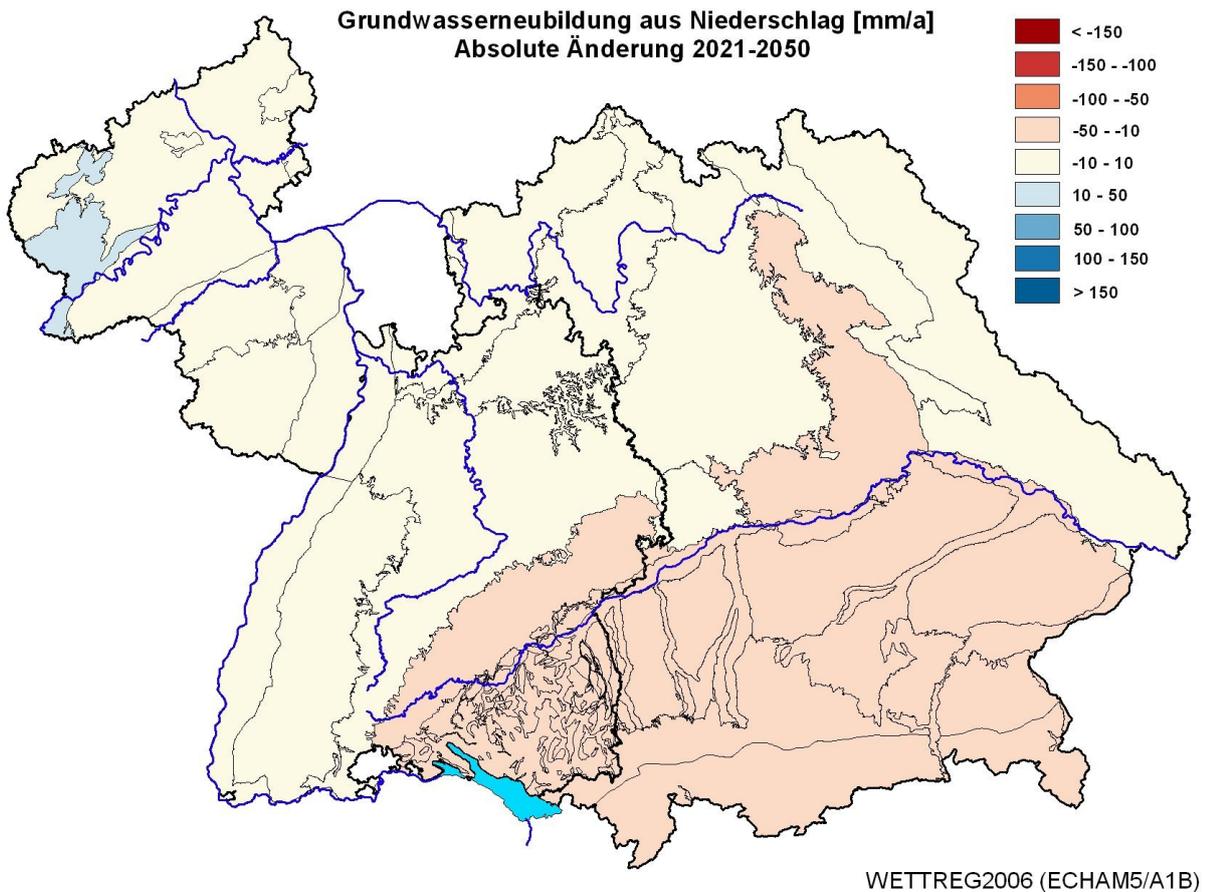


Abb. 5.23: Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

5.7 Trockenheitsindex

Der „Trockenheitsindex“ beschreibt den Zeitraum, in dem der mittlere Füllungsstatus des Bodenwasserspeichers einen definierten Grenzwert unterschreitet und ist damit ein Indikator für die Wasserverfügbarkeit im Boden. Als Schwellenwert wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise innerhalb des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WABOA 2007) eine 30 %ige Füllung des Bodenwasserspeichers (bezogen auf die nutzbare Feldkapazität nFK-We) definiert. Die Anzahl der Tage, in denen dieser Schwellenwert unterschritten wird, wird hier als Trockenheitsindex bezeichnet. Der Trockenheitsindex beschreibt damit Verhältnisse, in denen in der Regel keine Sickerung in Richtung Grundwasser erfolgt (ausbleibende Grundwasserneubildung) und zugleich eine fortschreitende Entleerung der Grundwasservorkommen über den Basisabfluss stattfindet. Darüber hinaus handelt es sich um Zeiträume, in denen die Vegetation unter Trockenstress steht, so dass in der Regel auch ein deutlich erhöhter anthropogener Wasserverbrauch durch die Landwirtschaft selbst und die öffentliche Wasserversorgung zu verzeichnen ist.

5.7.1 Periode 1971-2000

Der Trockenheitsindex wird maßgeblich durch die standortabhängige Größe des Bodenwasserspeichers in Verbindung mit der Menge des zur 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 Bodenwasserspeicher zur Verfügung steht. Umgekehrt treten in niederschlagsreichen Regionen nur dann geringe Werte auf, wenn besonders geringmächtige (= „wenig speicherfähige“) Böden zur Verfügung stehen. Genau diese räumliche Differenzierung wird im Gesamttraum bzw. in den Naturräumen deutlich (Abb. 5.24 und 5.25). Während sich der Lockergesteinsbereich südlich der Donau sowie Schwarzwald und Bayerischer Wald durch verhältnismäßig niedrige Trockenheitsindizes auszeichnen, weichen weite Teile im nördlichen Untersuchungsgebiet (insbesondere Unterfranken und Rheinland-Pfalz) spürbar davon ab. So treten große regionale Unterschiede von etwa 0 bis zu knapp 80 Tagen/Jahr auf, wobei zwischen einzelnen Jahren erhebliche Unterschiede bestehen können. Im Mittel wird in Rheinland-Pfalz der Schwellenwert etwa 12 Wochen pro Jahr unterschritten, während er in Bayern und Baden-Württemberg lediglich in 6-8 Wochen pro Jahr unterschritten wird. Erwartungsgemäß sind im Jahresverlauf die Sommermonate besonders auffällig. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die vegetationsbedingt hohen Verdunstungsraten, die zu einer zügigen Entleerung auch gut gefüllter Bodenwasserspeicher führen können (Abb. 5.26).

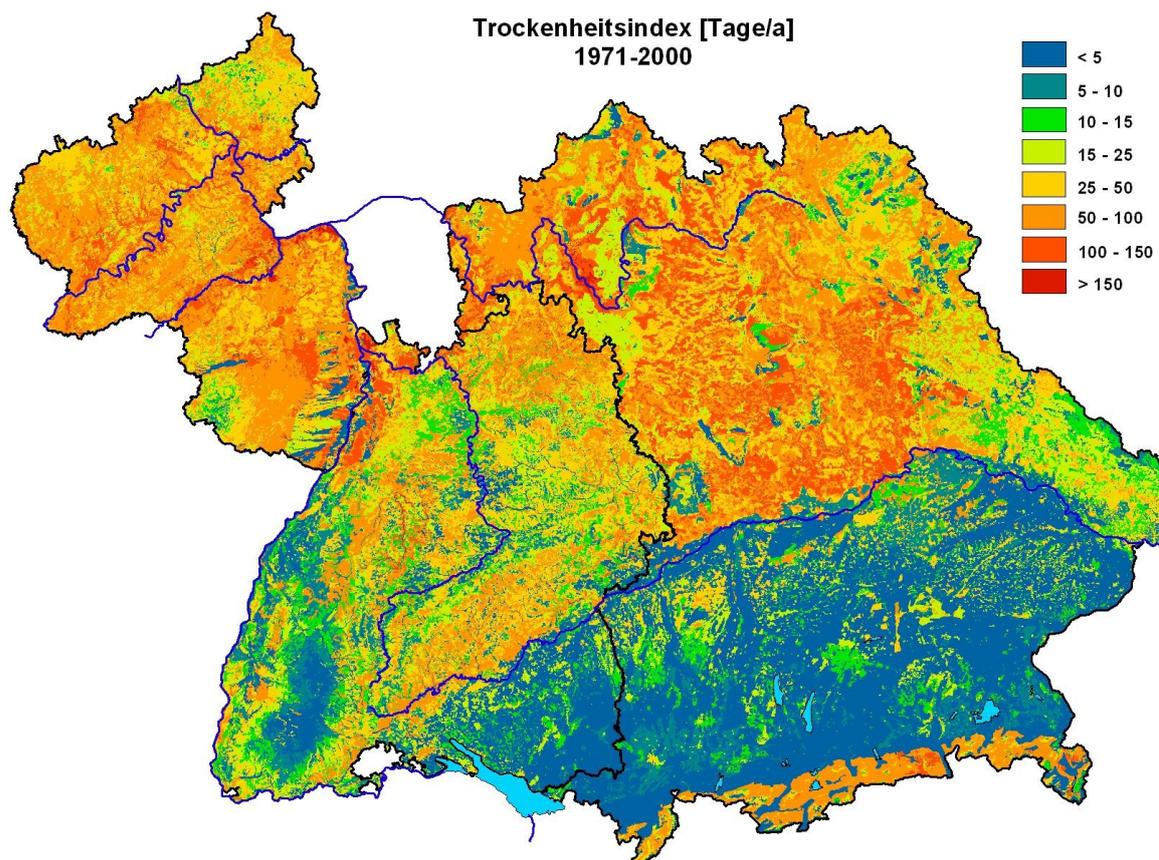


Abb. 5.24: Mittlerer jährlicher Trockenheitsindex (Zahl der Tage mit einem Bodenwassergehalt < 30 % nFK). Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in Tagen/Jahr.



Trockenheitsindex im hydrologischen Jahr – 1971-2000

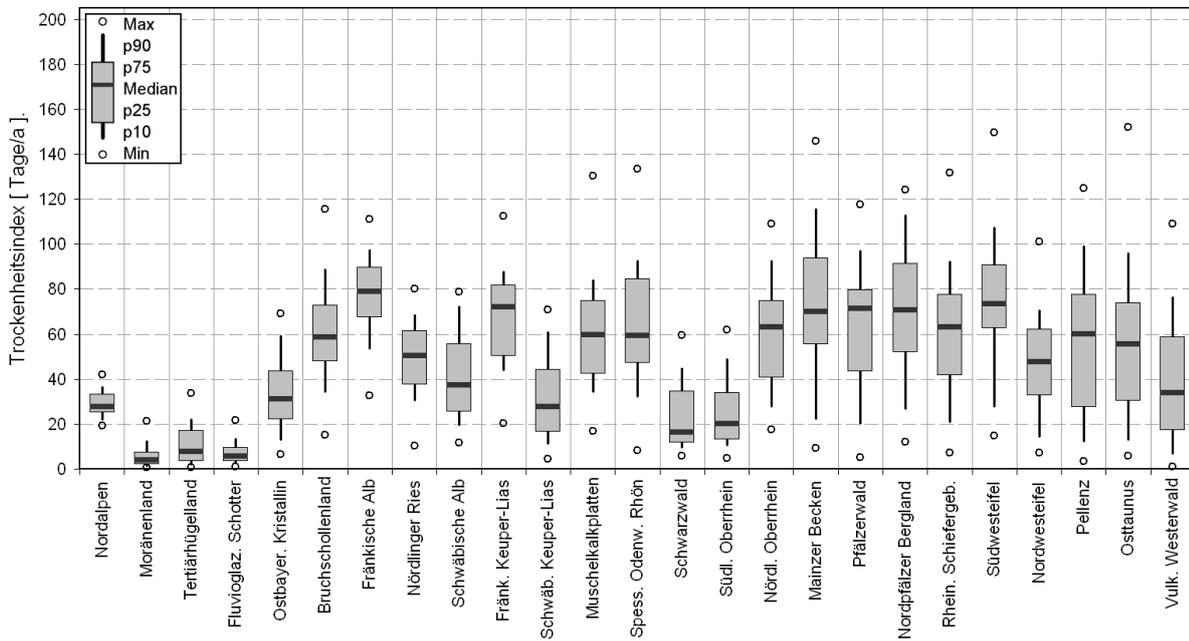


Abb. 5.25: Box-Plot-Diagramm des mittleren Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.

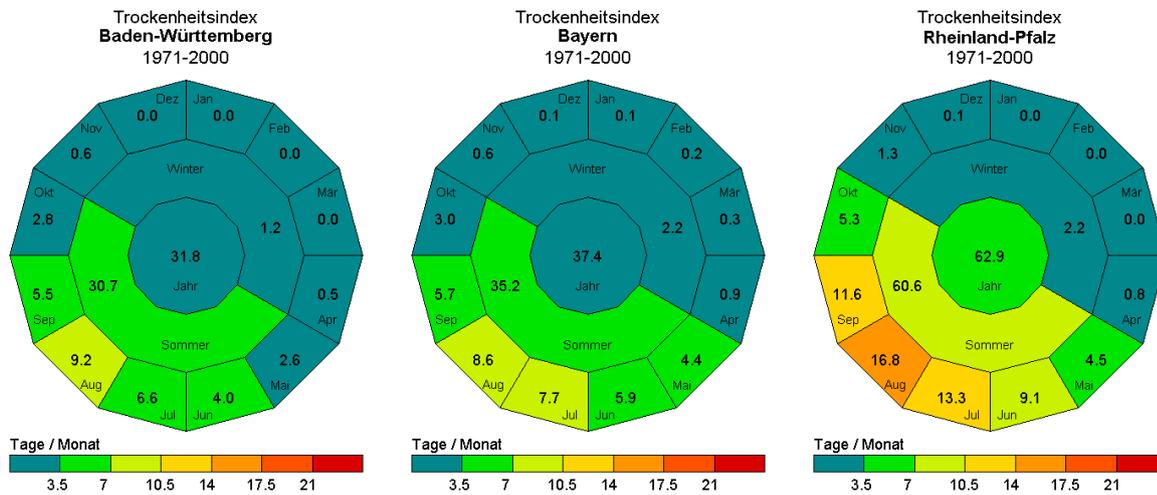


Abb. 5.26: Mittlere innerjährliche Variabilität des Trockenheitsindex in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.7.2 Periode 2021-2050

Für den Szenariozeitraum 2021-2050 ergibt sich bezogen auf die drei Bundesländer ein vergleichsweise einheitliches Bild (Abb. 5.27). So ist im Jahresmittel mit einer Zunahme des Trockenheitsindex in einer Größenordnung von etwa 11 bis 14 Tagen zu rechnen, was immerhin etwa 2 bis 3 Wochen/Jahr zusätzlich bedeutet, in denen die Grundwasservorräte stark beansprucht werden.

Am Beispiel von Rheinland-Pfalz kann aufgezeigt werden, dass sich die projizierte Erhöhung der Winterniederschläge auf jährlicher Ebene zwar zu Gunsten der Bilanzgrößen Gesamtabfluss, Sickerwasserrate, Grundwasserneubildung auswirkt, dies im Kontext Trockenheitsindex jedoch keine nennenswerten Auswirkungen hat. Hintergrund ist, dass hier die Anzahl der Tage, an denen die „kritische“ nFKWe unterschritten wird, genauso wie in Baden-Württemberg und Bayern, nahezu ausschließlich auf zusätzliche Tage in den Sommermonaten zurückzuführen ist (Abb. 5.28). Dagegen pausen sich die Entwicklungen im Alpenraum (Abnahme der Bilanzgrößen Gesamtabfluss, Sickerwasserrate, Grundwasserneubildung bezogen auf Jahreswerte), beim Trockenheitsindex nicht mehr durch. Die projizierten Änderungen sind zwar insbesondere im Sommer deutlich, jedoch ist auch in naher Zukunft das Wasserdargebot im Alpenraum groß genug, um keine eindeutigen Entwicklungen hinsichtlich des Trockenindex zur Folge zu haben.

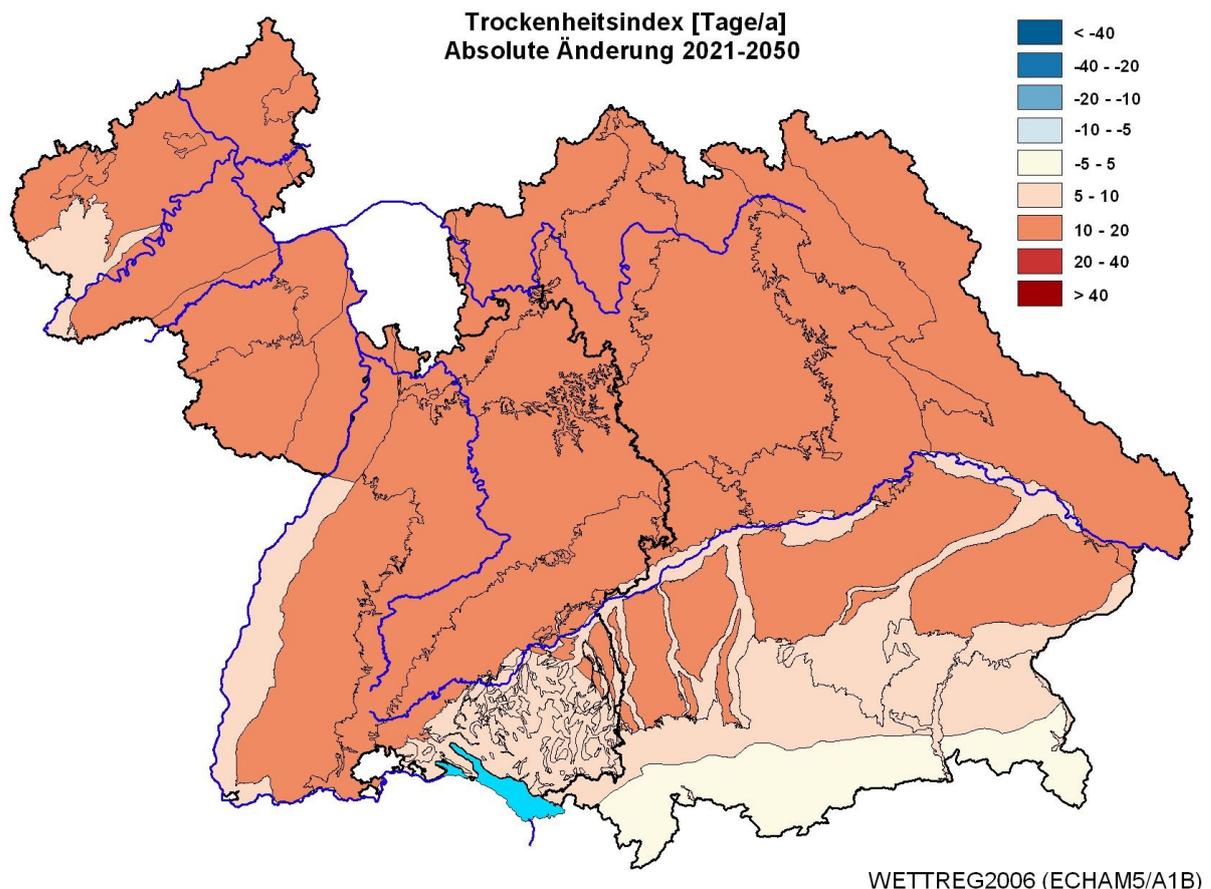


Abb. 5.27: Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in Tagen/Jahr.

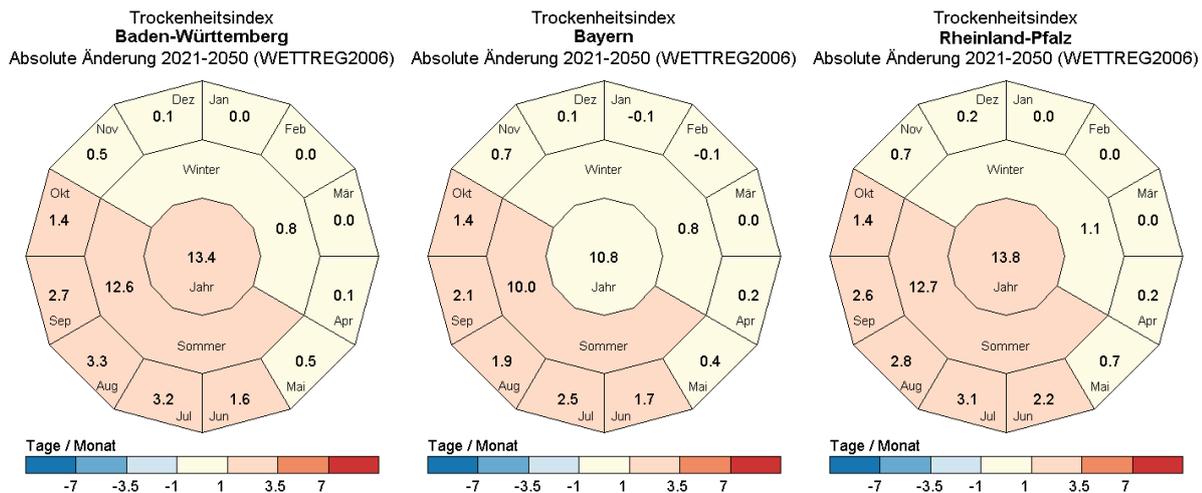


Abb. 5.28: Mittlere innerjährliche Änderung des Trockenheitsindex in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Auf Ebene einzelner Naturräume werden Zunahmen von etwa 2 bis knapp 20 Tagen im Jahr erwartet, wobei sich die Mehrzahl der Gebiete in einer Größenordnung von ca. 12 bis 16 Tagen bewegt. Lediglich das niederschlagsreiche Alpenvorland und die mächtigen Böden der Flusstalfüllungen sowie des südlichen Rheingrabens weichen davon spürbar ab. Betrachtet man die absoluten Werte in der Zukunft, so werden Spannweiten von etwa 10 Tagen/Jahr bis zu mehr als 80 Tagen/Jahr erreicht.

5.8 Wasseräquivalent der Schneedecke

Als weiteres Ergebnis der Modellierung wurde das mittlere Wasseräquivalent der Schneedecke ausgewertet. Dazu wurden die vieljährigen Veränderungen der mittleren täglichen Wasseräquivalente näher betrachtet. Der Vergleich der Untersuchungszeiträume Monate, Halbjahre und Jahre ermöglicht ergänzend zu den aufgezeigten Tendenzen bei Niederschlag und Temperatur Aussagen zur mittleren regionalen Veränderung des Schneespeichers. Für Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung ist dies deshalb von Bedeutung, da sich auf der Grundlage des Schneespeichers letztlich entscheidet, wann das fest gebundene Wasser zum Abfluss kommt bzw. wann Sickerwasser gebildet wird.

5.8.1 Periode 1971-2000

Die Periode 1971-2000 zeigt für die Monate Dezember bis März ein räumliches Bild, das der mittleren Niederschlagsverteilung ähnelt. So sind im dreißigjährigen Mittel nennenswerte Niederschlagsmengen vorwiegend in den Alpen und Mittelgebirgen als Schnee gebunden (Abb. 5.29). Während in den Alpen im Winterhalbjahr mittlere Wasseräquivalente in der Schneedecke von nahezu 100 mm auftreten, werden im Schwarzwald und Ostbayerischem Kristallin immerhin noch knapp 30 mm beobachtet. Alle weiteren Mittelgebirge weisen im Vergleich dazu lediglich Werte von etwa 10 mm auf. Demgegenüber sind weite Bereiche der drei Bundesländer durch Werte nahe Null gekennzeichnet. Im Mittel sind in Rheinland-Pfalz etwa 2.5 mm, in Baden-Württemberg etwa 4 mm und in Bayern 9 mm in der Schneedecke gebunden (Abb. 5.30). Dabei treten zwischen einzelnen Jahren erhebliche Unterschiede auf.

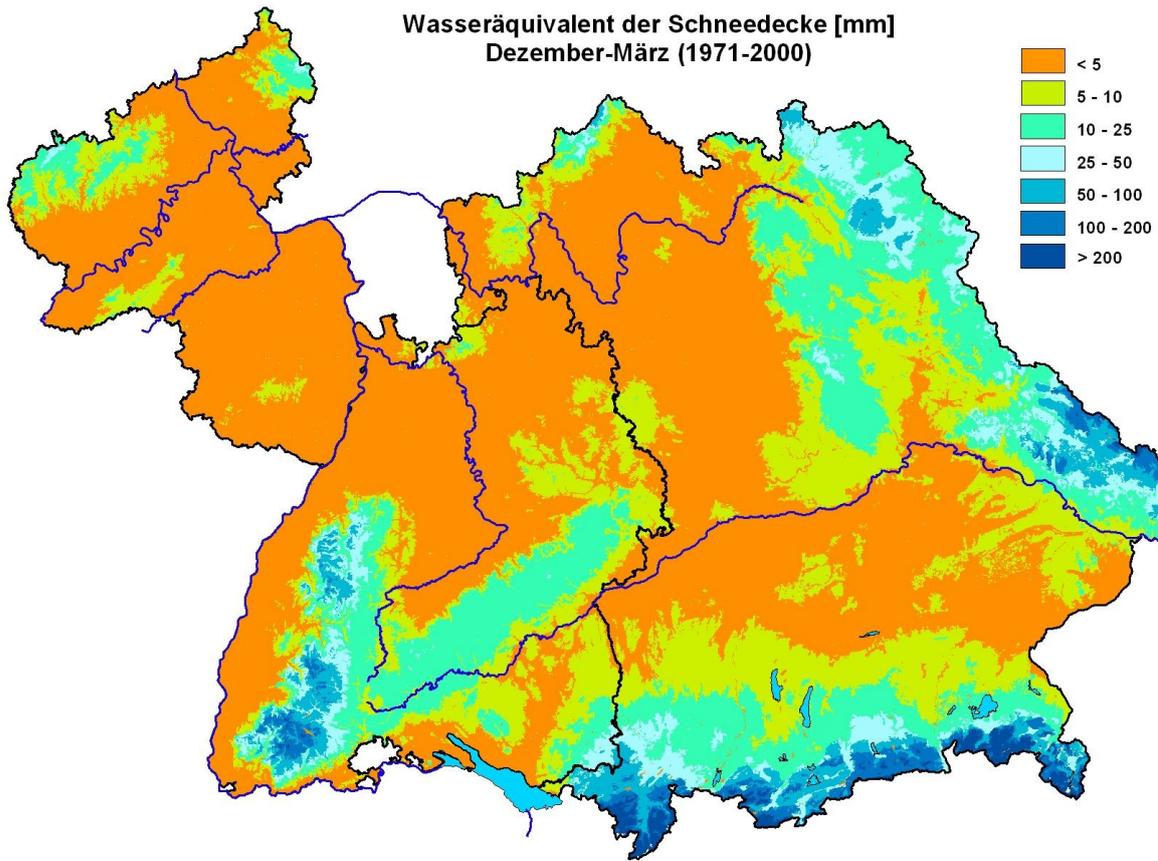


Abb. 5.29: Mittleres jährliches Wasseräquivalent der Schneedecke in den Monaten Dezember-März. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm.

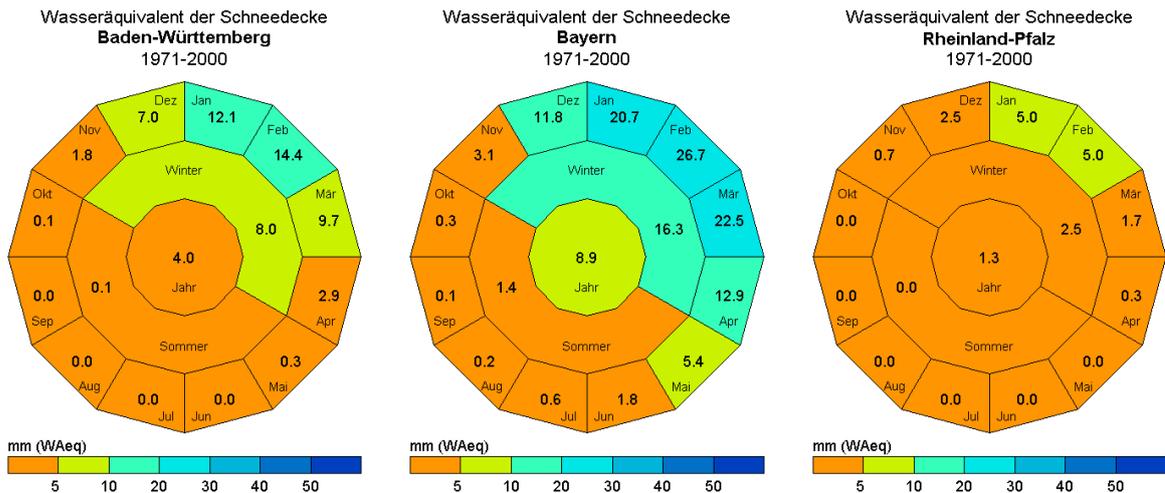


Abb. 5.30: Mittlere innerjährliche Variabilität des Wasseräquivalents der Schneedecke in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.



5.8.2 Periode 2021-2050

Da die Schneedecke sowohl sensitiv auf die Temperatur als auch auf den Niederschlag reagiert, sind deutliche Änderungen des im Mittel gebundenen Wasseräquivalents zu erwarten. Betrachtet man lediglich die absoluten Änderungen auf Ebene der Naturräume, so ergeben sich nennenswerte Abnahmen in einer Größenordnung von bis max. 40 mm nur für wenige Mittelgebirge und die Alpen (Abb. 5.31). Betroffen davon sind insbesondere die Monate Dezember bis März (Abb. 5.32). Auf Grund der geringen Absolutwerte fallen die bisher auch während der Wintermonate bereits schneearmen Naturräume nicht besonders auf. Zieht man jedoch die prozentualen Änderungen heran, so zeigen sich sehr viel deutlichere Signale in einer Größenordnung von etwa 40 % Abnahme für alle Naturräume (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang). Ähnlich geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Naturräumen wurden bereits bei der Temperaturentwicklung aufgezeigt und wirken sich hier offensichtlich auch direkt auf die Schneeakkumulation aus.

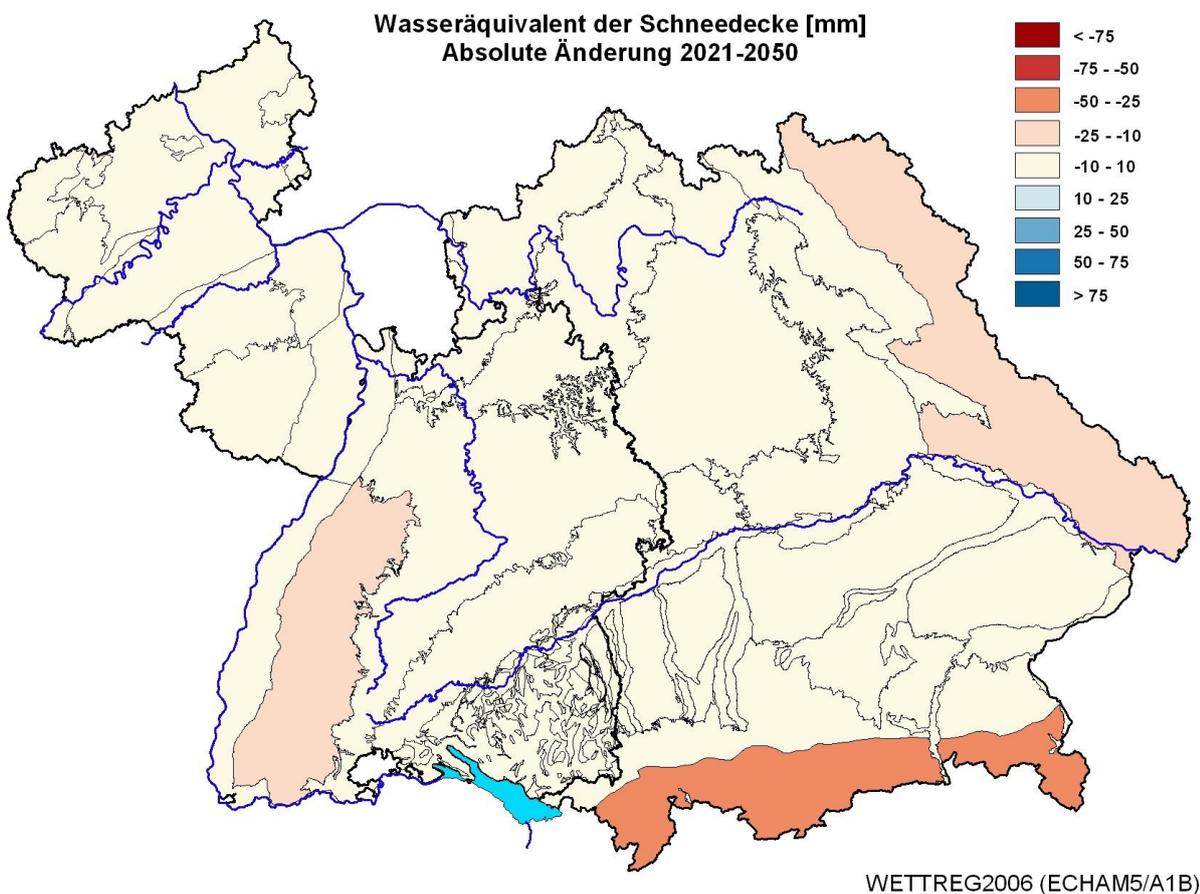


Abb. 5.31: Mittlere Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Monaten Dezember - März in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm.

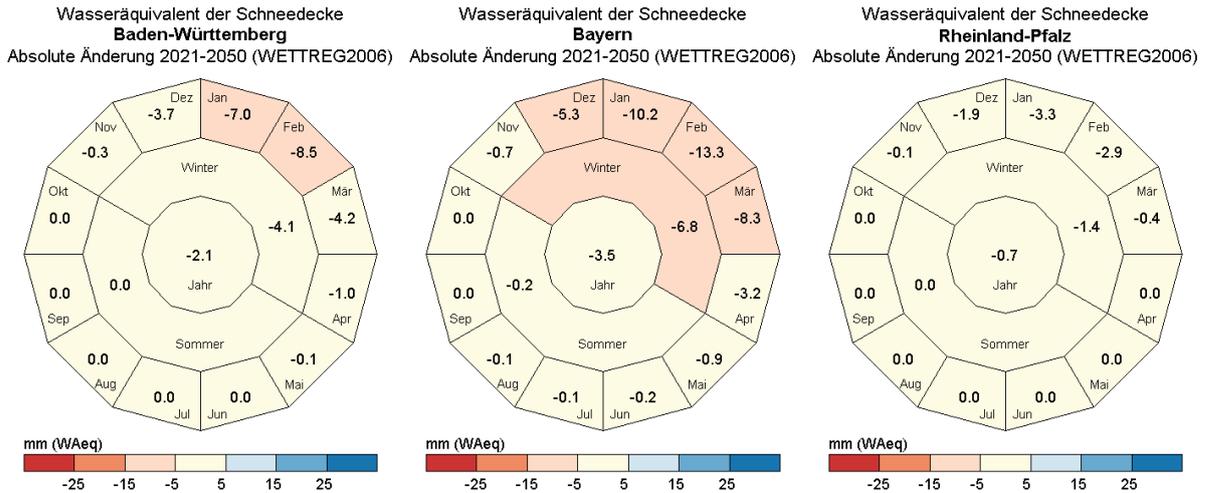


Abb. 5.32: Mittlere innerjährliche Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.9 Ergebnisse für die ferne Zukunft (2071-2100)

Auf der Basis von WETTREG-2006 (ECHAM5/A1B) setzt sich in der fernen Zukunft voraussichtlich eine klimatische Entwicklung fort, die sich bereits für die nahe Zukunft andeutet. Dies hätte zur Folge, dass die aufgezeigten Tendenzen und Änderungssignale einzelner Wasserhaushaltsgrößen sich bis Ende des Jahrhunderts noch weiter verstärken werden. In diesem Zusammenhang muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) für die ferne Zukunft vermutlich nochmals mit höheren Unsicherheiten behaftet sind, als die zuvor beschriebenen Ergebnisse für den Zeitraum 2021-2050. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass das statistische, auf Wetterlagen basierende Modell WETTREG auf der Basis von Messdaten aus der Vergangenheit entwickelt wurde. Wie weit die zukünftige Situation außerhalb dieses Wertebereichs liegt, kann derzeit noch nicht zuverlässig beziffert werden. Da unabhängig von den Ergebnissen einzelner Klimamodelle jedoch Konsens besteht, dass sich der beobachtete Temperaturanstieg auch in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts fortsetzen wird, sollen hier zumindest die groben Tendenzen einer möglichen Entwicklung des Bodenwasserhaushalts bis zum Zeitraum 2071-2100 vorgestellt werden. Die entsprechenden Ergebnisse der Szenariosimulationen für die ferne Zukunft werden im weiteren Verlauf für die einzelnen Parameter (vgl. Kap. 5.1) getrennt voneinander aufgezeigt. Eine vollständige Übersicht aller Auswertungen gemäß Tab. 5.1 ist Bestandteil des digitalen Anhangs (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang).

Lufttemperatur

Im Mittel ergeben sich gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000 Temperaturzunahmen von ca. 2.3 °C in allen Naturräumen und Bundesländern (Abb. 5.33). Dabei erhöhen sich die Temperaturen der Wintermonate um ca. 4 °C, während die Monate März bis Mai meist nur Zunahmen von 1 °C aufweisen. Die beschriebenen Effekte und deren konkrete Auswirkungen auf die Wasserbilanz werden im weiteren Verlauf auch noch im Kontext mit Verdunstung und Wasseräquivalent der Schneedecke diskutiert.

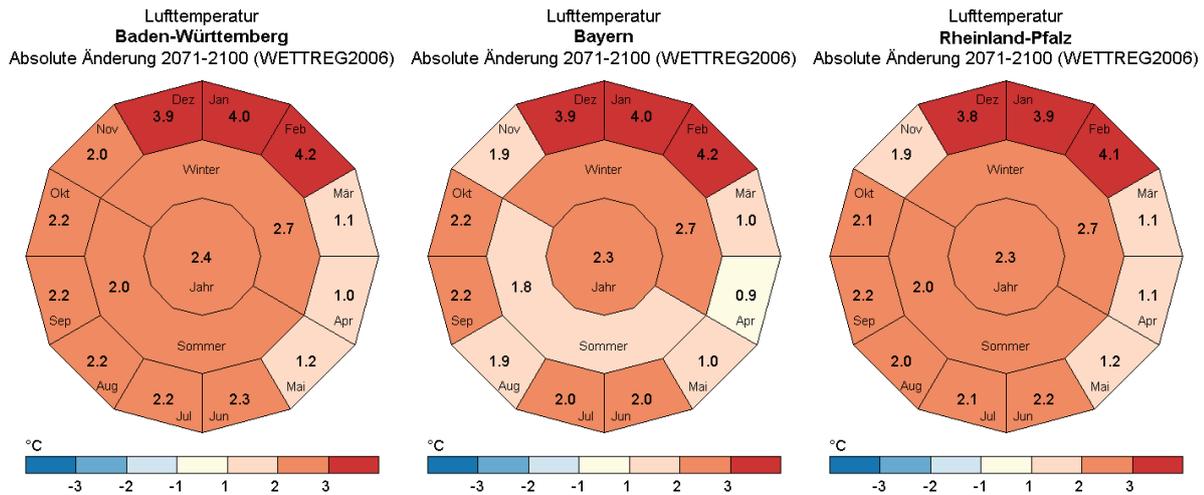


Abb. 5.33: Mittlere innerjährliche Änderung der Lufttemperatur in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in °C.

Niederschlag

Die WETTREG2006-Projektion für die ferne Zukunft schreibt die aufgezeigte Entwicklung einer Zunahme im Nordwesten des KLIWA-Gebietes und Abnahme im Süden fort (Abb. 5.34), verbunden mit einer Umverteilung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr (Abb. 5.35). Deutlichen Steigerungen des mittleren Jahresniederschlags in Rheinland-Pfalz, Unterfranken und im Norden Baden-Württembergs stehen Abnahmen in den Alpen, am Alpenrand und auf der Schwäbischen Alb gegenüber. Die Größenordnung des durchschnittlichen jährlichen Änderungssignals liegt in der fernen Zukunft bei mehr als 100 mm/a, was einer mittleren prozentualen Änderung von -8 % (Alpen) bis +15 % (Eifel) auf der Ebene von Naturräumen entspricht (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang). Betrachtet man den innerjährlichen Verlauf, so zeigen sich in allen Naturräumen Zunahmen in den Monaten Dezember bis Februar sowie deutliche Abnahmen zwischen Juni und August (Ausnahme: Naturraum Pellenz). Dies ist gleichbedeutend mit mittleren halbjährlichen Änderungen auf Ebene der Bundesländer von -18 % bis +16 % in Baden-Württemberg und Bayern und -10 bis +30 % in Rheinland-Pfalz (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang). Die absoluten Zu- und Abnahmen bewegen sich mit Werten von z. T. mehr als 50 mm/Monat in einzelnen Bereichen in einer Größenordnung, die spürbare Auswirkungen auf alle weiteren Größen der Wasserbilanz nach sich ziehen muss.

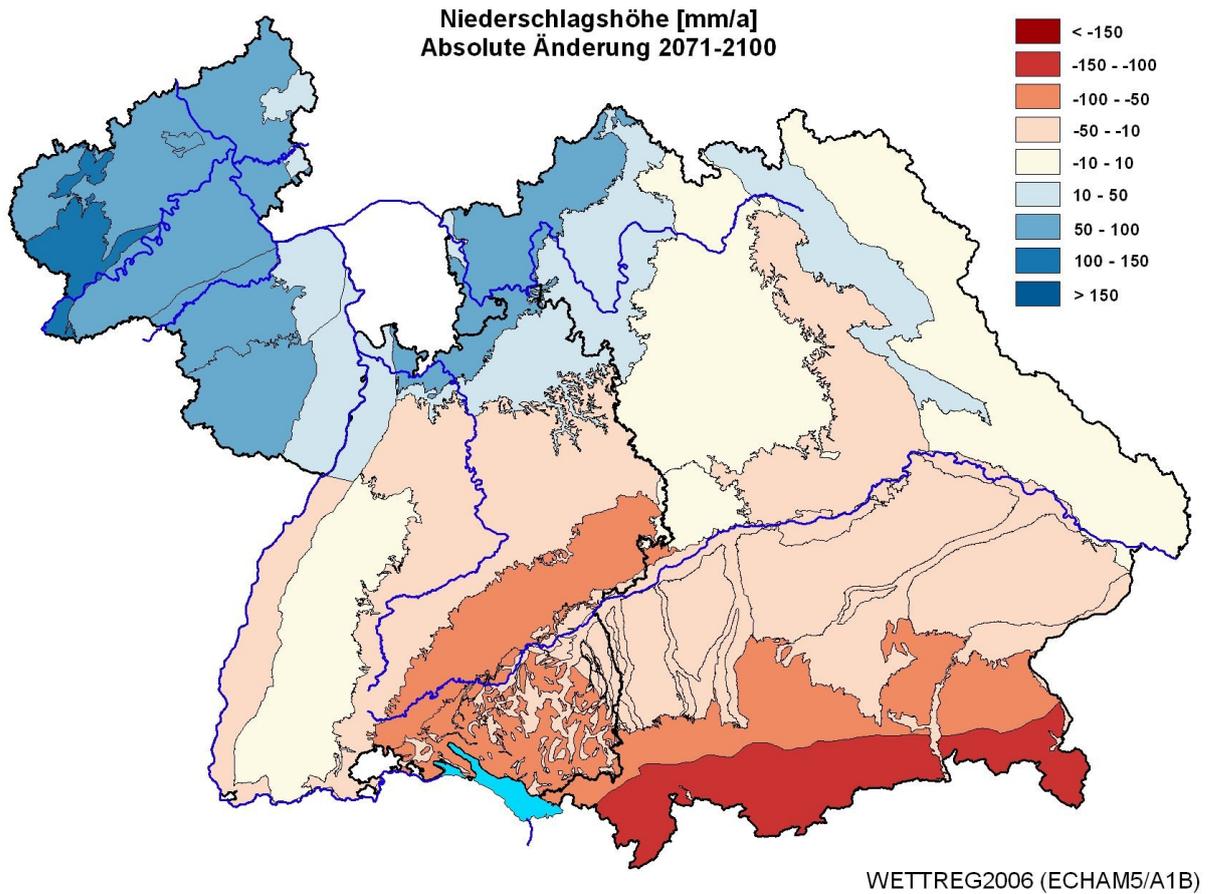


Abb. 5.34: Mittlere Änderung des Niederschlags in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

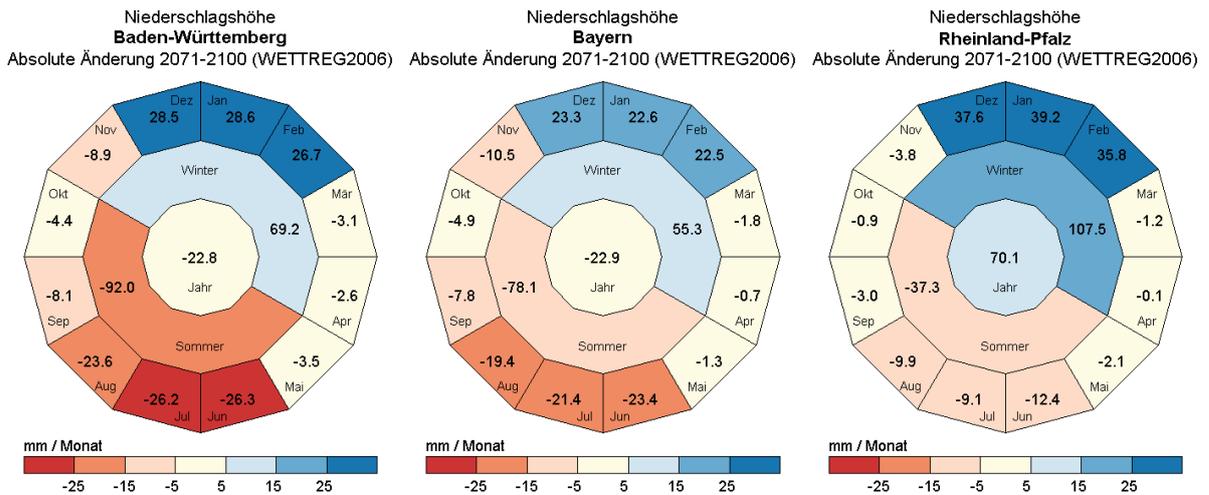


Abb. 5.35: Mittlere innerjährliche Änderung des Niederschlags in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.



Tatsächliche Verdunstung

Bei der Verdunstung zeigen die bereits im Zeitraum 2021-2050 besonders auffälligen Naturräume auch weiterhin die stärksten Änderungen (Abb. 5.36). Zusätzlich fallen in der fernen Zukunft noch weitere Mittelgebirgsregionen wie Bayerischer Wald, Fichtelgebirge, Rhön, Spessart und Pfälzerwald durch leichte Zunahmen der aktuellen Verdunstung auf. Weite Teile Bayerns und Baden-Württembergs im Bereich der Muschelkalkplatten, des Keuper-Lias-Landes und der Alb zeigen hingegen weiterhin keine nennenswerten Änderungssignale. Bezogen auf den Jahresgang verstärken sich in nahezu allen Bereichen die jahreszeitlichen Veränderungen mit Zunahmen im Winter und Abnahmen im Sommerhalbjahr. Im Jahresmittel bedeutet dies auf Ebene der Bundesländer Änderungen von ca. 5-10 mm/a für den Zeitraum 2021-2050 auf ca. 15-20 mm/a für den Zeitraum 2071-2100 (Abb. 5.37).

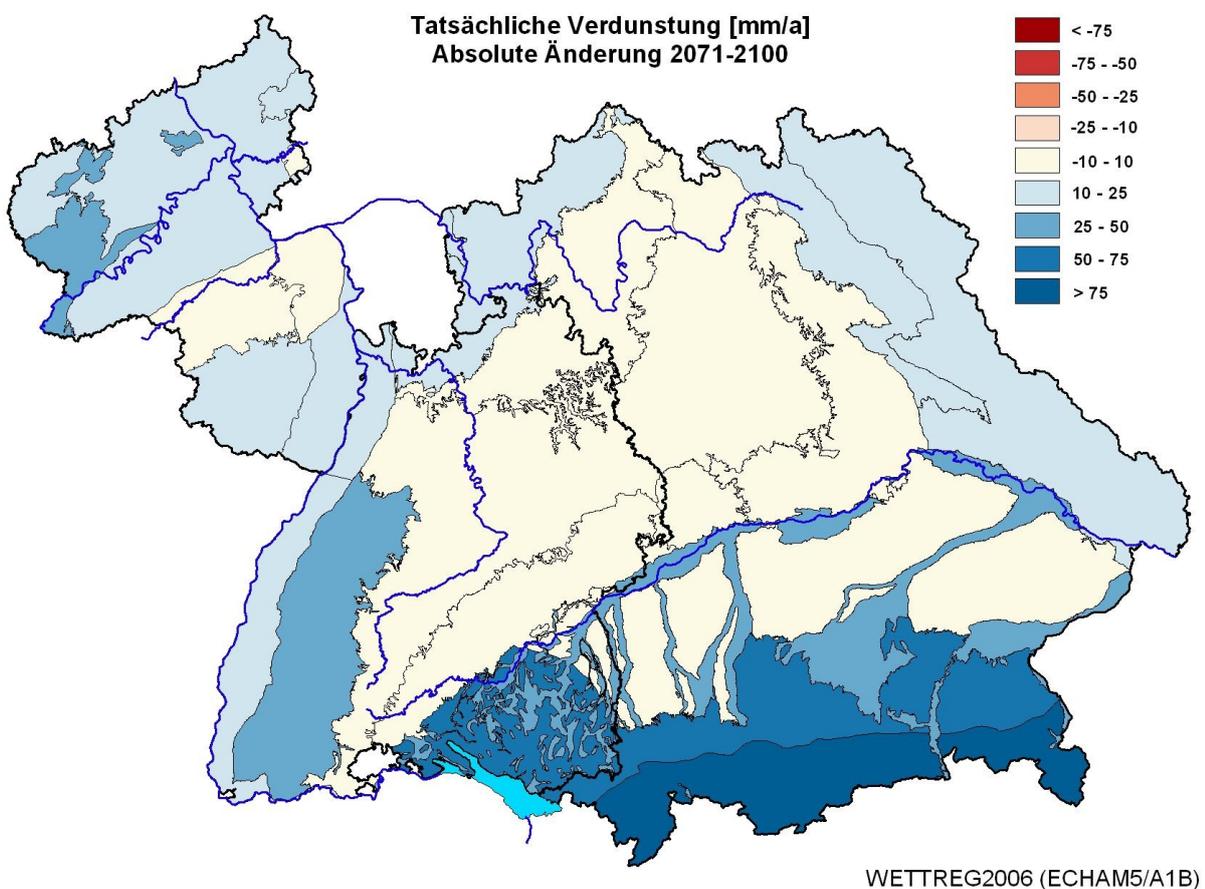


Abb. 5.36: Mittlere Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

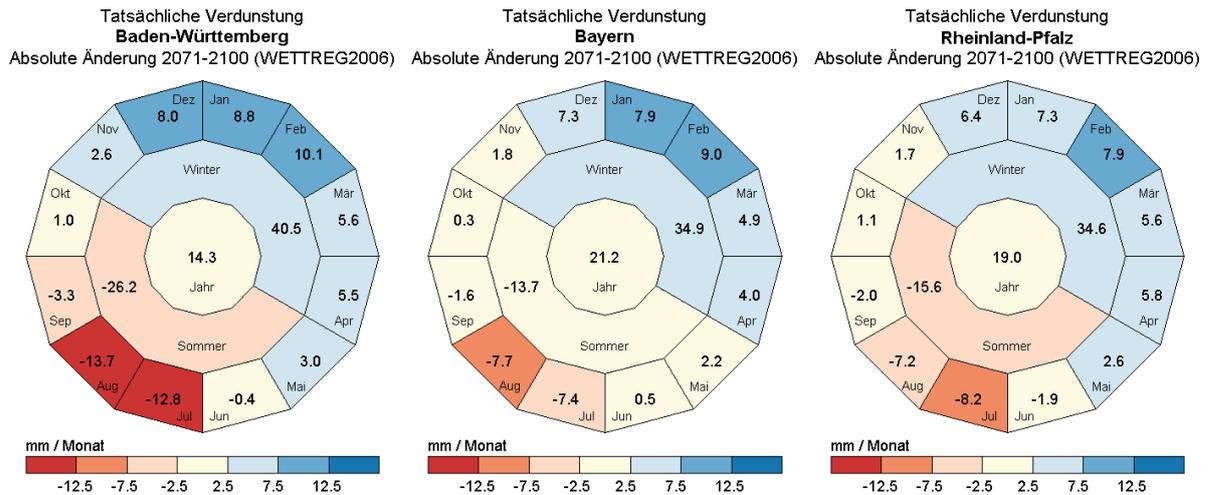


Abb. 5.37: Mittlere innerjährliche Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate

Die bis zum Ende des Jahrhunderts für die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und Verdunstung beschriebene Entwicklung beeinflusst auch den Gesamtabfluss bzw. die Sickerwasserrate deutlich (Abb. 5.38 und 5.39). In den Nordalpen können im Jahresmittel Abnahmen von etwa 200 mm/a auftreten, was prozentual knapp 20 % entspricht (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang). In einer ähnlichen Größenordnung liegen jetzt auch die angrenzenden Naturräume im Süden Bayerns. Demgegenüber verstärken sich auch im Nordwesten des Untersuchungsraums die Zunahmen, die in der fernen Zukunft Werte bis zu +30 % erreichen können. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer Naturräume, die im Mittel allerdings keine nennenswerten Änderungen zeigen. Dies ist jedoch ausschließlich darauf zurückzuführen, dass sich hier die gegensätzlichen jahreszeitlichen Entwicklungen weitgehend kompensieren. Bezogen auf einzelne Monate ist in allen Bereichen i. d. R. ebenfalls von einer Verstärkung der Änderungssignale auszugehen.

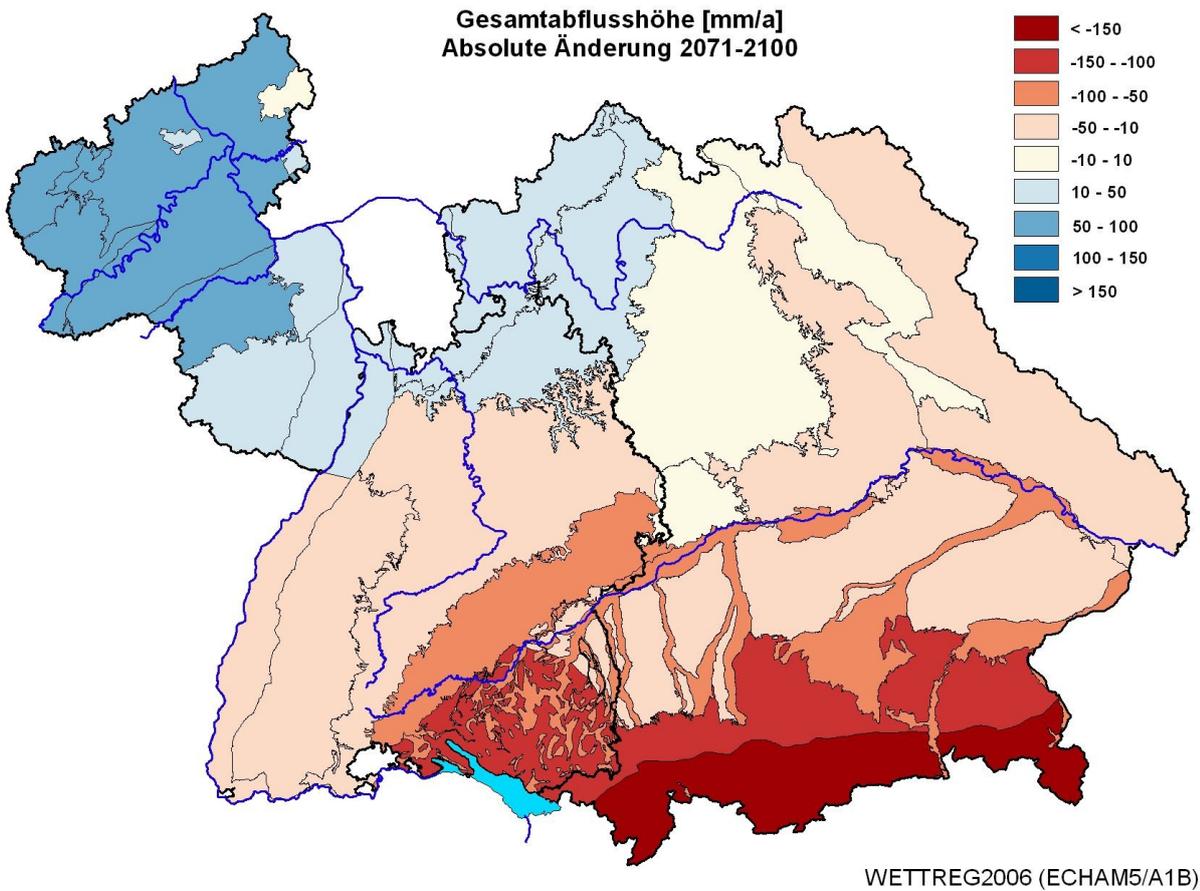


Abb. 5.38: Mittlere Änderung der Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

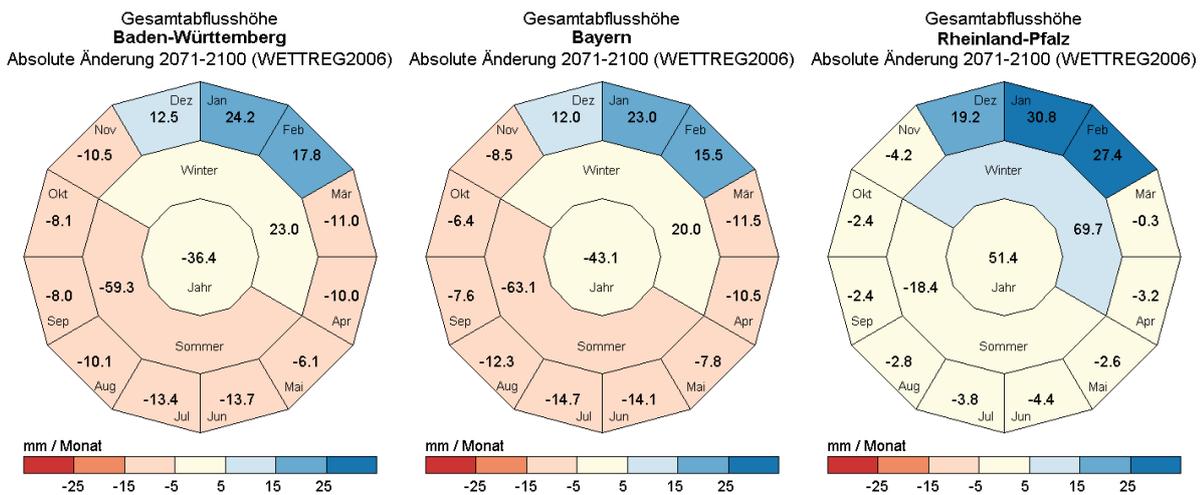


Abb. 5.39: Mittlere innerjährliche Änderung der Gesamtabflusshöhe in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Grundwasserneubildung

Das Änderungssignal der Grundwasserneubildung wird maßgeblich durch die Gesamtabflusshöhe gesteuert, so dass sich auch hier die für die „nahe Zukunft“ aufgezeigten Entwicklungstendenzen langfristig nochmals deutlich verstärken. Wie Abb. 5.40 zeigt, heben sich vor allem der Bereich südlich der Donau, die Schwäbische Alb sowie der südliche Oberrheingraben mit Abnahmen in einer Größenordnung von 20-90 mm/a deutlich von den angrenzenden Naturräumen ab. Da es sich dabei meist um vergleichsweise niederschlagsreiche Regionen handelt, sollten diese Änderungen derzeit nicht überbewertet werden. Demgegenüber stehen deutliche Zunahmen in Höhe von 10-60 mm/a in weiten Teilen von Rheinland-Pfalz, Unterfrankens und dem Norden Baden-Württembergs. Dies ist gleichbedeutend mit einer Zunahme von ca. 10-30 % (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang) und wirkt sich vor allem in den Gebieten mit den bisher niedrigsten Grundwasserneubildungsraten positiv aus.

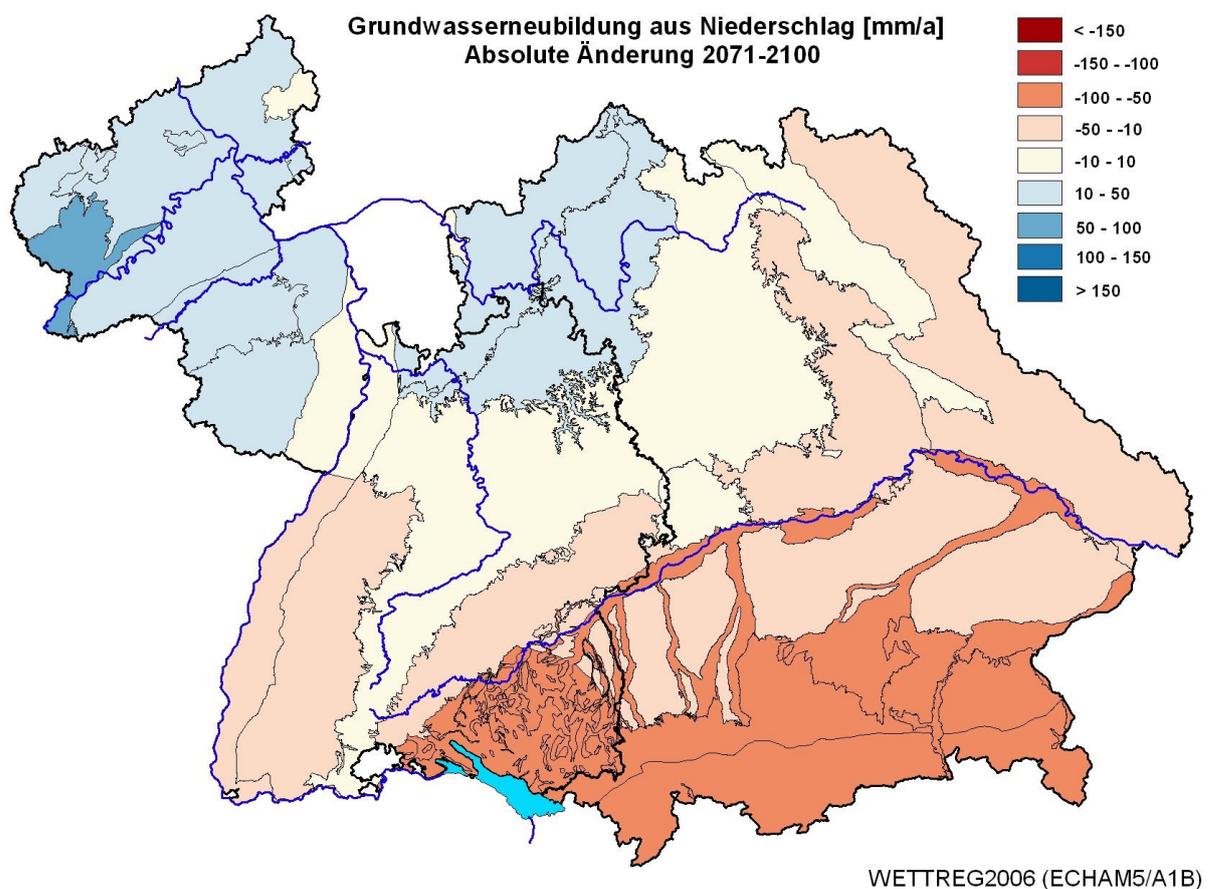


Abb. 5.40: Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.

Trockenheitsindex

Auf der Basis der Szenariodaten und Simulationsergebnisse für die Zeitspanne 2071-2100 ist eine weitere deutliche Zunahme des Trockenheitsindex wahrscheinlich (Abb. 5.41). So ergeben sich für die drei Bundesländer gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 im Mittel etwa 30 bis 40 zusätzliche Tage/Jahr mit nur gering gefülltem Bodenspeicher, was gegenüber der Zeitspanne 2021-2050 nochmals eine deutliche Verschärfung der Bodenwasserverhältnisse bedeutet (Abb. 5.42). Interessanterweise zeigen die Naturräume mit mittleren Niederschlägen und mäßig mächtigen Böden, z.B. im Bereich des Keuperberglandes, mit bis zu 50



zusätzlichen Tagen die deutlichsten Änderungen. In absoluten Zahlen ausgedrückt bedeutet dies in einzelnen Naturräumen eine Unterschreitung des Schwellenwertes an z. T. mehr als 100 Tagen im Jahr.

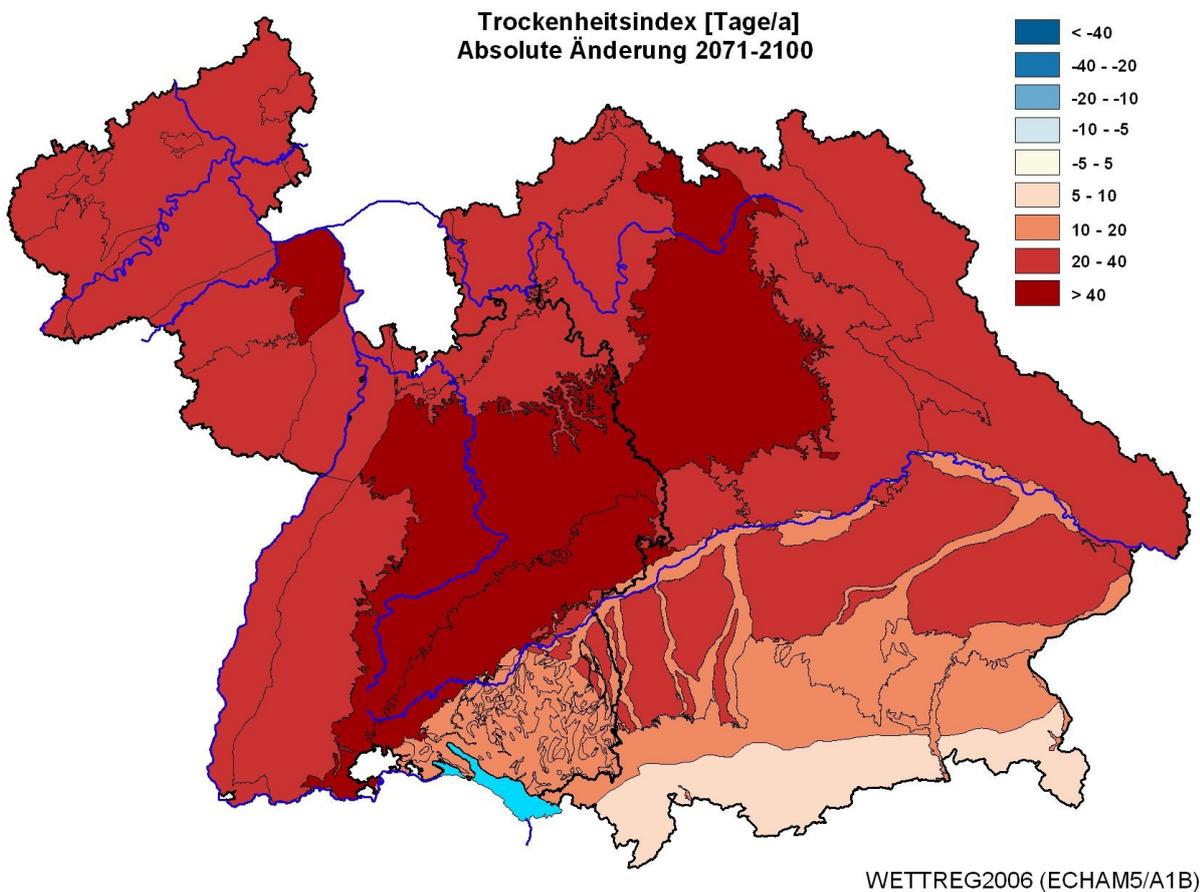


Abb. 5.41: Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in Tagen/Jahr.

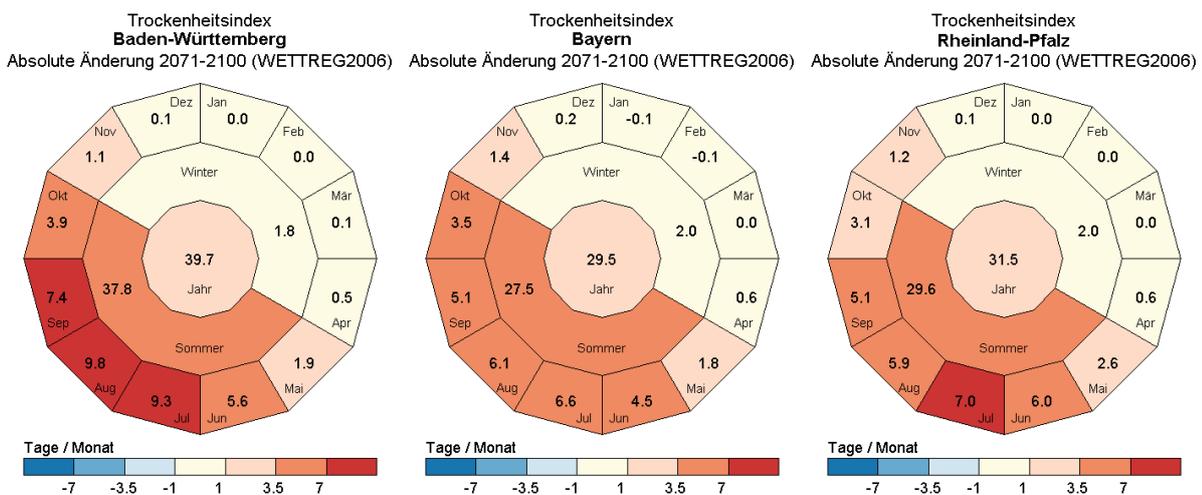


Abb. 5.42: Mittlere innerjährliche Änderung des Trockenheitsindex in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Wasseräquivalent der Schneedecke

Für die Periode 2071-2100 ergibt sich gegenüber 2021-2050 sowie dem Referenzzeitraum 1971-2000 eine deutliche Verschärfung der Situation. Noch stärkeren absoluten Änderungen in den Alpen, im Schwarzwald und im Ostbayerischen Kristallin stehen nur sehr geringe Abnahmen, bei bereits im Ist-Zustand geringen Absolutbeträgen, in den übrigen Bereichen gegenüber. Die zu erwartenden relativen Änderungen liegen wiederum recht einheitlich bei etwa 80 % (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang). Lediglich die Alpen weichen auf Grund der Temperaturzonierung innerhalb des Naturraums geringfügig davon ab (Abb. 5.43). Der inner-jährliche Verlauf zeigt erwartungsgemäß in den schneereichen Monaten Dezember bis März die deutlichsten Änderungen (Abb. 5.44).

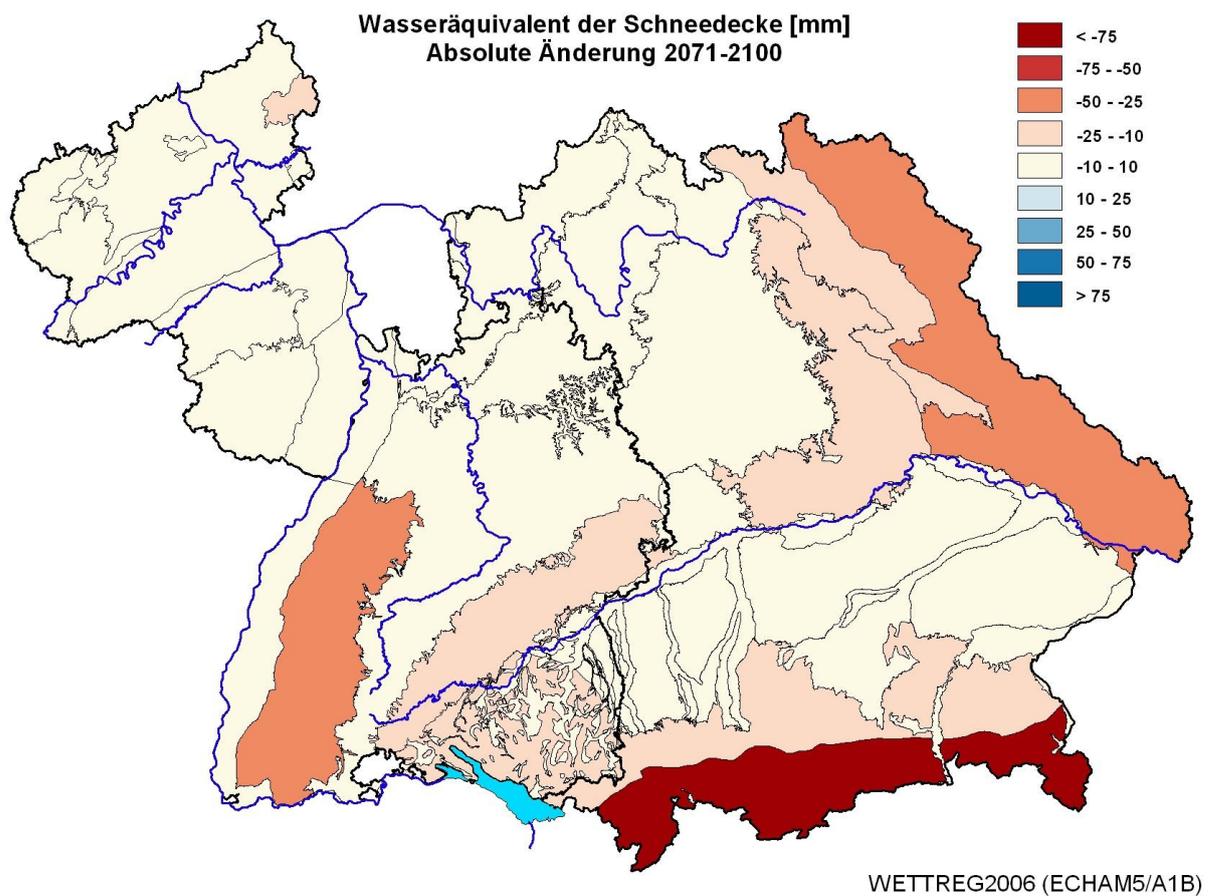


Abb. 5.43: Mittlere Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Monaten Dezember - März in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm.

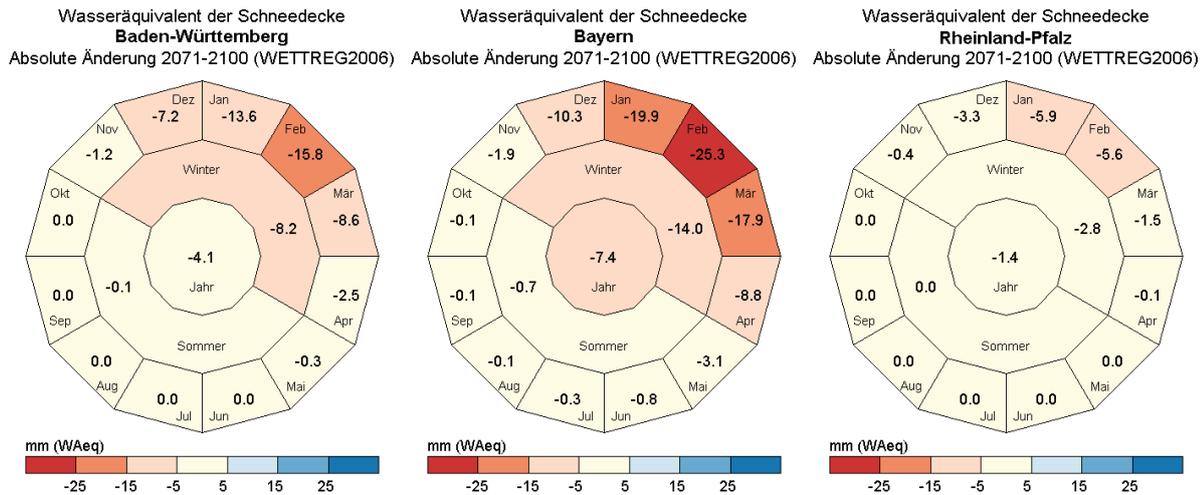


Abb. 5.44: Mittlere innerjährliche Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

5.10 Ergebnisse auf Basis von WETTREG2003

Auf der Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2) liegen Ergebnisse von Szenariosimulationen lediglich für die beiden Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg sowie für den Zeitraum 2021-2050 vor. Auch wenn es zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen den beiden regionalen Klimaszenarien WETTREG2003 und WETTREG2006 gibt, sollen im Sinne einer „Bandbreitenbetrachtung“ nachfolgend wesentliche Ergebnisse beispielhaft für die verschiedenen Auswertegrößen dargestellt werden. Eine vergleichende Interpretation und Bewertung dieser Abweichungen ist hingegen nicht Thema dieses KLIWA-Heftes. Vertiefte Informationen zu den verschiedenen Szenarien kann den einschlägigen Veröffentlichungen (z.B. KLIWA, 2009) entnommen werden. Eine vollständige Übersicht aller im Rahmen von KLIWA durchgeführten Auswertungen gemäß Tab. 5.1 ist Bestandteil des digitalen Anhangs (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang).

Lufttemperatur

Im Mittel ergeben sich gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000 Temperaturzunahmen von ca. 1.8 °C in allen Naturräumen und Bundesländern (Abb. 5.45). Dabei erhöhen sich die Temperaturen der Wintermonate Dezember-Februar zum Teil um mehr als 3 °C, während die Monate September-November die geringsten Zunahmen mit Werten < 1 °C aufweisen. Alle übrigen Monate (mit Ausnahme des Juni) zeichnen sich durch eine Temperaturzunahme von etwa 1-2 °C auf. Im Vergleich zu den entsprechenden Werten auf Basis von WETTREG2006 bedeutet dies ein um 1 °C höheres Temperaturniveau und damit sehr viel deutlicheres Klimasignal bereits in der nahen Zukunft. Die Größenordnung ähnelt damit bereits den für die ferne Zukunft dargestellten Verhältnissen.

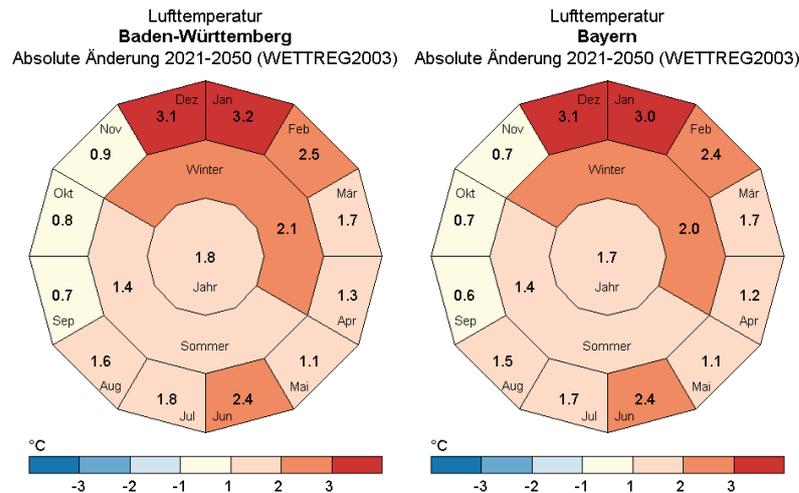


Abb. 5.45: Mittlere innerjährliche Änderung der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in °C.

Niederschlag

Die zukünftigen Niederschlagsverhältnisse auf der Basis von WETTREG2003 zeigen im Jahresmittel Zunahmen in allen Teilen des Untersuchungsraumes. Während die stärksten Änderungen im Westen (Schwarzwald, Spessart) simuliert wurden, weist der Alpenrand die geringsten Unterschiede zum Referenzzeitraum auf (Abb. 5.46). Abnahmen des Jahresmittels werden in keinem der untersuchten Naturräume beobachtet. Im Vergleich zu den WETTREG2006-Szenarien bedeutet dies ein deutlich anderes räumliches Bild. Auch wenn im Jahresgang zumindest ähnliche Tendenzen hinsichtlich Zunahmen im Winterhalbjahr und Abnahmen im Sommer beobachtet werden, steht in der Summe bei WETTREG2003 doch viel mehr Niederschlag zur Verfügung als in der Zeitspanne 1971-2000 bzw. im Vergleichszeitraum von WETTREG2006. Das bedeutet, dass die Zunahmen im Winterhalbjahr die Abnahmen im Sommerhalbjahr übersteigen, während dies bei WETTREG2006 nicht der Fall ist (Abb. 5.47). Die absoluten Zunahmen (Jahreswerte) bewegen sich mit Werten von 44 mm/a (Bayern) und 90 mm/a (Baden-Württemberg) in einer Größenordnung, die sich entscheidend auf alle weiteren Bilanzgrößen auswirken. Prozentual ist dies gleichbedeutend mit Änderungen von z.T. mehr als 10 % an zusätzlichem Niederschlag in einzelnen Naturräumen (vgl. Ergebnisse im digitalen Anhang).

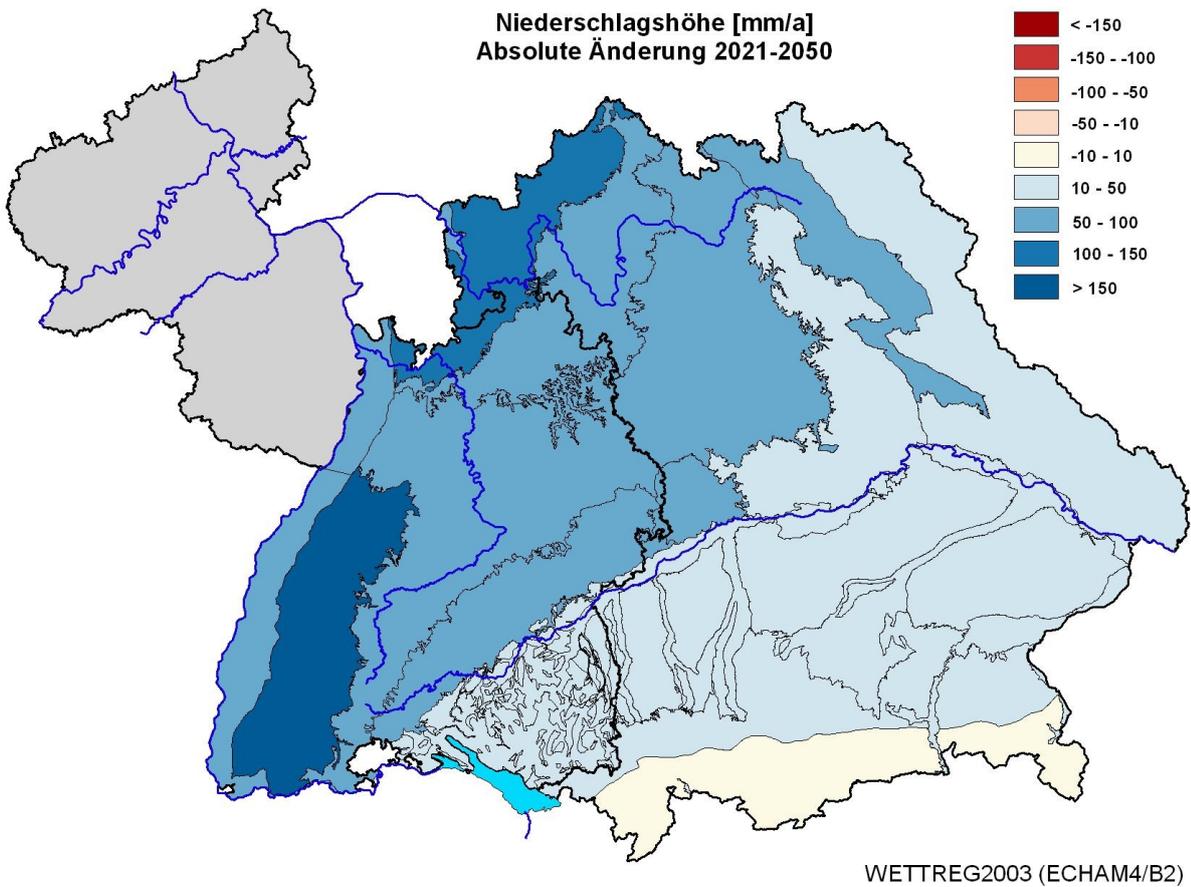


Abb. 5.46: Mittlere Änderung der Niederschlagshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.

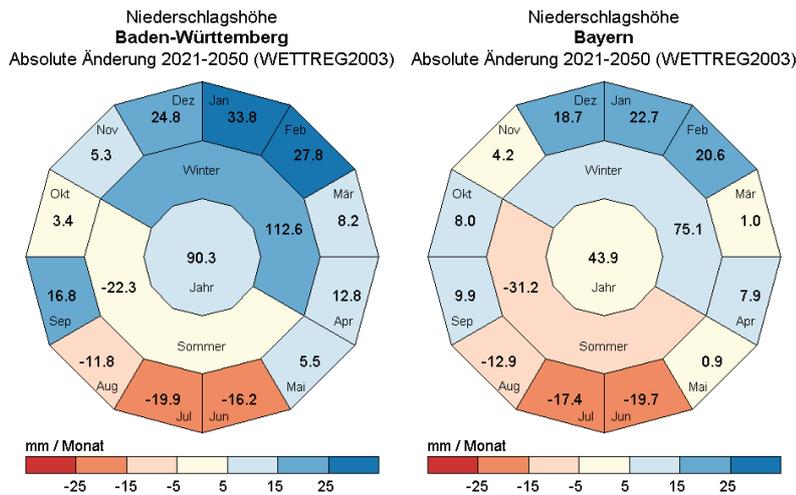


Abb. 5.47: Mittlere innerjährliche Änderung der Niederschlagshöhe in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Tatsächliche Verdunstung

Die auf WETTREG2003 basierende Verdunstung wird unmittelbar durch die flächendeckend höheren Niederschläge sowie die höheren Temperaturen beeinflusst. Im Kartenbild zeigt sich dies durch unterschiedlich hohe Zunahmen in allen Bereichen der beiden Bundesländer (Abb. 5.48). Die deutlichsten positiven Abweichungen mit Werten von 50 bis 70 mm/a treten vor allem in den Alpen und im Alpenvorland auf, wo klimatisch bedingt sowieso schon eine sehr gute Wasserverfügbarkeit gegeben ist. Betrachtet man den innerjährlichen Verlauf, so ergeben sich für neun von zwölf Monaten Zunahmen der Verdunstung, während lediglich die Sommermonate als Folge geringerer Niederschläge durch Abnahmen gekennzeichnet sind (Abb. 5.49). Gegenüber WETTREG2006 liegt trotz unterschiedlicher Einzelmonate zumindest eine ähnliche Tendenz für den mittleren Jahresgang vor. Im Vergleich zur fernen Zukunft auf Basis von WETTREG2006 (ca. 15 bis 20 mm/a bezogen auf Bundesländer) bedeutet dies für WETTREG2003 und die Zeitspanne 2021-2050 sogar ein noch sehr viel stärker ausgeprägtes Klimasignal (ca. 30 mm/a bezogen auf Bundesländer). Auf diese Weise kann die ausgeprägte Niederschlagszunahme durch eine vor allem im Winterhalbjahr erhöhte Verdunstung zumindest teilweise kompensiert werden.

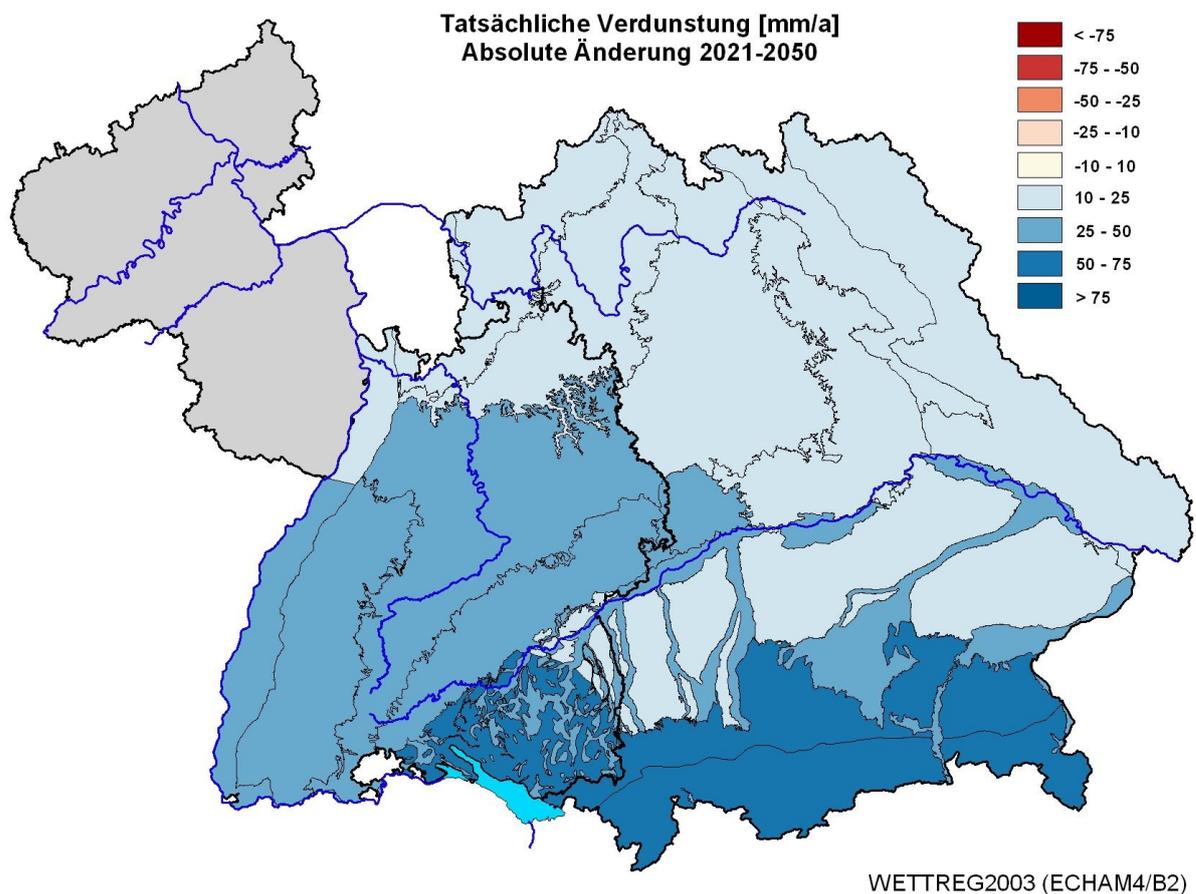


Abb. 5.48: Mittlere Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.

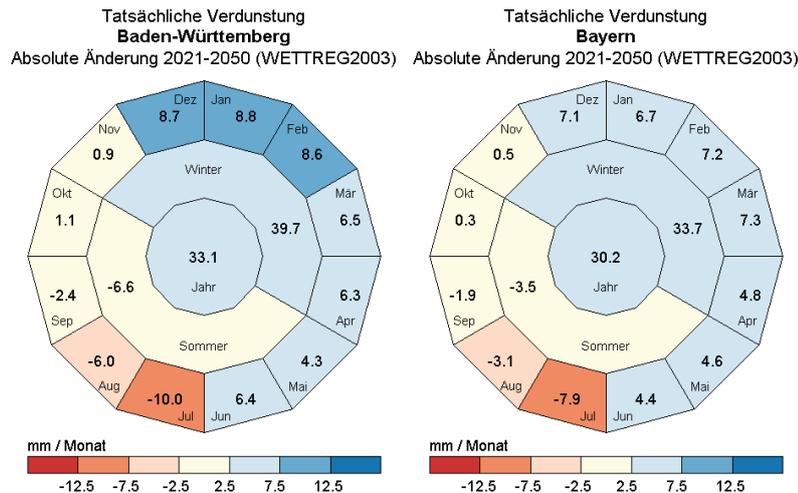


Abb. 5.49: Mittlere innerjährliche Änderung der tatsächlichen Verdunstung in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate

Die Entwicklung der Gesamtabflusshöhe wird als Bilanzgröße entscheidend von den Änderungssignalen bei Niederschlag und Verdunstung beeinflusst. Da die Niederschlagszunahme auf Basis von WETTREG2003 nur teilweise durch eine ebenfalls erhöhte Verdunstung ausgeglichen werden kann, ergeben sich auch für die Gesamtabflusshöhe 2021-2050 in den meisten Bereichen höhere Werte als im Zeitraum 1971-2000. So ist Baden-Württemberg durch eine Zunahme von mehr als 50 mm/a und Bayern durch eine Zunahme von etwa 15 mm/a gekennzeichnet. Dabei stehen in beiden Fällen gestiegenen Werten im Winterhalbjahr spürbare Abnahmen während des Sommers gegenüber (Abb. 5.50). Auch regional sind nicht überall erhöhte Werte festzustellen. Während Baden-Württemberg bis auf den Südosten durch hohe Zunahmen gekennzeichnet ist, zeigt Bayern eine ausgeprägtere räumliche Differenzierung. Dabei fallen insbesondere der Alpenrand mit bis zu 70 mm/a geringeren Gesamtabflusshöhen sowie der Spessart mit Zunahmen von mehr als 100 mm/a auf (Abb. 5.51). Die für WETTREG2003 beschriebenen Ergebnisse weisen damit quantitativ in eine etwas andere Richtung als WETTREG2006, das für die nahe Zukunft zumeist Abnahmen der Gesamtabflusshöhe erkennen lässt (vgl. Kap. 5.5.2). Nichtsdestotrotz findet sich die Tendenz einer innerjährlichen Umverteilung in beiden Regionalszenarien wieder. In welcher Weise sich ggf. geänderte Niederschlagsintensitäten auf einen erhöhten Oberflächenabfluss und damit auch auf die Sickerwasserrate auswirken, bedarf noch weitergehender Untersuchungen.

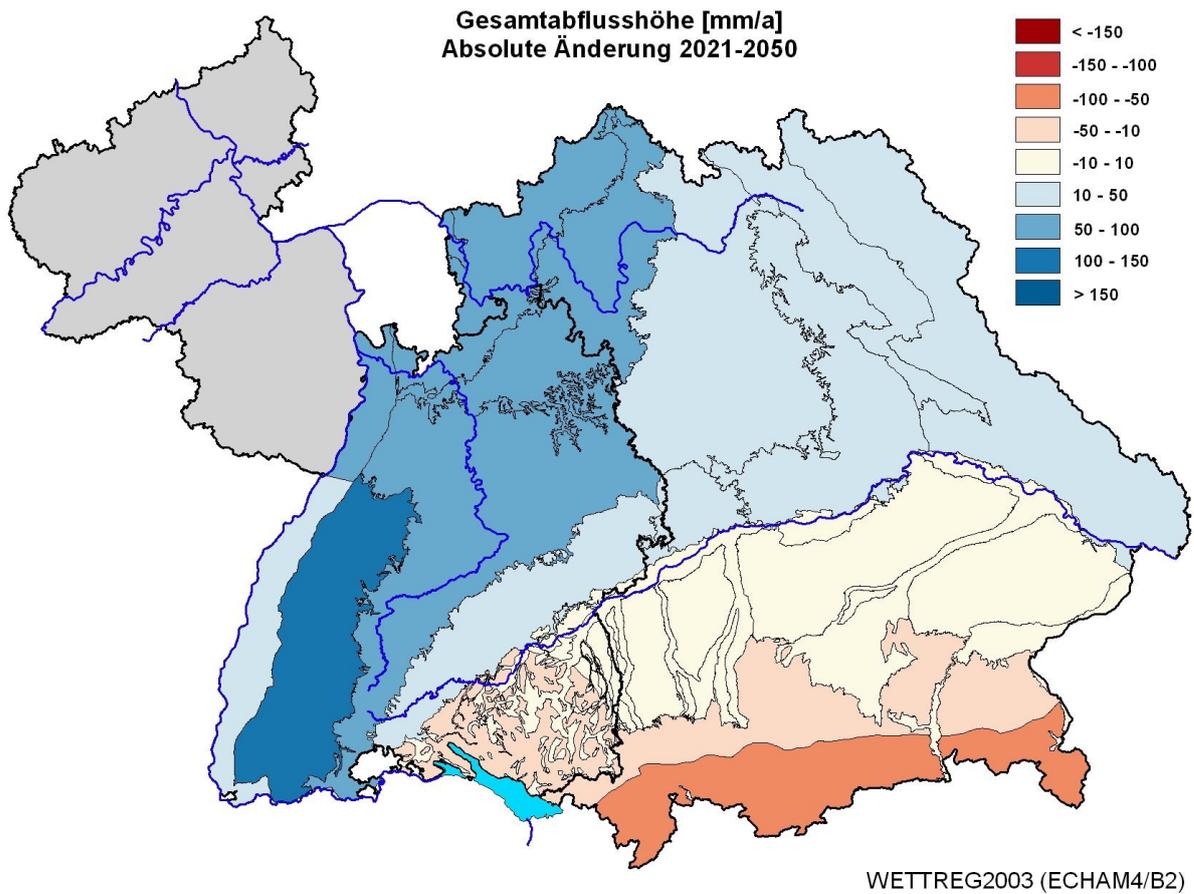


Abb. 5.50: Mittlere Änderung der Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.

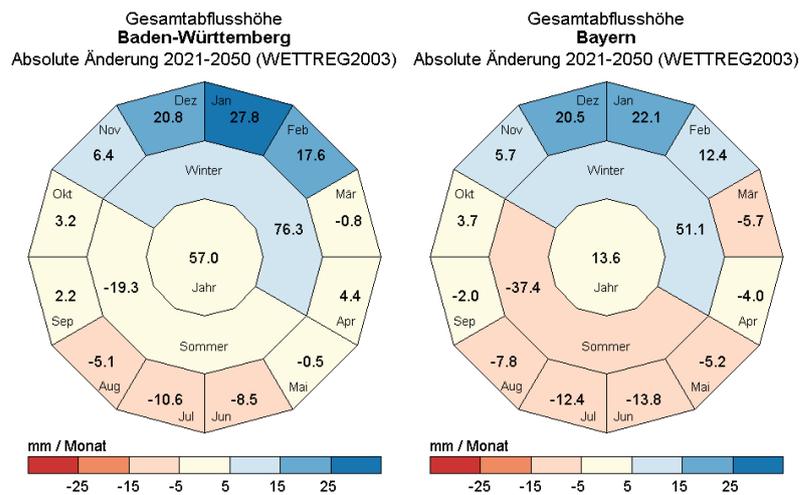


Abb. 5.51: Mittlere innerjährliche Änderung der Gesamtabflusshöhe in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.



Grundwasserneubildung

Die auf Basis von WETTREG2003 für die Gesamtabflusshöhe beschriebenen Zunahmen wirken sich auf die Grundwasserneubildung tendenziell in ähnlicher Weise aus. Das bedeutet leichte Abnahmen in Höhe von max. 20 bis 30 mm/a am Alpenrand, denen wiederum deutlich erhöhte Werte in den westlich gelegenen Naturräumen Schwarzwald, Odenwald und Spessart gegenüberstehen (30 bis 60 mm/a). Die übrigen Naturräume zeigen geringere prozentuale Änderungen (Abb. 5.52). Im Vergleich zum Szenario WETTREG2006 ergibt sich damit insbesondere für den Westteil von Baden-Württemberg ein viel stärkeres Änderungssignal. Da als Modellergebnis hier jedoch die Grundwasserneubildung aus Niederschlag im vieljährigen Mittel und nicht die innerjährliche Veränderung des nutzbaren Grundwasserdargebots betrachtet wird, sind positive Auswirkungen auf die öffentliche Trinkwasserversorgung nicht zwingend zu erwarten.

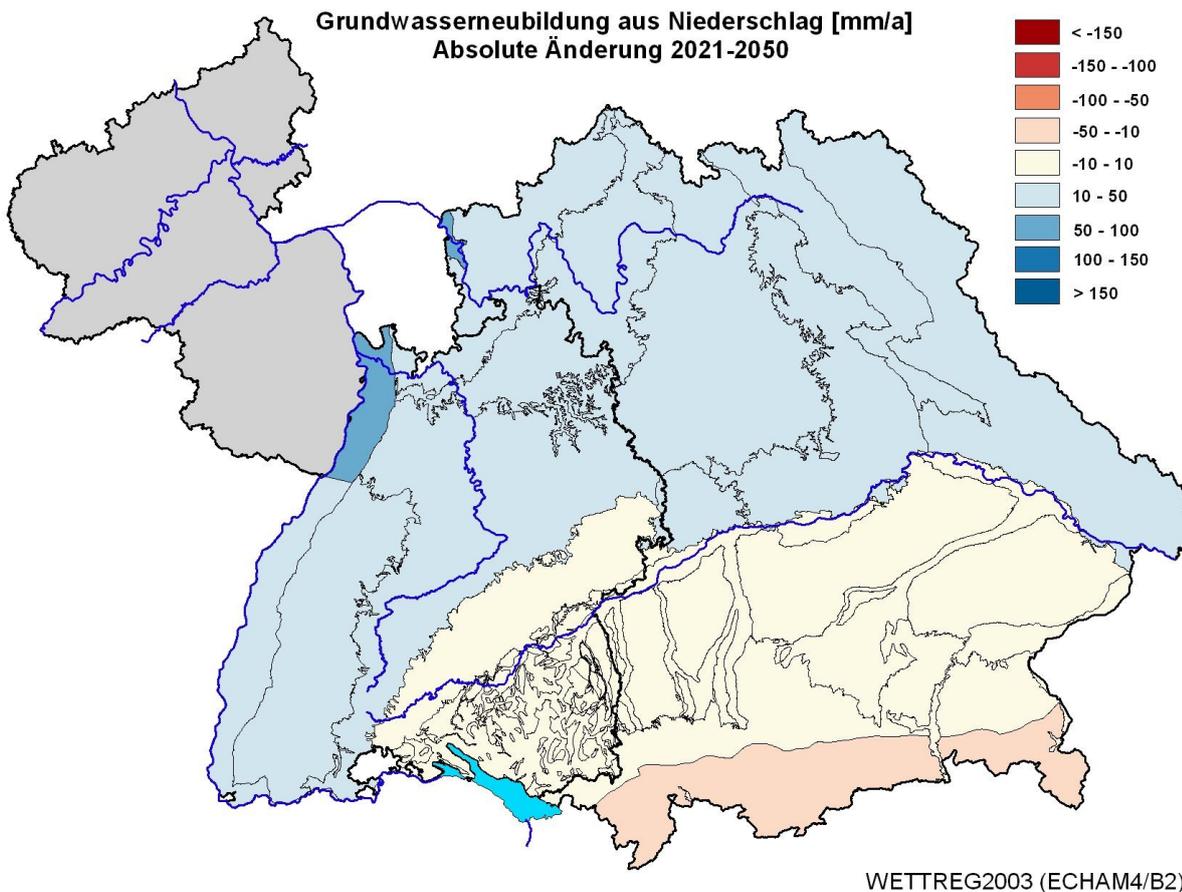


Abb. 5.52: Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.

Trockenheitsindex

Durch die erhöhten Niederschläge in Verbindung mit einer ebenfalls erhöhten Verdunstung ergeben sich auch für den Bodenwasserhaushalt auf Basis von WETTREG2003 andere Verhältnisse als während des Referenzzeitraums. So resultiert aus den wenigen, im Vergleich zu 1971-2000 trockeneren Sommermonaten eine Zunahme des Trockenheitsindex um 14 (Bayern) bzw. 18 Tage (Baden-Württemberg). Dies kann auch durch die bessere Wasserverfügbarkeit im Winterhalbjahr nicht ausgeglichen werden (Abb. 5.54). Bezogen auf die verschiedenen Naturräume fallen wiederum die Nordalpen und die daran angrenzenden Bereiche mit nur marginalen Änderungen auf. Demgegenüber werden deutliche Zunahmen von bis zu 20 Tagen/Jahr für das Keuperbergland und das Ostbayerische Kristallin simuliert

(Abb. 5.53). Im Vergleich zu WETTREG2006 und dem Zeitraum 2021-2050 sind damit insgesamt ein geringfügig stärkeres Änderungssignal und eine deutlichere räumliche Differenzierung gegeben.

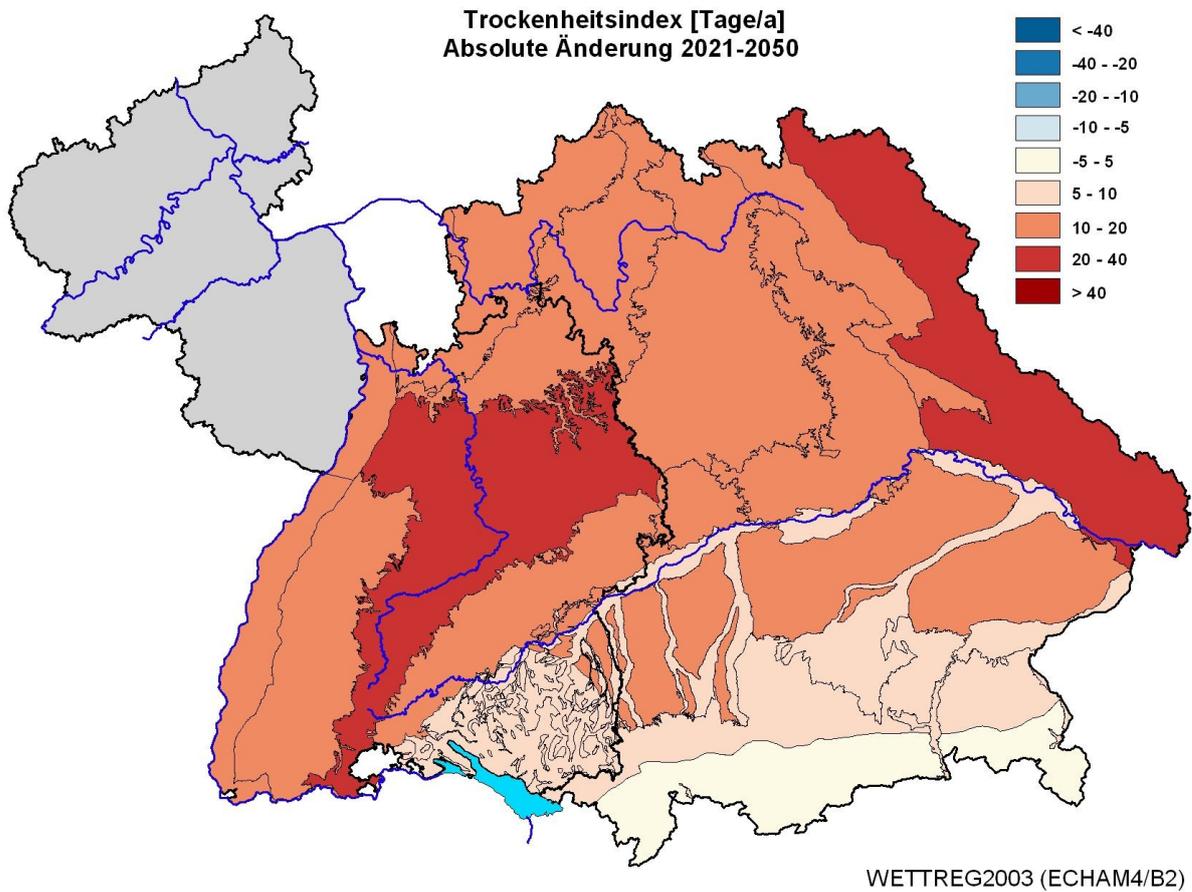


Abb. 5.53: Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in Tagen/Jahr.

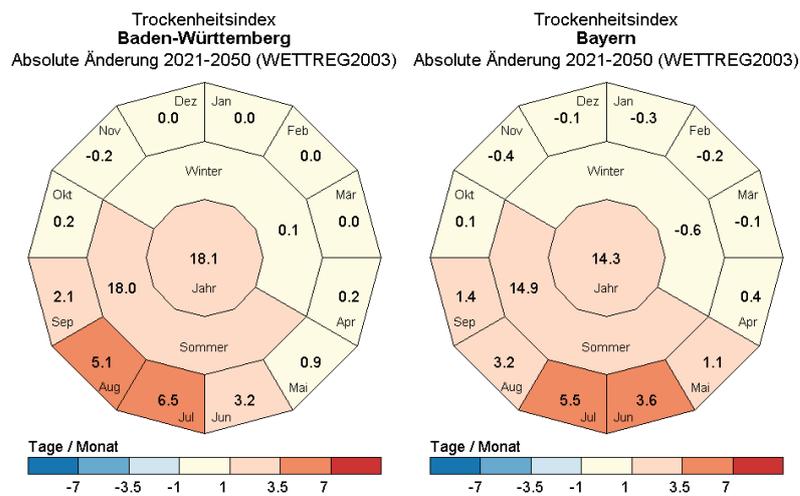


Abb. 5.54: Mittlere innerjährliche Änderung des Trockenheitsindex in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.



Wasseräquivalent der Schneedecke

Beim Wasseräquivalent der Schneedecke ergeben sich erwartungsgemäß die größten Änderungen für die Hochlagen der Mittelgebirge (Schwarzwald, Ostbayerisches Kristallin) und die Alpen (Abb. 5.55). Hier werden in den Monaten Dezember bis März Abnahmen von z.T. mehr als 50 mm festgestellt. Dies entspricht ähnlichen Größenordnungen wie sie auf der Basis von WETTREG2006 sogar erst für die ferne Zukunft (2071-2100) ermittelt wurden (Abb. 5.56). Auch das Kartenbild zeigt weitreichende Übereinstimmungen zwischen den beiden regionalen Klimaszenarien und Zeitspannen. Ursache dafür ist letztlich das bei WETTREG2003 bereits in der Zeitspanne 2021-2050 sehr viel stärker ausgeprägte Temperatursignal (vgl. Kap. 5.2).

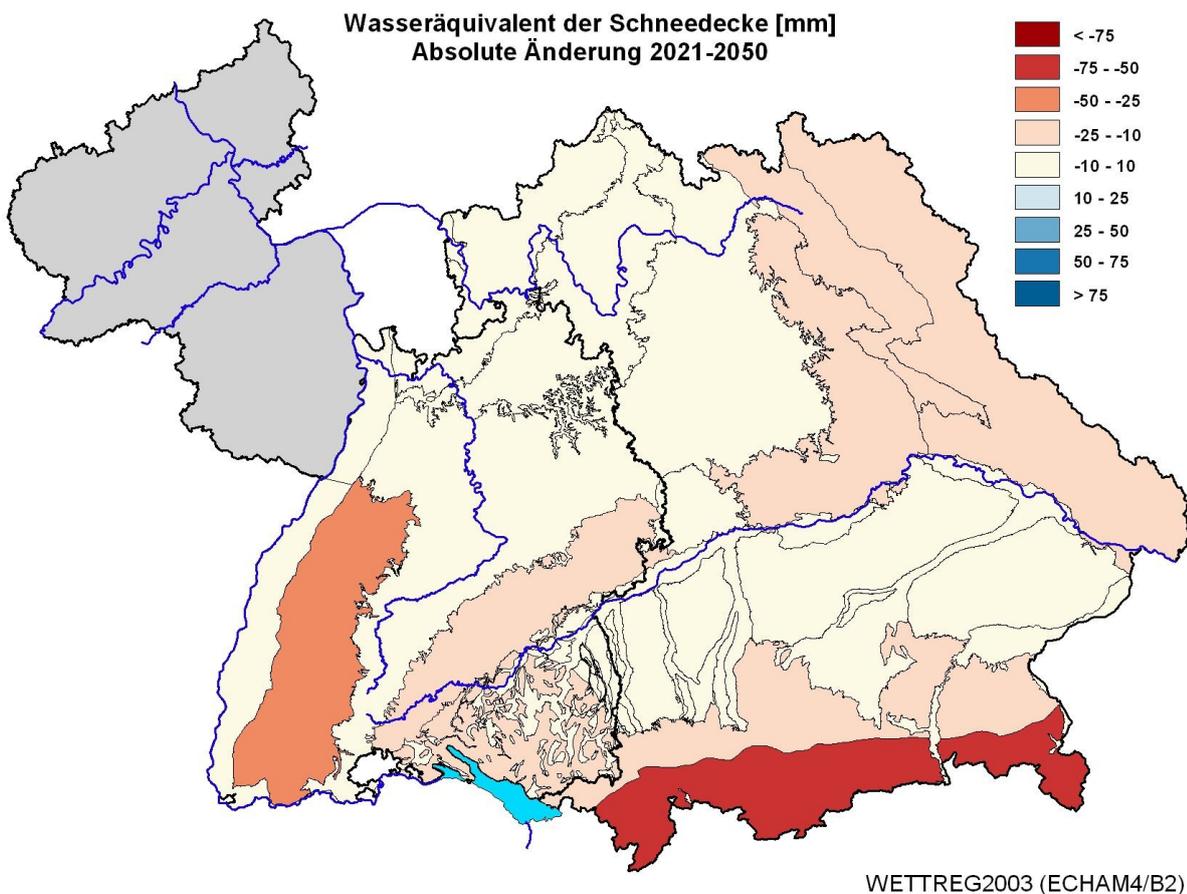


Abb. 5.55: Mittlere Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Monaten Dezember - März in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm.

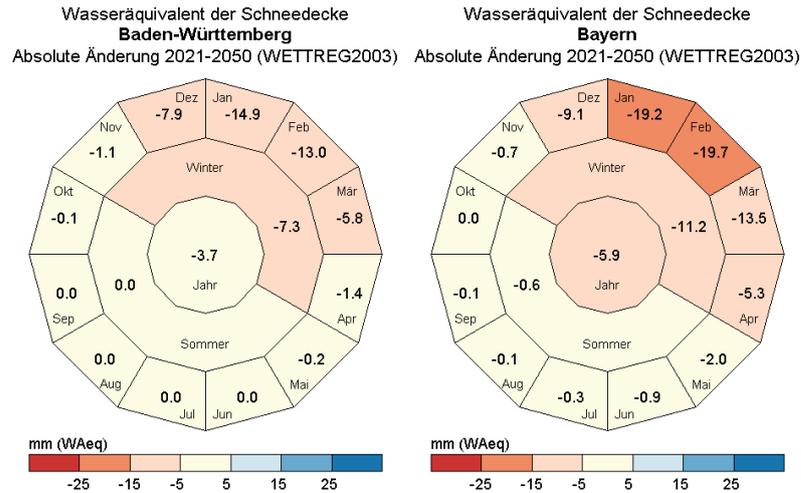


Abb. 5.56: Mittlere innerjährliche Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.



6 Diskussion der Ergebnisse – Handlungsempfehlungen für die Wasserwirtschaft

Die nachfolgende Diskussion der Szenarien, Bewertung der Änderung von Wasserbilanzgrößen und die Diskussion von Konsequenzen für die Wasserwirtschaft beziehen sich ausschließlich auf die Ergebnisse für die nahe Zukunft 2021-2050 (WETTREG2006 sowie WETTREG2003 für Baden-Württemberg und Bayern). Erste Überlegungen zu Handlungsempfehlungen für die Wasserwirtschaft werden angestellt.

Diskussion der verwendeten Szenariendatensätze

Grundsätzlich kommt für Szenariosimulationen, bedingt durch vielfältige Kombinationsmöglichkeiten von Emissionsszenarien, Global- und Regionalmodellen eine sehr große Anzahl regionaler Klimaprojektionen mit unterschiedlichen Ergebnissen in Frage. Während die erwartete Erhöhung der Lufttemperatur in der Mehrzahl der möglichen Modellkombinationen einen sehr ähnlichen und über größere Regionen hinweg einheitlichen Anstieg aufweist, ergeben sich insbesondere beim Niederschlag, deutlichere Unterschiede. Dies betrifft sowohl die Niederschlagshöhe, als auch dessen räumliche und zeitliche Verteilung. Dabei kommen neben der Charakteristik von Globalmodell und Emissionsszenario auch spezifische Besonderheiten der zum Downscaling eingesetzten Regionalmodelle zum Ausdruck. Dies hat zur Folge, dass die gängigen Klimaprojektionen für die künftige Entwicklung keine einheitliche Aussage liefern, sondern lediglich eine Bandbreite möglicher Entwicklungen vorgeben.

Ausgehend von der jeweils gleichen Kombination aus Emissionsszenario und Globalmodell im Vergleich der Regionalmodelle CLM, REMO, WETTREG und STAR für das Land Sachsen, wurde das Modell WETTREG als am ehesten überzeugend eingeschätzt (MICHAEL 2009). Es zeichnet regionale Besonderheiten der räumlichen Niederschlagsverteilung am besten nach, wenngleich es gegenüber dem Globalmodell einen zu geringen Temperaturanstieg unterstellt. Dem gegenüber müssen die generierten Niederschlagsverteilungen von CLM und REMO zwingend einer Bias-Korrektur unterzogen werden. Plausible, bias-korrigierte Projektionen lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung jedoch noch nicht vor. Die Ergebnisse der statistischen Modelle (WETTREG, STAR) können zumeist ohne weitere Zwischenschritte regional ausgewertet und als Eingangsdaten für nachgeordnete Modelle verwendet werden.

Im Rahmen der durchgeführten Szenariosimulation zur Auswirkung des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung wurde deshalb die mit WETTREG2006 erzeugte regionale Klimaprojektion verwendet, die vom UBA beauftragt wurde und somit deutschlandweit vorliegt (SPEKAT ET AL. 2007). Der verwendete WETTREG-Szenariendatensatz, stützt sich auf Wetterlageninformationen aus dem aktuellen Globalmodell ECHAM5 mit dem Emissionsszenario A1B. Ergänzend wurde die mit WETTREG2003 erzeugte regionale Klimaprojektion verwendet, die seinerzeit durch KLIWA beauftragt wurde und nur für Baden-Württemberg und Bayern vorliegt. Dieser WETTREG-Szenariendatensatz stützt sich auf Wetterlageninformationen aus dem vorhergehenden Globalmodell ECHAM4 mit dem Emissionsszenario B2.

Bewertung der Wasserbilanzgrößen und ihrer Änderungen

In Kapitel 5 wurden die Ergebnisse bezogen auf Bundesländer sowie Naturräume dargestellt und interpretiert. Zur Übersicht sind in Tabelle 6.1 die Jahres- und Halbjahresmittel der Eingangs-, Wasserbilanz- bzw. Zustandsgrößen für die Zeitspannen 1971-2000 und 2021-2050 nochmals für die drei Bundesländer aufgeführt. Die wesentlichen Erkenntnisse im Hinblick auf mögliche Veränderungen in der nahen Zukunft lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Lufttemperatur ist für den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung aus Niederschlag eine wesentliche Größe. Änderungen der Lufttemperatur beeinflussen die Verdunstung und den im Winterhalbjahr in der Schneedecke gespeicherten Niederschlag. Bezogen auf den 30-jährigen Mittelwert der Periode 1971-2000 werden für WETTREG2006 relativ einheitliche Zunahmen der Lufttemperatur von 0.8 bis 0.9 °C erwartet, wobei die Temperaturerhöhung in den Monaten Dezember bis Februar mit 1.3-1.7 °C am deutlichsten ausfällt. WETTREG2003 ist in Baden-Württemberg und Bayern im 30-jährigen Jahresmittel für die nahe Zukunft um etwa 1°C wärmer als WETTREG2006. Die Temperaturdifferenz ist dabei im Winterhalbjahr ebenfalls größer als im Sommerhalbjahr.
- Beim Niederschlag ergibt sich für die nahe Zukunft gegenüber der Periode 1971-2000 im landesweiten Mittel für Bayern eine um 2 % (-19 mm/a) geringere Jahressumme, in Baden-Württemberg eine minimale Abnahme von 1 % (-8 mm/a), in Rheinland-Pfalz dagegen eine Zunahme von 2.5 % (+20 mm/a). Daraus lässt sich ein leichter Nordwest-Südost-Gradient ableiten. Betrachtet man einzelne Naturräume, so sind beim mittleren jährlichen Niederschlag die Schwäbische und Fränkischen Alb mit 20-25 mm/a sowie die Alpen mit knapp -50 mm/a besonders betroffen. Die Niederschlagsverteilung zeigt für die nahe Zukunft eine innerjährliche Verschiebung vom Sommer- (Abnahme) in das Winterhalbjahr (Zunahme), die wiederum regional unterschiedlich ausgeprägt ist. Während in den Alpen im Winterhalbjahr nur 16 mm mehr Niederschlag fallen, sind in der Südwesteifel und im Schwarzwald etwa 50 mm/a zusätzlich zu verzeichnen. WETTREG2003 liefert im 30-jährigen Jahresmittel für die nahe Zukunft etwa 100 mm mehr Niederschlag als WETTREG2006, wobei der überwiegende Teil der Zunahme auf das Winterhalbjahr entfällt. Unabhängig von absoluten Werten ist der Nordwest-Südost-Gradient sowie die Umverteilung vom Sommer in den Winter sowohl in den mit WETTREG2006 als auch in jenen mit WETTREG2003 regionalisierten Niederschlagsverteilungen erkennbar.
- Die tatsächliche jährliche Verdunstungshöhe nimmt nur geringfügig gegenüber dem Ist-Zustand zu und wirkt in ihrer innerjährlichen Veränderung ausgleichend auf die Abflussbildung, d.h. den etwas höheren Niederschlägen im Winterhalbjahr stehen auf Grund der zukünftig höheren Temperaturen auch etwas höhere Verdunstungswerte gegenüber. In Baden-Württemberg und Bayern wird der höhere Niederschlag im Winterhalbjahr durch die erhöhte Verdunstung nahezu kompensiert, nur in Rheinland-Pfalz bleiben rd. 50 % der höheren Winterniederschläge für den Gesamtabfluss und in der Folge für die Grundwasserneubildung erhalten. Mit WETTREG2003 ergibt sich im 30-jährigen Jahresmittel für die nahe Zukunft eine etwa um 50 mm/a höhere tatsächliche Verdunstung als mit WETTREG2006, wovon mehr als die Hälfte auf das Winterhalbjahr entfällt.
- Bei der Gesamtabflusshöhe ergeben sich im Jahresmittel für die nahe Zukunft für Baden-Württemberg und Bayern Abnahmen in einer Größenordnung von durchschnittlich etwa -20 mm/a. Demgegenüber ist für Rheinland-Pfalz eine leichte Zunahme von +10 mm/a zu verzeichnen. Während im Winterhalbjahr in Baden-Württemberg und Bayern der Gesamtabfluss nahezu gleich bleibt bzw. in Rheinland-Pfalz um +17 mm zunimmt, reduziert sich der Gesamtabfluss im Sommerhalbjahr in Baden-Württemberg und Bayern um -24 mm bzw. -21 mm, in Rheinland-Pfalz um -7 mm. Mit WETTREG2003 wird im 30-jährigen Jahresmittel für die nahe Zukunft eine um etwa +40 mm (Bayern) bzw. +60 mm (Baden-Württemberg) höhere Gesamtabflusshöhe als mit WETTREG2006 projiziert, die vollständig durch das Winterhalbjahr ausgemacht werden.



- In der nahen Zukunft (2021-2050) ist für Rheinland-Pfalz ein leichter Anstieg der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag um +4 % (+4 mm/a), in Baden-Württemberg und Bayern dagegen eine leichte Verringerung um -5 % bis -6 % (-9 mm und -13 mm/a) zu erwarten. In einzelnen Naturräumen wie z. B. der Nordalpen, der Fränkischen Alb, dem Moränenland, der fluvioglazialen Schotter, sinkt die Grundwasserneubildung mit rd. 8 % (-14 mm/a bis -30 mm/a) deutlich. In den Naturräumen Rheinisches Schiefergebirge, Nordwesteifel, Nordpfälzer Bergland und Pfälzerwald steigt die Grundwasserneubildung dagegen stärker als im Landesmittel, nämlich um rund 5 % (+5 bis +15 mm/a). Mit dem Szenario WETTREG2003 wird im 30-jährigen Jahresmittel für die nahe Zukunft eine etwa um 30 mm (Baden-Württemberg) bzw. 20 mm (Bayern) höhere Grundwasserneubildung als mit WETTREG2006 erwartet, die, der Tendenz bei der Gesamtabflusshöhe folgend, vollständig auf das Winterhalbjahr entfallen dürfte.
- Der Trockenheitsindex beschreibt die Anzahl der Tage, an denen die für die Vegetation kritische Größe von 30 % der nutzbaren Feldkapazität unterschritten wird. In der Vergangenheit (1971-2000) wurde dieser Schwellenwert in Rheinland-Pfalz an etwa 60 Tagen im Jahr unterschritten, während in Baden-Württemberg und Bayern lediglich 30 bis 40 Tage im Jahr gezählt werden. Für die Zeitspanne 2021-2050 ist in allen drei Bundesländern im Mittel mit einer jährlichen Zunahme von etwa 11 bis 14 Tagen insbesondere in den Sommermonaten zu rechnen. Die negativen Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt während der Vegetationsperiode können in Gebieten, in denen schon heute beregnet wird (wie z. B. in der Vorderpfalz), zu einem Anstieg des Beregnungsbedarfs um rd. 20 % führen. Auf der Basis von WETTREG2003 nimmt der Trockenheitsindex trotz eines deutlich höheren Niederschlagsdargebots im 30-jährigen Jahresmittel in Bayern und Baden-Württemberg immer noch um etwa 7 Tage/Jahr zu. Dies ist vor allem auf die temperaturbedingt höhere tatsächliche Verdunstung bei nur geringfügig gestiegenen Niederschlägen im Sommer zurück zu führen.
- In den Alpen treten im Winterhalbjahr mittlere Wasseräquivalente in der Schneedecke von nahezu 100 mm auf, während im Schwarzwald und Ostbayerischen Kristallin (vor allem Bayerischer Wald) immerhin noch knapp 30 mm beobachtet werden. Alle weiteren Mittelgebirge weisen im Vergleich dazu lediglich Werte von etwa 10 mm auf. Die Zunahme der Lufttemperatur bewirkt daher besonders in den Alpen, dem Voralpenland sowie der Schwäbischen und Fränkischen Alb eine Abnahme der Wasseräquivalente der Schneedecke in einer Größenordnung von bis zu 40 mm. Diese Veränderungen der Schneerücklage tragen in den entsprechenden Naturräumen auch zu den dort erwarteten Änderungen der Grundwasserneubildung aus Niederschlag bei.

Tab.6.1: Eingangs-, Wasserbilanz- bzw. Zustandsgrößen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung für Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (1971-2000 zu 2021- 2050).

Land	Eingangs- bzw. Wasser- bilanz-größe aus GWN-BW	Einheit	Ø	Ø	Vergleich	Ø	Vergleich
			1971 – 2000 WETTREG06 ECHAM5-A1B	2021 – 2050 WETTREG06 ECHAM5-A1B	2021 – 2050 zu 1971 – 2000 WETTREG06	2021 – 2050 WETTREG03 ECHAM4-B2	2021 – 2050 WETTREG03 zu WETTREG06
BY	T _{Jahr}	° C	7.7	8.4	0.8	9.5	1.0
BW	T _{Jahr}	° C	8.3	9.2	0.9	10.2	1.0
RP	T _{Jahr}	° C	8.9	9.8	0.9		
BY	T _{Winter}	° C	1.7	2.6	0.9	3.9	1.3
BW	T _{Winter}	° C	2.6	3.6	0.9	4.8	1.3
RP	T _{Winter}	° C	3.4	4.4	1.0		
BY	T _{Sommer}	° C	13.6	14.3	0.7	15.1	0.8
BW	T _{Sommer}	° C	13.9	14.7	0.8	15.5	0.8
RP	T _{Sommer}	° C	14.3	15.1	0.8		
BY	N _{Jahr}	mm	923	904	-19	997	93
BW	N _{Jahr}	mm	966	958	-8	1067	109
RP	N _{Jahr}	mm	765	784	20		
BY	N _{Winter}	mm	397	412	15	478	66
BW	N _{Winter}	mm	447	471	23	556	86
RP	N _{Winter}	mm	372	407	35		
BY	N _{Sommer}	mm	526	492	-34	519	27
BW	N _{Sommer}	mm	519	487	-32	511	23
RP	N _{Sommer}	mm	393	377	-16		
BY	V _{Jahr}	mm	502	508	5	557	50
BW	V _{Jahr}	mm	542	551	9	599	48
RP	V _{Jahr}	mm	492	502	9		
BY	V _{Winter}	mm	127	139	12	168	29
BW	V _{Winter}	mm	143	158	16	190	32
RP	V _{Winter}	mm	149	164	15		
BY	V _{Sommer}	mm	375	369	-7	389	20
BW	V _{Sommer}	mm	399	393	-6	408	16
RP	V _{Sommer}	mm	344	338	-5		
BY	A _{Jahr}	mm	420	397	-23	440	44
BW	A _{Jahr}	mm	424	407	-17	469	62
RP	A _{Jahr}	mm	272	282	10		
BY	A _{Winter}	mm	261	262	1	313	51
BW	A _{Winter}	mm	299	303	4	368	65
RP	A _{Winter}	mm	215	233	17		
BY	A _{Sommer}	mm	159	135	-24	128	-7
BW	A _{Sommer}	mm	126	104	-21	101	-3
RP	A _{Sommer}	mm	57	50	-7		
BY	GwN _{Jahr}	mm	214	201	-13	223	22
BW	GwN _{Jahr}	mm	201	191	-9	222	31
RP	GwN _{Jahr}	mm	106	110	4		
BY	TI* _{Jahr}	Tage	37	48	11	54	7
BW	TI* _{Jahr}	Tage	30	43	13	50	7
RP	TI* _{Jahr}	Tage	61	75	14		



Handlungsempfehlungen und Anpassungsmaßnahmen

An Hand der vorliegenden Ergebnisse auf Basis von WETTREG2006 wird deutlich, dass in der nahen Zukunft mit keinen gravierenden und vor allem keinen sprunghaften Änderungen der Wasserbilanzkomponenten zu rechnen ist. Insbesondere die durchschnittliche jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag bleibt in der nahen Zukunft 2021-2050 in einer ähnlichen Größenordnung wie bereits in der Periode 1971-2000. Es zeichnet sich jedoch eine innerjährliche Umverteilung ab, die letztendlich dazu führt, dass im Sommer noch weniger Grundwasser aus Niederschlag neu gebildet wird. Davon betroffen sind insbesondere wenig ergiebige Grundwasservorkommen in den Mittelgebirgsregionen, die meist über Quellen entwässert werden. Ergiebige Aquifere, z.B. im Lockergesteinsbereich, sind demgegenüber eher in der Lage, Trockenphasen über ihren größeren Speicherinhalt auszugleichen. Da während sommerlicher Trockenperioden der Abfluss in Gewässern in erheblichem Maße aus dem Grundwasser gespeist wird, ist durch den Rückgang der Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr auch von Auswirkungen auf die Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in den Oberflächengewässern auszugehen.

Die Wasserwirtschaft musste bereits in der Vergangenheit auf Einflüsse aus Nass- und Trockenperioden reagieren und wird dies auch in Zukunft tun müssen. Da die Klimaänderung einen sehr langsamen Prozess darstellt, sind für das zudem träge reagierende System Grundwasser keine plötzlichen Strategiewechsel geboten. Andererseits sind erforderliche Maßnahmen gerade deshalb weit vorausschauend zu ergreifen, um negativen Entwicklungen rechtzeitig entgegen wirken zu können.

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen können Handlungsempfehlungen gegeben und Maßnahmen abgeleitet werden, welche bereits in der Vergangenheit und in der Gegenwart als Zielvorgaben für eine ordnungsgemäße und nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung definiert wurden und somit als grundlegend (No-regret-Maßnahmen) auch für die Zukunft eingestuft werden können:

- Erhalt der Versorgungssicherheit durch Optimierung und ggf. einen weiteren Ausbau der wasserwirtschaftlichen Anlagen zur Trinkwasserverteilung, der Wasserversorgungstechnik und der Behälterkapazitäten;
- Fortschreibung oder Neuaufstellung von wasserwirtschaftlichen Planungsgrundlagen wie z.B. hydrologische Gutachten zur Wasserbilanz, regionale Bewirtschaftungspläne, Berechnungspläne, Wasserversorgungspläne, Ermittlung des Wasserbedarfs für die öffentliche Wasserversorgung, Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe;
- Sichern, Anpassen und Ausweisen von Wasserschutz-, Wasservorrang- und Wasservorbehaltsgebieten;
- Anpassung/Ergänzung der Bauleitplanung z. B. durch Ausweisung von Gebieten mit dem Risiko der Vernässung, Versickerung von Regenwasser zur Grundwasseranreicherung, Anpassungsstrategien zur nachhaltigen Siedlungsentwässerung;
- Dezentrale Rückhaltung des Oberflächenwassers in der Fläche zur Grundwasseranreicherung;
- Optimieren der Grundwassermessnetze und des Monitorings hinsichtlich möglicher klimabedingter Änderungen bei Grundwassermenge und -beschaffenheit.

Über die vorgestellten rein mengenmäßigen überregionalen Betrachtungen hinaus sind regionale bzw. kleinräumige Untersuchungen erforderlich, die sowohl Veränderungen der Grundwassermenge wie auch der Grundwasserbeschaffenheit zum Gegenstand haben. Diese Themen werden derzeit in einer Reihe von Fallstudien behandelt (Kap. 7). Die vorstehende Liste der Handlungsempfehlungen und Maßnahmen kann damit in Schwerpunktbereichen fortgeschrieben und ggf. weiter konkretisiert werden.

7 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse zur zukünftigen Entwicklung des Bodenwasserhaushalts auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) zeigen für die Zeitspanne 2021-2050 z. T. deutliche Veränderungen, die als regionale Folge des Klimawandels mit seinen Auswirkungen auf Temperatur- und Niederschlag zu interpretieren sind. Sie deuten in einem überregionalen Kontext auf mögliche Änderungstendenzen hin und erlauben damit eine erste großräumige Einschätzung möglicher Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt und ggf. die nachgeschalteten grundwasserbezogenen Nutzungen, wie z. B. die öffentliche Wasserversorgung. Die mögliche künftige Entwicklung relevanter Größen des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung ist dabei immer auch in Relation zu Entwicklungstendenzen in der Vergangenheit zu sehen. Zur Bewertung und besseren Einordnung der bisherigen Szenariosimulationen und zur Beschreibung einer Gesamtentwicklung wird daher auf der Basis von Messdaten ergänzend eine Langzeitsimulation für den Zeitraum 1951-2010 durchgeführt.

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. Im Rahmen von KLIWA werden diese regional relevanten Einzelfragestellungen in Form von Fallstudien bearbeitet. In der Vergangenheit wurde bereits exemplarisch auf die zukünftige Entwicklung von Quellschüttungen (Fallstudie Ilz) und Grundwasserständen (Fallstudie Lechtalaquifer) eingegangen. Darüber hinaus wurden stoffbezogene Themen wie die Mobilisierung von DOC und Nitrat unter geänderten klimatischen Randbedingungen bearbeitet (Fallstudie Fichtelgebirge). Zusätzliche Fallstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die für die Trinkwassergewinnung relevante Grundwassermenge (einschließlich Quellschüttungen) und die Beschaffenheit sind für weitere Schwerpunktbereiche geplant und wesentlicher Bestandteil des Themenbereichs Grundwasser im Kooperationsvorhaben KLIWA. Darüber hinaus soll auch die Fragestellung „Beregnung“ im Rahmen einer Fallstudie bearbeitet werden.

Die aktuellen Emissionsszenarien und anerkannten 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 die gleichzeitige Betrachtung von mehreren Klimaprojektionen angestrebt. Für den Bereich Boden- und Grundwasserhaushalt steht durch die hier vorgestellten länderübergreifenden Simulationen ein einheitlicher methodisch-konzeptioneller Rahmen zur Verfügung, um mit vergleichsweise geringem Aufwand aktuelle Szenariosimulationen durchzuführen und auszuwerten. Diese Ergebnisse werden die bereits vorliegenden Simulationsergebnisse ergänzen und zu einer besseren Einschätzung möglicher Bandbreiten in den drei Bundesländern beitragen.

Neben den oben erwähnten modellgestützten Untersuchungen wird auch die aktuelle Entwicklung auf der Basis von Messdaten ein weiteres wichtiges Thema bleiben. Hier ist insbesondere an eine Fortschreibung und Aktualisierung der in KLIWA-Heft 16 dargestellten Ergebnisse zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen gedacht.



8 Literatur

- ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Bd.17, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.
- BERGSTRÖM, S. (1976): Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI Report RHO 7, Norrköping, 134 pp.
- 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. (2010): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. – KLIWA-Berichte Heft 15: S. 187-201.
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNQr, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. In: Zeitschr. dt. geol. Ges., Sonderheft Hydrogeologie Hydrogeochemie. 89-95.
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte Heft 9, Karlsruhe.
- KLIWA (2009): Kurzbericht Regionale Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierung, <http://www.kliwa.de/index.php?pos=ergebnisse/berichte/kurzberichte/>.
- KLIWA (2011): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. <http://www.kliwa.de/index.php?pos=ergebnisse/berichte/kurzberichte/>.
- LFU (2009): Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500 000 – Blatt 4: Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971-2000), Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof.
- LUBW (2011): Grundwasserüberwachungsprogramm – Ergebnisse der Beprobung 2010. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- MENZEL, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Zürcher Geographische Schriften 67, ETH Zürich.
- MENZEL, L. (1999): Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) Report 54, Potsdam.
- MICHAEL, A. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben Nr. 070732, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- 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.
- NEUMANN, J., GUDERA, T. (2007): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. – KLIWA-Berichte Heft 10: 163-173.
- NEUMANN, J. (2010): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. – KLIWA-Berichte Heft 15: S. 203-210.
- PÖHLER H., CHMIELEWSKI, F.-M., JASPER, K., HENNIGES, Y., SCHERZER, J. (2007): KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. Weiterentwicklung von WaSiM-ETH: Implikation dynamischer Vegetationszeiten und Durchführung von Testsimulationen für sächsische Klimaregionen. Abschlussbericht an das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Geologie. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben Nr. 13-8802.3529/39-2, UDATA Umweltschutz und Datenanalyse, Neustadt/Weinstraße.



- PÖHLER (2008): Dynamisierung der Vegetationsperiode im Wasserhaushaltsmodell LARSIM. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. UDATA Umweltschutz und Datenanalyse, Neustadt/Weinstraße.
- 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.
- SCHULLA, J., JASPER, K. (1998): Modelbeschreibung WaSiM-ETH. - Technischer Bericht, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich.
- 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.

Verwendete Abkürzungen

A _U	Unterirdischer Abfluss
A	Gesamtabfluss
BFI	Baseflow-Index
BÜK200	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200 000
CORINE	Coordinated Information on the European Environment
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)
ECHAM4	Modellversion 4 (seit 1996)
ECHAM5	Modellversion 5 (seit 2004)
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
GWN-BW	Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushalts und Ableitung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag
GwN	Grundwasserneubildung aus Niederschlag
HBV-Modell	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
KLIWA	Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft
KLIWEP	Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe
Persephone	Parametrisierungsschema zur Abbildung einer dynamisierten Vegetationsentwicklung {Bezeichnung angelehnt an die gleichnamige Figur aus der griechischen Mythologie: Fruchtbarkeitsgöttin, Tochter des Zeus und seiner Schwester Demeter. Lebt einen Teil des Jahres in der Unterwelt (Winter) und den anderen Teil bei ihrer Mutter (Sommer)}
REGNIE	Regionalisierung von Niederschlagshöhen, Methode DWD
TRAIN	Transpiration-Interzeption
USGS	United States Geological Survey, wissenschaftliche Behörde im Geschäftsbereich des Innenministeriums der Vereinigten Staaten
WaSiM-ETH	Wasserhaushalts-Simulations-Modell, entwickelt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
WETTREG	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode
WETTREG2003	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode Entwicklungsstand 2003
WETTREG2006	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode Entwicklungsstand 2006



Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1:	Modularer Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und schematische Darstellung der benötigten Eingangsdaten.....	11
Abb. 2.2:	Grundkonzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.....	12
Abb. 2.3:	Schematische Darstellung des Grundwasserhaushalts unter Berücksichtigung der wichtigsten modellrelevanten Bilanzgrößen.....	17
Abb. 3.1:	Landnutzungsverteilung (CORINE Land Cover 2000) im KLIWA-Untersuchungsgebiet.	20
Abb. 3.2:	Verteilung der nutzbaren Feldkapazität bis 1 m Bodentiefe nach Bodenübersichtskarten 1:200 000 für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie 1:1 Mio. für Bayern, Angaben in mm.	21
Abb. 3.3:	Verteilung der Geländehöhen im Untersuchungsgebiet, Angaben in m NN.	22
Abb. 3.4:	Verteilung der Hangneigung im Untersuchungsgebiet, Angaben in Winkelgrad.....	23
Abb. 3.5:	Darstellung des länderspezifisch ermittelten Baseflow-Index (Quotient Basisabfluss/Gesamtabfluss) von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.	26
Abb. 3.6:	Häufigkeitsverteilung der Grundflächengrößen im Untersuchungsgebiet, blau = nach abgedeckter Fläche, orange = nach Anzahl.	27
Abb. 3.7:	Räumliche Verteilung der verwendeten Niederschlags- und Klimastationen, WETTREG2006 ECHAM5/A1B. KLIWA-Länder = rot, Nachbarländer mit Daten = blau, Nachbarländer ohne Daten = schwarz.	30
Abb. 3.8:	Mittlere relative Füllung des Bodenwasserspeichers zum Jahreswechsel (1971-2000). .	32
Abb. 3.9:	Mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke zum Jahreswechsel (1971-2000), Angaben in mm.	33
Abb. 4.1:	Validierung von Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2000. Gegenüberstellung von simulierten (GWN-BW) und gemessenen Werten (Pegeldaten) auf der Basis von 293 Einzugsgebieten für den Gesamtabfluss bzw. 269 Einzugsgebieten für den Basisabfluss in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Angaben in mm/a.	35
Abb. 4.2:	Änderung der Niedrigwasserabflüsse MNQ gemäß KLIWA Heft 14 (links) im Vergleich zur Änderung eines jahreszeitlich gewichteten Index, abgeleitet aus der Bodenwasserhaushaltsmodellierung (rechts). Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in Prozent.	36
Abb. 5.1:	Darstellungsebene naturräumlich-hydrogeologische Einheiten (n=25) für die räumliche Auswertung der Simulationsergebnisse.....	38
Abb. 5.2:	Mittlere jährliche Lufttemperatur. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in °C.....	41
Abb. 5.3:	Box-Plot-Diagramm der mittleren Lufttemperatur in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in °C.	42
Abb. 5.4:	Mittlere innerjährliche Variabilität der Lufttemperatur in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in °C.	42
Abb. 5.5:	Mittlere innerjährliche Änderung der Lufttemperatur in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in °C.....	43
Abb. 5.6:	Mittlerer jährlicher Niederschlag. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	44
Abb. 5.7:	Box-Plot-Diagramm des mittleren Niederschlags in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	44
Abb. 5.8:	Mittlere innerjährliche Variabilität des Niederschlags in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	45
Abb. 5.9:	Mittlere Änderung der Niederschlagshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.	46

Abb. 5.10:	Mittlere innerjährliche Änderung des Niederschlags in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	46
Abb. 5.11:	Mittlere jährliche tatsächliche Verdunstung. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	48
Abb. 5.12:	Box-Plot-Diagramm der mittleren tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	48
Abb. 5.13:	Mittlere innerjährliche Variabilität der tatsächlichen Verdunstung in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	49
Abb. 5.14:	Mittlere Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.	50
Abb. 5.15:	Mittlere innerjährliche Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	51
Abb. 5.16:	Mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	52
Abb. 5.17:	Box-Plot-Diagramm der mittleren Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	53
Abb. 5.18:	Mittlere innerjährliche Variabilität der Gesamtabflusshöhe in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	53
Abb. 5.19:	Mittlere Änderung der Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.	54
Abb. 5.20:	Mittlere innerjährliche Änderung der Gesamtabflusshöhe in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	55
Abb. 5.21:	Mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	56
Abb. 5.22:	Box-Plot-Diagramm der mittleren Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	57
Abb. 5.23:	Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.	58
Abb. 5.24:	Mittlerer jährlicher Trockenheitsindex (Zahl der Tage mit einem Bodenwassergehalt <30% nFK). Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	59
Abb. 5.25:	Box-Plot-Diagramm des mittleren Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm/a.	60
Abb. 5.26:	Mittlere innerjährliche Variabilität des Trockenheitsindex in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	60
Abb. 5.27:	Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in Tagen/Jahr.	61
Abb. 5.28:	Mittlere innerjährliche Änderung des Trockenheitsindex in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	62



Abb. 5.29:	Mittleres jährliches Wasseräquivalent der Schneedecke in den Monaten Dezember-März. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben in mm.....	63
Abb. 5.30:	Mittlere innerjährliche Variabilität des Wasseräquivalents der Schneedecke in den drei Bundesländern. Ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	63
Abb. 5.31:	Mittlere Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Monaten Dezember-März in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm.	64
Abb. 5.32:	Mittlere innerjährliche Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	65
Abb. 5.33:	Mittlere innerjährliche Änderung der Lufttemperatur in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in °C.....	66
Abb. 5.34:	Mittlere Änderung des Niederschlags in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.	67
Abb. 5.35:	Mittlere innerjährliche Änderung des Niederschlags in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.....	67
Abb. 5.36:	Mittlere Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.....	68
Abb. 5.37:	Mittlere innerjährliche Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	69
Abb. 5.38:	Mittlere Änderung der Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.	70
Abb. 5.39:	Mittlere innerjährliche Änderung der Gesamtabflusshöhe in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.....	70
Abb. 5.40:	Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm/a.....	71
Abb. 5.41:	Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-210 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in Tagen/Jahr.	72
Abb. 5.42:	Mittlere innerjährliche Änderung des Trockenheitsindex in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	72
Abb. 5.43:	Mittlere Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Monaten Dezember-März in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben in mm.	73
Abb. 5.44:	Mittlere innerjährliche Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	74
Abb. 5.45:	Mittlere innerjährliche Änderung der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in °C.	75

Abb. 5.46:	Mittlere Änderung der Niederschlagshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.....	76
Abb. 5.47:	Mittlere innerjährliche Änderung der Niederschlagshöhe in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	76
Abb. 5.48:	Mittlere Änderung der tatsächlichen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.....	77
Abb. 5.49:	Mittlere innerjährliche Änderung der tatsächlichen Verdunstung in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	78
Abb. 5.50:	Mittlere Änderung der Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.....	79
Abb. 5.51:	Mittlere innerjährliche Änderung der Gesamtabflusshöhe in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	79
Abb. 5.52:	Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm/a.....	80
Abb. 5.53:	Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in Tagen/Jahr.	81
Abb. 5.54:	Mittlere innerjährliche Änderung des Trockenheitsindex in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	81
Abb. 5.55:	Mittlere Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Monaten Dezember-März in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben in mm.....	82
Abb. 5.56:	Mittlere innerjährliche Änderung des Wasseräquivalents der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2003 (ECHAM4/B2). Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.	83



Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1:	Parameter und voreingestellte Standardwerte des Schneemoduls.....	13
Tab. 2.2:	Phänologische Entwicklungsstadien.....	14
Tab. 3.1:	Landnutzungsklassen CORINE (linker Teil, n=31) und Zuordnung zu simulationsrelevanten Nutzungsklassen (rechter Teil, n=16) in den drei Bundesländern. Prozentangaben geben den angenommenen versiegelten Anteil an.....	19
Tab. 3.2:	Modellrelevante Nutzungsklassen mit angenommenen Durchwurzelungstiefen und Schwellenwerten für den Grundwasserflurabstand, bei welchem noch kapillarer Aufstieg erfolgt.....	24
Tab. 3.3:	Häufigkeitsverteilung der Grundflächengrößen in den drei Bundesländern.....	27
Tab. 3.4:	Vergleich der mittleren Niederschlagshöhe von homogenisierter Reihe und 10 Realisationen für den Ist-Zustand (1971–2000) an 14 ausgewählten Stationen.....	29
Tab. 3.5:	Umfang der Datengrundlage für die Szenarienrechnungen mit WETTREG2006 ECHAM5/A1B.....	31
Tab. 3.6:	Mittlere Rücklage in der Schneedecke zum Jahreswechsel in den Gipfellagen ausgewählter Mittelgebirgsregionen Süddeutschlands und der bayerischen Alpen (1971-2000).....	33
Tab. 4.1:	Simulierte Gesamtabflusshöhe und Grundwasserneubildung aus Niederschlag – Validierung der Ergebnisse an Hand von Pegeldaten (MQ und MoMNQ _{red} gemäß KILLE 1970) in ausgewählten Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Angaben in mm/a.....	34
Tab. 5.1:	Auswertungsumfang der durchgeführten Simulationen zum Bodenwasserhaushalt und zur Grundwasserneubildung, jeweils bezogen auf die acht Wasserbilanz- und Zustandsgrößen (Parameter) und drei räumliche Darstellungsebenen.....	40
Tab.6.1:	Eingangs-, Wasserbilanz- bzw. Zustandsgrößen der Bodenwasserhaushaltsmodellier- ung für Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (1971-2000 zu 2021- 2050). 87	
Tab. A-1:	Mittlere Eintrittstermine Laubwald/Nadelwald.....	101
Tab. A-2:	Mittlere Eintrittstermine Grünland/Acker.....	103
Tab. A-3:	Unterschiede von tatsächlicher Verdunstung (V) und Sickerwasserrate (S) für Laubwald.	106
Tab. A-4:	Unterschiede von Verdunstung (V) und Sickerwasserrate (S) für Grünland.....	107

Anhang

Auswertungen zur dynamisierten Phänologie

Vorbemerkung

Der folgende Text stammt auszugsweise und leicht modifiziert aus einem unveröffentlichten Arbeitsbericht des Auftragnehmers GIT HydroS Consult GmbH (MORHARD 2011).

Für die KLIWA-Simulationsläufe auf Basis der WETTREG2006-Szenarien wurde das Bodenwasserhaushaltsmodell um eine Möglichkeit zur witterungsabhängigen Beschreibung phänologischer Eintrittstermine erweitert. Dabei werden die Zeitpunkte, zu denen die Vegetation einen bestimmten Entwicklungsstand erreicht, nicht mehr als "statische" Funktion der Geländehöhe aufgefasst, die für ein bestimmtes Entwicklungsstadium in gegebener Höhenlage über das gesamte Modellgebiet hinweg in jedem Kalenderjahr den gleichen Termin liefert, sondern standort- und witterungsabhängig über Temperatursummen berechnet. Es handelt sich um eine Implementierung der im Rahmen des KLIWEP-Projektes (Sachsen) und als Empfehlung für die LUBW zur Erweiterung der Prognosefähigkeit von Wasserhaushaltsmodellen erarbeiteten phänologischen Modelle (PÖHLER ET AL. 2007, PÖHLER 2008).

Erste Testläufe zur Validierung des neu eingeführten Parametrisierungsschemas ergaben für Lysimeterstandorte und Testgebiete in Baden-Württemberg nur geringfügige Unterschiede zwischen den mit statisch-höhenabhängiger oder dynamisch-witterungsabhängiger Vegetationsperiode berechneten mittleren Jahreswerten von Verdunstung und Sickerwasserbildung:

Lysimeter Schriesheim (Grünland)

∂ Sick = \emptyset 5.0 mm/a (max. 12.8 mm im Einzeljahr)
↳ entspricht 1.1 % (2.5 %) der Jahresverdunstung

Lysimeter Graben-Neudorf (Acker)

∂ Sick = \emptyset 1.5 mm/a (max. 4.3 mm im Einzeljahr)
↳ entspricht 0.3 % (0.8 %) der Jahresverdunstung

EZG Kocher/Kocherstetten

mittlere Differenz im Einzeljahr 30 l/s bei $Q = 15.5 \text{ m}^3/\text{s}$
↔ im Einzeljahr mit der größten Abweichung 0.5 %

Ergänzend zu diesen beispielhaft durchgeführten Abgleichen ist eine nach den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten der drei Bundesländer differenzierte Untersuchung erfolgt. Dabei wurden die Unterschiede zwischen statisch-höhenabhängiger und witterungsabhängig beschriebener Vegetationsperiode sowie den daraus resultierenden Auswirkungen auf den simulierten Bodenwasserhaushalt herausgearbeitet. Auf den folgenden Seiten werden beispielhaft Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

Auswahl typischer Einzelstandorte

Für systematische Untersuchungen zu den Auswirkungen der witterungsabhängigen Beschreibung phänologischer Eintrittstermine wurde eine möglichst repräsentative Auswahl von Einzelstandorten in unterschiedlichen Naturräumen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz getroffen. Dabei sollte jeder größere Naturraum mit mindestens einem typischen Standort vertreten sein. Die vorgenommene Auswahl umfasst in 20 Naturräumen insgesamt 40 Standorte typisch mittlerer Höhenlage oder mit Abdeckung der für diesen Naturraum als typisch angesehenen Höhenstufen. Ebenso wurde versucht, unterschiedlichen Böden in den Naturräumen bei der Festlegung der Einzelstandorte Rechnung zu tragen.



Unterschiede der berechneten Eintrittstermine (Pflanzenentwicklung)

Im folgenden Abschnitt sollen die Unterschiede zwischen der Simulation mit statisch-höhenabhängiger oder dynamisch-witterungsabhängiger Berechnung der an den Teststandorten erwarteten Eintrittstermine betrachtet werden. Dabei ist zunächst festzustellen, dass die mittleren Eintrittstermine in den beiden Varianten auch im Ist-Zustand nicht zwangsläufig übereinstimmen müssen, falls die statisch-höhenabhängigen Termine in Regionen mit höheren oder niedrigeren Durchschnittstemperaturen abgeleitet wurden. In diesem Fall sollten Parameter eines Temperatursummenansatzes besser auf andere Regionen übertragbar sein, als Mittelwerte in gegebener Meereshöhe – und damit tendenziell das witterungsabhängige Verfahren auf Defizite der statisch-höhenabhängigen Parametrisierung hinweisen. Alle Auswertungen beziehen sich auf Messdaten des Zeitraums 1971-2000.

Für **Laubwald** stimmen die mittleren Termine für den Beginn des Blattaustriebes bei statisch-höhenabhängiger oder dynamisch-witterungsabhängiger Berechnung im Mittel über alle Standorte hinweg gut überein. In der witterungsabhängigen Variante erfolgt der Blattaustrieb im Mittel nur 2.5 Tage früher. Dabei ist allerdings eine starke räumliche Differenzierung zu beobachten. Am südlichen Oberrhein liegt der über Temperatursummen berechnete Termin 15 Tage früher als der statisch-höhenabhängig geschätzte, in den Hochlagen von Schwarzwald und Bayerischem Wald (1200 / 1400 m) dagegen zwei Wochen später. Mit dem Temperatursummenansatz wird demnach ein deutlich stärkerer Höhengradient berechnet. Zugleich erfolgt eine regionale Differenzierung zwischen Standorten in vergleichbarer Höhenlage. So erfolgt der witterungsabhängig berechnete Blattaustrieb in den Alpen in Höhe der Mittelgebirgsgipfel nur etwa 10 Tage nach dem statisch-höhenabhängig geschätzten Termin und bleibt in 1000 m NN-Höhe nahezu unverändert. In der klimatisch vergleichsweise rauen Hohenloher Ebene liegt der witterungsabhängig berechnete Termin 5 Tage vor dem statisch-höhenabhängig geschätzten, bei Heilbronn in klimatischer Gunstlage sogar 10 Tage früher.

Eine Auswertung der witterungsabhängig berechneten Termine ergibt im Gegensatz zu dem aus TRAIN übernommenen Höhengradienten von 0.015 [d/m] einen mit 0.0368 ($r^2 = 0.9388$) mehr als doppelt so großen Wert.

Für den Maitrieb beim **Nadelwald** werden über den Temperatursummenansatz generell deutlich spätere Termine berechnet, als sie mit den bislang hinterlegten Parametern statisch-höhenabhängig geschätzt werden. Er erfolgt bei witterungsabhängiger Berechnung erst 12 Tage später, d.h. statt Anfang Mai erst zu Beginn der zweiten Maihälfte. Nur im Rheingraben stimmen statisch-höhenabhängige und witterungsabhängig berechnete Termine überein, an den übrigen Standorten liegt der über die Temperatursumme ermittelte Eintrittszeitpunkt häufig gut eine Woche später (z.B. Oberschwaben, Keuper, Muschelkalkplatten, Pfälzer Wald, Nordpfälzer Bergland).

Eine vorläufige Auswertung von phänologischen Beobachtungsdaten des DWD für den Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) zeigt, dass der Maitrieb der Fichte auf einer Bezugshöhe von 400 m NN in Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen im Zeitraum 1961-1990 im Mittel am 130. Tag des Jahres (Thüringen und Sachsen: am 135. Tag des Jahres) erfolgte, d.h. gut eine Woche nach dem Bezugswert für die statisch-höhenabhängige Schätzung. Zudem fällt der aus den Beobachtungsdaten abzuleitende Höhengradient von mindestens 0.025 bis 0.030 Tage pro m etwa doppelt so hoch aus, wie der aus TRAIN übernommene Gradient. Die witterungsabhängig berechneten Termine dürften damit besser stimmen, als die statisch-höhenabhängigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die für das Land Sachsen abgeleiteten Temperatursummen (PÖHLER ET AL. 2007, PÖHLER 2008) für Südwestdeutschland bisher keiner systematischen Validierung unterzogen wurden.

Tab. A-1: Mittlere Eintrittstermine für Laubwald/Nadelwald.

Mittlere Eintrittstermine (dynamisch - statisch)			Laubwald: Blattaustrieb			Nadelwald: Maitrieb		
Naturraum	Standort	Höhe [m NN]	stat. [1..365]	dyn. [1..365]	Δ [d]	stat. [1..365]	dyn. [1..365]	Δ [d]
Nordalpen	alpine Hochlage	1683	142	167.4	25.4	141	184.7	43.7
Nordalpen	bewaldeter Hang	1175	135	144.2	9.2	134	159.0	25.0
Nordalpen	alpine Tallage	804	129	132.0	3.0	128	144.5	16.5
Nordalpen	Alpenvorland	753	128	126.6	-1.4	127	139.7	12.7
Moränenland	Oberschwaben, nFK 95	663	127	121.5	-5.5	126	134.7	8.7
Moränenland	Oberschwaben, nFK 170	667	127	121.7	-5.3	126	134.7	8.7
Moränenland	Oberschwaben, nFK 250	656	127	121.5	-5.5	126	134.5	8.5
Molasse und Schotterpl.	Münchner Schotterebene	500	124	119.8	-4.2	123	132.6	9.6
Molasse und Schotterpl.	südlich von Regensburg	409	123	117.6	-5.4	122	130.0	8.0
Bayerischer Wald	Hochlage (Mittelgebirge)	1193	135	148.6	13.6	134	164.2	30.2
Bayerischer Wald	typische höhere Lage	646	127	132.8	5.8	126	144.8	18.8
Bayerischer Wald	gemäßigte Lage	488	124	124.0	0.0	123	136.5	13.5
Bayerisches Vogtland	eher rauhes Klima	598	126	129.9	3.9	125	142.4	17.4
Bruchschollenland	relative Gunstlage	369	123	120.9	-2.1	122	133.7	11.7
Fränkische Alb	typische gemäßigte Lage	506	124	119.9	-4.1	123	132.8	9.8
Schwäbische Alb	eher rauhes Klima	755	128	125.9	-2.1	127	139.5	12.5
Fränk. Keuper-Lias-Land	Sandboden	343	122	117.0	-5.0	121	129.3	8.3
Fränk. Keuper-Lias-Land	sandig-schluffiger Boden	356	122	117.0	-5.0	121	129.3	8.3
Schwäb.Keuper-Lias-Land	Bergland	527	125	120.6	-4.4	124	133.7	9.7
Schwäb.Keuper-Lias-Land	begünstigte Tieflage	203	120	108.8	-11.2	119	121.7	2.7
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	362	122	116.9	-5.1	121	129.3	8.3
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	350	122	116.8	-5.2	121	129.1	8.1
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	290	121	114.8	-6.2	120	127.3	7.3
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	292	121	114.8	-6.2	120	127.2	7.2
Spessart	gemäßigtes Mittelgebirge	394	123	121.7	-1.3	122	135.0	13.0
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 115	688	127	125.2	-1.8	126	138.6	12.6
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 50	677	127	124.5	-2.5	126	138.2	12.2
Südschwarzwald	typische Hochlage	899	130	134.9	4.9	129	148.4	19.4
Südschwarzwald	exponierte Gipfelflage	1386	138	152.7	14.7	137	170.8	33.8
Südl. Oberrheingraben	Niederterrasse	208	120	104.4	-15.6	119	117.3	-1.7
Südl. Oberrheingraben	Lößrücken	224	120	104.8	-15.2	119	117.7	-1.3
Nördl. Oberrheingraben	Braunerde auf Flugsand	99	119	106.5	-12.5	118	119.0	1.0
Nördl. Oberrheingraben	Vega aus Auentonmergel	94	118	105.9	-12.1	117	118.5	1.5
Mainzer Becken	Kalktschernosem aus Löß	145	119	108.3	-10.7	118	120.8	2.8
Pfälzer Wald	Bergland	489	124	116.1	-7.9	123	129.1	6.1
Nordpfälzer Bergland	Nahetal (unt. Hanglage)	170	120	110.0	-10.0	119	123.1	4.1
Nordpfälzer Bergland	Bergland	470	124	119.3	-4.7	123	132.8	9.8
Rheinisches Schiefergeb.	Rhein und Mosel	365	122	115.8	-6.2	121	128.9	7.9
Eifel	Bergland	495	124	125.3	1.3	123	139.4	16.4
Westerwald	Bergland	502	124	124.8	0.8	123	137.6	14.6

Für **Grünland** werden zwei Termine witterungsabhängig berechnet: Dabei erfolgt das Ergreifen an den Teststandorten durchschnittlich sieben Tage später, das mit dem ersten Heuschnitt assoziierte Erreichen einer nach Biomassezuwachs weitgehend abgeschlossenen Bestandesentwicklung 5.5 Tage später als bei statisch-höhenabhängiger Schätzung. Wie beim Laubwald steht diesen durchschnittlichen Unterschieden eine ausgeprägte Differenzierung nach Region und Höhenlage gegenüber. So liegen die über Temperatursummen berechneten Termine

- im Oberrheingraben zwei Wochen früher als bei statisch-höhenabhängiger Schätzung,
- in den Gunstlagen bei Heilbronn, Mainz und im Nahetal 8 - 9 Tage früher,



- in den Gäulandschaften und im Keuperbergland in der gleichen Größenordnung wie die statisch-höhenabhängig geschätzten,
- auf Schwäbischer und Fränkischer Alb und im Spessart 10 Tage später,
- (Heuschnitt nur knapp eine Woche später),
- im Schwarzwald zwei Wochen später,
- in Gipfellagen von Schwarzwald / Bayerischem Wald 30-35 Tage später,
- in der alpinen Hochlage (1680 m) sogar 48 Tage später.

Der aus TRAIN übernommene Höhengradient von 0.015 Tage pro m wäre demnach bei weitem zu gering und selbst der in WaSiM-ETH verwendete Gradient 0.025 würde zu gering ausfallen. Die Temperaturabhängigkeit der Parametrisierung von PÖHLER ET AL. 2007 legt einen Höhengradienten von 0.05 nahe ($r^2 = 0.8877$), welche allerdings durch phänologische Beobachtungen bestätigt werden müsste. Vorläufige eigene Auswertungen belegen diesen Höhengradienten zwar tatsächlich für das "Ergrünen des Grünlands" (1991-2009), nicht aber für den Heuschnitt oder vergleichbare Entwicklungsstadien anderer Gräser, aus denen für den Beginn der Vegetationsperiode Gradienten zwischen 0.03 (Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz) und 0.04 (Hessen, Thüringen/Sachsen), für die Schnittreife ein solcher von 0.025 bis eher 0.03 abgeleitet würde. In jedem Fall liegen diese Gradienten aber über dem aus TRAIN übernommenen Wert.

Auch für **Ackerflächen** werden zwei Termine witterungsabhängig berechnet, von denen im Falle eines Getreides der erste dem Auflaufen, der zweite dem Ährenschieben entspricht. Dabei liegen die witterungsabhängig berechneten Eintrittstermine im Mittel 10 bis 12 Tage nach den statisch-höhenabhängig geschätzten, mit der bereits bekannten regionalen Differenzierung:

- im Rheingraben erster Termin 7-12 Tage früher (zweiter Termin 4-7 Tage früher),
- in Oberschwaben, in Bayern südlich der Donau, auf der Frankenalb und in Keuper / Muschelkalk / Gäulandschaften eine Woche später,
- in Oberstdorf und in der Eifel 2.5 Wochen später.

Anstatt des für die statisch-höhenabhängige Schätzung hinterlegten Gradienten von 0.015 [d/m] generiert das Temperatursummenmodell mit den Parametern von PÖHLER ET AL. 2007 einen solchen von 0.047 ($r^2 = 0.9144$).

Nachdem in den vorstehenden Absätzen auf die überraschend deutlichen Unterschiede eingegangen wurde, die sich für die mittleren Eintrittstermine an den einzelnen Standorten ergeben (Höhengradient und Differenzierung zwischen klimatisch mehr oder weniger begünstigten Regionen) sei abschließend darauf hingewiesen, dass bei Berechnung der phänologischen Phasen über Temperatursummen auch eine Differenzierung zwischen den Einzeljahren mit unterschiedlichem Witterungsverlauf erfolgt.

Für die 40 ausgewählten Teststandorte beträgt die mittlere Schwankungsbreite, ausgedrückt durch die Standardabweichung der witterungsabhängig berechneten Eintrittstermine

- ± 1 Woche für den Blattaustrieb bzw. Maitrieb der Wälder,
- ± 2 Wochen für das Ergrünen des Grünlands,
- ± 10 Tage für das Auflaufen des Getreides.

Tab. A-2: Mittlere Eintrittstermine für Grünland/Acker.

Mittlere Eintrittstermine (dynamisch - statisch)			Grünland: Ergrünen			Acker: Auflaufen		
Naturraum	Standort	Höhe [m NN]	stat. [1..365]	dyn. [1..365]	Δ [d]	stat. [1..365]	dyn. [1..365]	Δ [d]
Nordalpen	alpine Hochlage	1683	97	145.8	48.8	136	184.8	48.8
Nordalpen	bewaldeter Hang	1175	90	121.6	31.6	129	156.4	27.4
Nordalpen	alpine Tallage	804	84	104.1	20.1	123	141.7	18.7
Nordalpen	Alpenvorland	753	83	96.1	13.1	122	135.7	13.7
Moränenland	Oberschwaben, nFK 95	663	82	88.5	6.5	121	128.6	7.6
Moränenland	Oberschwaben, nFK 170	667	82	89.1	7.1	121	128.6	7.6
Moränenland	Oberschwaben, nFK 250	656	82	88.8	6.8	121	128.7	7.7
Molasse und Schotterpl.	Münchner Schotterebene	500	79	87.0	8.0	118	127.3	9.3
Molasse und Schotterpl.	südlich von Regensburg	409	78	87.2	9.2	117	124.7	7.7
Bayerischer Wald	Hochlage (Mittelgebirge)	1193	90	128.4	38.4	129	160.0	31.0
Bayerischer Wald	typische höhere Lage	646	82	107.6	25.6	121	141.7	20.7
Bayerischer Wald	gemäßigte Lage	488	79	95.4	16.4	118	132.9	14.9
Bayerisches Vogtland	eher rauhes Klima	598	81	101.9	20.9	120	139.2	19.2
Bruchschollenland	relative Gunstlage	369	78	86.7	8.7	117	128.7	11.7
Fränkische Alb	typische gemäßigte Lage	506	79	90.3	11.3	118	127.2	9.2
Schwäbische Alb	eher rauhes Klima	755	83	93.2	10.2	122	135.1	13.1
Fränk. Keuper-Lias-Land	Sandboden	343	77	80.7	3.7	116	123.5	7.5
Fränk. Keuper-Lias-Land	sandig-schluffiger Boden	356	77	80.4	3.4	116	123.5	7.5
Schwäb.Keuper-Lias-Land	Bergland	527	80	83.9	3.9	119	128.3	9.3
Schwäb.Keuper-Lias-Land	begünstigte Tieflage	203	75	66.3	-8.7	114	110.4	-3.6
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	362	77	79.6	2.6	116	123.4	7.4
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	350	77	79.4	2.4	116	123.2	7.2
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	290	76	77.9	1.9	115	121.4	6.4
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	292	76	77.8	1.8	115	121.4	6.4
Spessart	gemäßigtes Mittelgebirge	394	78	87.2	9.2	117	130.4	13.4
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 115	688	82	86.1	4.1	121	133.5	12.5
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 50	677	82	85.5	3.5	121	132.7	11.7
Südschwarzwald	typische Hochlage	899	85	100.6	15.6	124	145.8	21.8
Südschwarzwald	exponierte Gipfelage	1386	93	122.7	29.7	132	168.9	36.9
Südl. Oberrheingraben	Niederterrasse	208	75	59.0	-16.0	114	101.1	-12.9
Südl. Oberrheingraben	Lößrücken	224	75	59.4	-15.6	114	101.9	-12.1
Nördl. Oberrheingraben	Braunerde auf Flugsand	99	74	62.0	-12.0	113	105.4	-7.6
Nördl. Oberrheingraben	Vega aus Auentonmergel	94	73	61.3	-11.7	112	104.8	-7.2
Mainzer Becken	Kalktschernosem aus Löß	145	74	65.4	-8.6	113	110.0	-3.0
Pfälzer Wald	Bergland	489	79	77.2	-1.8	118	123.1	5.1
Nordpfälzer Bergland	Nahetal (unt. Hanglage)	170	75	66.2	-8.8	114	113.4	-0.6
Nordpfälzer Bergland	Bergland	470	79	77.9	-1.1	118	127.1	9.1
Rheinisches Schiefergeb.	Rhein und Mosel	365	77	72.7	-4.3	116	121.6	5.6
Eifel	Bergland	495	79	85.3	6.3	118	135.6	17.6
Westerwald	Bergland	502	79	90.7	11.7	118	134.0	16.0

In den Jahren mit extrem warmem oder kühlem Frühjahr liegen die Termine im Bereich der doppelten Standardabweichung vor/nach dem mittleren Eintrittszeitpunkt, d.h. der Blattaustrieb der Wälder um bis zu zwei Wochen, das "Ergrünen des Grünlands" bis zu vier und das Auflaufen des Getreides bis zu drei Wochen vor/nach dem am jeweiligen mittleren Termin.

Unterschiede der berechneten tatsächlichen Verdunstung

Auf den ersten Blick überraschend wirken sich die teils beträchtlichen Unterschiede der statisch-höhenabhängig oder dynamisch-witterungsabhängig berechneten Eintrittszeitpunkte der Pflanzenentwicklung kaum erkennbar auf die simulierte Jahresverdunstung aus. Für **Laubwald** wird im Mittel über die 40 Teststandorte in beiden Varianten eine Verdunstung von 560 mm/a ausgewiesen (die Differenz beträgt 0.5 mm). Dabei liegt die Differenz an den Einzelstandorten in 33 Fällen im Bereich ± 5.5 mm/a. Nur am südlichen Oberrhein erhöht



sich die Verdunstung um 7 - 8 mm/a und in Mittelgebirgs- oder alpinen Lagen (1200 - 1400 m) wird eine um 10 - 20 mm geringere Jahressumme berechnet. Diese bei Betrachtung des Gesamtjahrs nur geringen Unterschiede erklären sich teilweise daraus, dass Wasser, welches im späten Frühjahr zusätzlich verdunstet wird, anschließend im Hochsommer nicht mehr zur Verfügung steht. Am Beispiel der klimatisch begünstigten Tieflage bei Heilbronn stellt sich dies wie folgt dar:

April +12.2 mm (72.9 statt 60.7), Mai +2.4 mm ⇔ Juni-Oktober -9.2 mm

Die im April gegenüber der statisch-höhenabhängigen Variante um 20 % höhere Verdunstung bedeutet für diesen Einzelmonat durchaus einen beachtlichen Unterschied. Dies allerdings in einem Monat, in dem die tatsächliche Verdunstung gegenüber jener der Monate Mai bis August (150-180 mm pro Monat) noch relativ gering ist und auf Kosten des ansonsten für den Sommer gespeicherten Wasservorrats.

Noch geringer fallen die Unterschiede beim **Nadelwald** aus, obwohl speziell für diesen besonders große Abweichungen zwischen höhenabhängig geschätzten und witterungsabhängig berechneten Eintrittsterminen der Pflanzenentwicklung auftreten. Die simulierte Jahresverdunstung fällt bei im Mittel 12 Tage späterem Maitrieb um nur 2.2 mm geringer aus (650.4 statt 652.6 mm), was in hohem Maße darauf zurückzuführen ist, dass der Nadelwald auch ohne die frischen Triebe über reichlich Nadeln verfügt. In der Folge erreichen die Abweichungen der in beiden Varianten simulierten Jahresverdunstung erst oberhalb von 750 m eine Größenordnung von 5- 12 mm (dabei 4 - 8 mm im Einzelmonat ⇔ darunter max. 4 mm im Mai).

Für **Grünland** und **Acker** fallen die Unterschiede bei den Jahressummen der Verdunstung mit -2.9 und -2.7 mm ähnlich gering aus. Auch für diese Nutzungen ergeben sich deutliche Unterschiede nur in den Gipfellagen der Mittelgebirge oder den höheren Lagen der Alpen, was weniger eine Folge der witterungsabhängigen Berechnung, als vielmehr eine Folge der offensichtlich zu geringen Höhengradienten für die statische Variante ist. Für alle Nutzungen bleiben die Unterschiede zwischen der mit statisch-höhenabhängiger oder witterungsabhängiger Phänologie simulierten Verdunstung an Standorten unterhalb von 900 m NN im Bereich ± 5.0 mm, selten ± 7.5 mm/a, was einer Größenordnung von etwa 1 bis 2 % entspricht.

Aussagekräftiger als diese Mittelwerte über Standorte mit sehr unterschiedlichen Niederschlagshöhen und nicht minder unterschiedlicher Aufteilung in Verdunstung und Sickerwasserrate, sind die in den folgenden Abbildungen beispielhaft für Laubwald und Grünland als den beiden Nutzungen mit den größten Differenzen vorgenommenen Auswertungen.

Zu erkennen sind unter anderem:

- Abweichungen der langjährigen mittleren Bilanzgrößen (Verdunstung bzw. Sickerwasserrate) von mehr als 7.5 mm treten nur in den Hochlagen der Mittelgebirge und in den Alpen auf.
- Wie groß die daraus resultierende prozentuale Änderung von Verdunstung bzw. Sickerwassermenge ausfällt, hängt vom absoluten Wert der jeweiligen Bilanzgröße ab: Für die Verdunstung macht die Änderung selten mehr als ein Prozent der Jahressumme aus. Lediglich in den Hochlagen der Mittelgebirge werden maximal 5 % und im Allgäu (Matte) 7.5 % erreicht. Für die Sickerwasserrate unter Grünland bleibt die Abweichung an allen Teststandorten im Bereich von ± 2.5 %, weil die mittlere Jahressumme auch am trockensten der Standorte (im Mainzer Becken) noch bei knapp 100 mm liegt. Unter Laubwald treten dagegen z.T. sehr geringe Sickerwassermengen auf. Die Differenz zwischen langjähriger mittlerer Sickerwasserrate auf Basis witterungsabhängig oder statisch-höhenabhängig berechneter Termine erreicht (nur) an trockenen Standorten mehr als 2.5 %. Im vorliegenden Fall werden maximal 10% unter Lössböden am

südlichen Oberrhein (bei Sickerwasserraten von 75 mm) und unter Schwarzerde im Mainzer Becken (Unter Laubwald wird meist kein Sickerwasser gebildet).

- In den Einzeljahren mit den größten Abweichungen liegt der Unterschied zwischen mit dynamisch-witterungsabhängiger oder statisch-höhenabhängiger Phänologie berechneter Jahresverdunstung an der Mehrzahl aller Standorte im Bereich von $\pm 3\%$ und erreicht nur in den Hochlagen der Mittelgebirge 7 bis 13.5 %, wobei es sich dort weniger um einen Effekt des Witterungsverlaufs sondern um einen fehlerhaften Höhengradienten handelt. Die mit den beiden Verfahren berechneten Sickerwassermengen unterscheiden sich im Einzeljahr unter Grünland um maximal 5-6 % voneinander. Unter Laubwald unterscheiden sie sich in Einzeljahren an 10 der 40 untersuchten Standorte um mehr als 6 %.

Diskussion der Ergebnisse

Die vergleichsweise geringe Auswirkung von Verschiebungen der phänologischen Eintrittszeitpunkte um bis zu zwei, in extremen Lagen sogar drei bis vier Wochen auf die simulierte Jahresverdunstung dürfte vor allem auf drei Ursachen zurückgehen:

- Die Termine betreffen den Zustand der Vegetation im Zeitraum März bis Mai, der sich bis etwa Mitte April meist noch durch einen relativ geringen Verdunstungsanspruch im Vergleich zu den Werten der Sommermonate (auf welche der größte Teil der Jahresverdunstung entfällt) auszeichnet.
- Das im Mai in Folge früherer Pflanzenentwicklung zusätzlich verdunstete Wasser steht an vielen Standorten, an denen der Bodenwasserspeicher ab Mitte Mai durch die Niederschläge nicht mehr vollständig aufgefüllt wird, in den Sommermonaten nicht mehr zur Verfügung. Damit geht ein Teil der im Frühjahr höheren Verdunstung dann zu Lasten einer in den folgenden Monaten geringeren verfügbaren Wassermenge.
- Durch die witterungsabhängige Berechnung werden insbesondere die Zeitpunkte der Pflanzenentwicklung verlegt; die Vegetation entwickelt sich an einem begünstigten Standort oder in einem warmen Frühjahr zwar schneller, aber es wird im Modell keine "üppigere" Pflanzenentwicklung simuliert. Tatsächlich wäre in vielen Fällen aber vermutlich auch eine höhere Biomasseproduktion zu erwarten.

Trotz der vergleichsweise geringen Auswirkung auf die Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts, stellt der Übergang zur witterungsabhängigen Beschreibung der Phänologie aus mehreren Gründen einen Fortschritt für die Modellentwicklung dar:

- Neben der Berechnung der Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts (dabei insbesondere der Sickerwasserbildung) soll das Modell auch eine adäquate Beschreibung des Jahresgangs der Bodenwassergehalte erlauben, welche etwa Aussagen zur Wasserversorgung der Vegetation zulässt. Dazu zählt auch ein verstärkter Wassermangel im Sommer als Folge einer höheren Verdunstung im Frühjahr, auch wenn diese weder Menge noch Jahresgang der Sickerwasserbildung nennenswert beeinflusst.
- Die Beschreibung der phänologischen Eintrittstermine, welche vom Modell regionalisiert werden, stellt für sich selbst ein zusätzliches interessantes Modellergebnis dar.
- Temperatursummenansätze lassen sich weit zuverlässiger auf Regionen mit abweichenden klimatischen Verhältnissen übertragen als mittlere Eintrittszeitpunkte als Funktion der Geländehöhe. Dadurch wird der Modellansatz zur Simulation des Bodenwasserhaushalts insgesamt besser übertragbar und liefert insbesondere auch bei Szenariosimulationen voraussichtlich plausiblere Ergebnisse.



- Im Zusammenhang mit Fragen des Klimawandels wäre in Zukunft auch eine Simulation einer sich je nach Witterungsverlauf mehr oder weniger gut entwickelnden Vegetation denkbar (die Parametrisierung dürfte aber bislang noch an den Datengrundlagen scheitern).

Tab. A-3: Unterschiede zwischen statistisch-höhenabhängiger und dynamisch-witterungsabhängiger Berechnung von tatsächlicher Verdunstung (V) und Sickerwasserrate (S) für Laubwald.

Änderung von Verdunstung und Sickerung: Laubwald			langjährige Mittelwerte			maximale Differenz in einem Einzeljahr			
Naturraum	Standort	Höhe [m NN]	ΔV [mm/a]	ΔV [%]	ΔS [%]	ΔV [mm]	ΔV [%]	ΔS [mm]	ΔS [%]
Nordalpen	alpine Hochlage	1683	-28.8	-7.6	1.8	-46.3	-13.5	46.3	3.0
Nordalpen	bewaldeter Hang	1175	-9.6	-2.1	0.6	-33.4	-7.9	33.4	2.3
Nordalpen	alpine Tallage	804	-5.0	-0.7	0.5	-23.7	-3.8	23.7	2.3
Nordalpen	Alpenvorland	753	1.3	0.2	-0.2	27.1	3.8	-27.1	-2.9
Moränenland	Oberschwaben, nFK 95	663	3.9	0.7	-0.8	13.5	2.1	-13.5	-2.9
Moränenland	Oberschwaben, nFK 170	667	4.4	0.6	-1.1	19.0	2.6	-19.0	-4.8
Moränenland	Oberschwaben, nFK 250	656	5.5	0.7	-1.8	19.4	2.7	-18.7	-5.5
Molasse und Schotterpl.	Münchner Schotterebene	500	3.3	0.5	-1.6	13.5	1.9	-13.6	-6.7
Molasse und Schotterpl.	südlich von Regensburg	409	1.5	0.2	-1.9	6.1	1.0	-5.9	-16.7
Bayerischer Wald	Hochlage (Mittelgebirge)	1193	-18.1	-3.5	2.1	-53.7	-10.4	53.6	5.5
Bayerischer Wald	typische höhere Lage	646	-4.4	-0.8	0.7	-17.9	-3.2	17.8	2.8
Bayerischer Wald	gemäßigte Lage	488	0.0	0.0	0.0	-12.2	-2.1	12.1	3.8
Bayerisches Vogtland	eher rauhes Klima	598	-2.4	-0.5	0.7	-17.9	-3.2	17.9	4.6
Bruchschollenland	relative Gunstlage	369	0.9	0.2	-0.3	10.7	2.3	-10.7	-2.2
Fränkische Alb	typische gemäßigte Lage	506	1.6	0.3	-0.5	9.9	2.0	-9.8	-2.2
Schwäbische Alb	eher rauhes Klima	755	1.0	0.2	-0.2	-11.3	-2.2	11.3	2.8
Fränk. Keuper-Lias-Land	Sandboden	343	1.6	0.3	-0.7	11.2	2.2	-11.1	-3.0
Fränk. Keuper-Lias-Land	sandig-schluffiger Boden	356	1.1	0.2	-0.7	6.8	1.2	-6.8	-2.9
Schwäb. Keuper-Lias-Land	Bergland	527	3.3	0.5	-0.8	21.4	3.6	-21.4	-3.9
Schwäb. Keuper-Lias-Land	begünstigte Tieflage	203	5.5	0.8	-3.4	16.3	2.4	-16.5	-24.5
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	362	1.8	0.4	-0.7	9.9	2.2	-9.9	-3.0
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	350	2.1	0.3	-1.6	12.2	1.9	-11.8	-8.8
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	290	1.8	0.5	-0.7	9.8	2.2	-9.7	-2.5
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	292	1.4	0.2	-2.5	8.1	1.4	-8.0	-9.9
Spessart	gemäßigtes Mittelgebirge	394	0.6	0.1	-0.1	11.3	2.4	-11.3	-2.1
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 115	688	1.4	0.2	-0.2	17.1	2.9	-17.1	-2.6
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 50	677	1.7	0.4	-0.2	13.5	2.9	-13.4	-1.6
Südschwarzwald	typische Hochlage	899	-5.9	-0.9	0.7	-27.1	-4.3	27.0	3.3
Südschwarzwald	exponierte Gipfelage	1386	-19.1	-3.4	1.6	-37.6	-7.2	37.7	4.7
Südl. Oberrheingraben	Niederterrasse	208	6.8	1.2	-3.7	19.8	3.8	-19.8	-10.9
Südl. Oberrheingraben	Lößrücken	224	7.9	1.1	-9.8	31.5	3.9	-31.4	-28.2
Nördl. Oberrheingraben	Braunerde auf Flugsand	99	3.3	0.6	-4.0	18.4	3.7	-18.4	-19.3
Nördl. Oberrheingraben	Vega aus Auentonmergel	94	2.2	0.4	-7.7	16.6	2.8	-16.7	-35.0
Mainzer Becken	Kalktschernosem aus Löß	145	0.8	0.1	-10.9	7.9	1.3	-7.9	-100.0
Pfälzer Wald	Bergland	489	3.9	0.7	-0.9	22.9	3.5	-23.0	-5.1
Nordpfälzer Bergland	Nahetal (unt. Hanglage)	170	1.1	0.2	-3.4	5.9	1.1	-5.9	-21.0
Nordpfälzer Bergland	Bergland	470	2.0	0.4	-0.5	14.3	2.9	-14.3	-3.1
Rheinisches Schiefergeb.	Rhein und Mosel	365	1.9	0.4	-1.0	10.1	1.8	-10.1	-5.5
Eifel	Bergland	495	-1.1	-0.2	0.3	-15.6	-2.9	15.6	2.9
Westerwald	Bergland	502	-0.9	-0.2	0.2	24.0	3.6	-24.0	-2.9

Tab. A-4: Unterschiede zwischen statistisch-höhenabhängiger und dynamisch-witterungsabhängiger Berechnung von Verdunstung (V) und Sickerwasserrate (S) für Grünland.

Änderung von Verdunstung und Sickerung: Grünland			langjährige Mittelwerte			maximale Differenz in einem Einzeljahr			
Naturraum	Standort	Höhe [m NN]	ΔV [mm/a]	ΔV [%]	ΔS [%]	ΔV [mm]	ΔV [%]	ΔS [mm]	ΔS [%]
Nordalpen	alpine Hochlage	1683	-22.1	-7.5	1.3	-29.4	-11.1	29.5	1.7
Nordalpen	bewaldeter Hang	1175	-10.7	-3.1	0.7	-19.8	-6.3	19.8	1.4
Nordalpen	alpine Tallage	804	-6.8	-1.4	0.5	-14.0	-3.0	14.0	1.1
Nordalpen	Alpenvorland	753	-4.0	-0.8	0.4	-10.6	-2.2	10.6	1.2
Moränenland	Oberschwaben, nFK 95	663	-1.7	-0.4	0.3	-9.1	-1.9	9.1	1.4
Moränenland	Oberschwaben, nFK 170	667	-2.6	-0.5	0.5	-14.2	-2.6	14.3	2.4
Moränenland	Oberschwaben, nFK 250	656	-2.4	-0.4	0.5	-14.1	-2.6	14.1	2.7
Molasse und Schotterplatten	Münchner Schotterebene	500	-2.0	-0.4	0.5	-10.0	-1.9	10.0	2.4
Molasse und Schotterplatten	südlich von Regensburg	409	-1.3	-0.3	0.6	-8.5	-1.8	8.4	2.8
Bayerischer Wald	Hochlage (Mittelgebirge)	1193	-21.7	-5.1	2.3	-42.4	-10.5	42.3	5.3
Bayerischer Wald	typische höhere Lage	646	-7.6	-1.7	1.0	-15.9	-3.7	16.0	2.9
Bayerischer Wald	gemäßigte Lage	488	-3.4	-0.8	0.8	-11.6	-2.6	11.6	2.6
Bayerisches Vogtland	eher rauhes Klima	598	-5.2	-1.2	1.3	-16.2	-3.8	16.2	3.4
Bruchschollenland	relative Gunstlage	369	-1.4	-0.4	0.3	-7.0	-1.9	6.9	1.5
Fränkische Alb	typische gemäßigte Lage	506	-1.9	-0.5	0.5	-8.2	-2.0	8.2	1.9
Schwäbische Alb	eher rauhes Klima	755	-2.9	-0.7	0.6	-10.0	-2.4	9.9	2.0
Fränk. Keuper-Lias-Land	Sandboden	343	-0.6	-0.1	0.2	-6.0	-1.4	6.0	2.0
Fränk. Keuper-Lias-Land	sandig-schluffiger Boden	356	-0.7	-0.2	0.3	-8.0	-1.7	8.0	3.5
Schwäb. Keuper-Lias-Land	Bergland	527	-1.2	-0.3	0.2	-9.9	-2.2	9.9	1.7
Schwäb. Keuper-Lias-Land	begünstigte Tieflage	203	2.0	0.4	-0.6	8.1	1.4	-8.0	-2.9
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	362	-0.3	-0.1	0.1	-4.5	-1.2	4.5	1.2
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	350	-0.8	-0.2	0.3	-9.1	-1.8	9.0	3.2
Muschelkalkplatten	Boden aus Muschelkalk	290	0.0	0.0	0.0	-3.5	1.0	3.5	1.2
Muschelkalkplatten	Boden aus Löß	292	-0.1	0.0	0.0	-6.0	-1.3	6.0	2.5
Spessart	gemäßigtes Mittelgebirge	394	-2.0	-0.5	0.4	-7.1	-1.8	7.1	2.0
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 115	688	-2.0	-0.4	0.3	-11.8	-2.4	11.8	1.5
Nordschwarzwald	typ. mittl. Lage, nFK 50	677	-1.4	-0.3	0.2	-8.6	-2.1	8.5	1.0
Südschwarzwald	typische Hochlage	899	-7.0	-1.4	0.7	-19.1	-4.1	19.0	2.0
Südschwarzwald	exponierte Gipfelage	1386	-14.4	-3.4	1.1	-26.3	-6.7	26.3	2.2
Südl. Oberrheingraben	Niederterrasse	208	3.4	0.7	-1.3	9.6	1.9	-9.6	-3.6
Südl. Oberrheingraben	Lößrücken	224	4.5	0.8	-2.0	15.2	2.4	-15.3	-5.9
Nördl. Oberrheingraben	Braunerde auf Flugsand	99	2.0	0.5	-0.8	6.6	1.9	-6.6	-2.8
Nördl. Oberrheingraben	Vega aus Auentonmergel	94	2.4	0.5	-1.4	9.5	2.2	-9.4	-6.3
Mainzer Becken	Kalktschernosem aus Löß	145	1.7	0.4	-1.7	6.9	1.4	-6.9	-6.2
Pfälzer Wald	Bergland	489	0.2	0.0	0.0	-8.9	-2.1	9.0	-1.3
Nordpfälzer Bergland	Nahetal (unt. Hanglage)	170	1.4	0.4	-0.9	5.2	1.3	-5.1	-3.5
Nordpfälzer Bergland	Bergland	470	-0.1	0.0	0.0	-6.6	-1.6	6.6	1.1
Rheinisches Schiefergebirge	Rhein und Mosel	365	0.6	0.1	-0.2	-5.9	-1.4	5.9	-1.6
Eifel	Bergland	495	-2.3	-0.6	0.4	-11.6	-3.0	11.5	1.8
Westerwald	Bergland	502	-3.3	-0.8	0.5	-12.6	-3.1	12.5	1.6



Digitaler Anhang (CD)

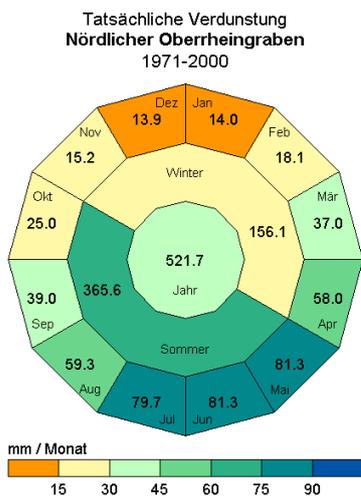
Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW werden in Heft 17 "Auswirkung des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz" erläutert. Ergänzend dazu werden im digitalen Anhang auf beiliegender CD Ergebnisgrafiken für die verschiedenen räumlichen Gliederungen und alle ausgewerteten Szenarienzeiträume bereitgestellt.

Für die folgenden Datensätze liegen Auswertungen auf Ebene der Bundesländer, KLIWA-Regionen und Naturräume vor:

- Homogenisierte Reihen 1971-2000 (um Ausreißer und Lücken bereinigte Messdaten)
- Regionale Klimaszenariendaten WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) für
 - Ist-Zustand 1971-2000
 - Nahe Zukunft 2021-2050
 - Ferne Zukunft 2071-2100
- Regionale Klimaszenariendaten WETTREG2003 (ECHAM4/B2) für
 - Ist-Zustand 1971-2000
 - Nahe Zukunft 2021-2050

Die Ringdiagramme präsentieren Mittelwerte über den jeweiligen dreißigjährigen Zeitraum in ihrer innerjährlichen Differenzierung (Monate, hydrologische Halbjahre), die Boxplots zeigen dagegen die Streuung der Ergebnisse um den jeweiligen Jahres- oder Halbjahreswert, die sich aus der Simulation der 10 Realisationen ergeben. Die Mittelwerte über den jeweiligen Zeitraum bzw. ihre Änderung für die zukünftigen Zeiträume werden zusätzlich in Form von Karten in ihrer räumlichen Differenzierung dargestellt.

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 (Klimaszenario, ggf. absolute oder relative Änderung) in der unteren Zeile.

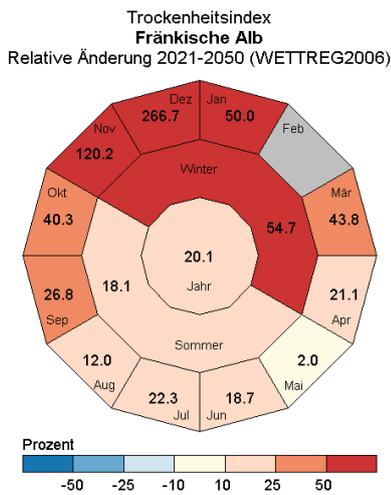
Ein Ringdiagramm besteht aus drei konzentrischen Bereichen. Der äußere Bereich mit 12 Feldern stellt mittlere Werte der einzelnen Monate dar, der mittlere Ring mit 2 Feldern repräsentiert den mittleren Wert für das hydrologische Sommer- und Winterhalbjahr, und das innerste Feld zeigt den Wert für das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



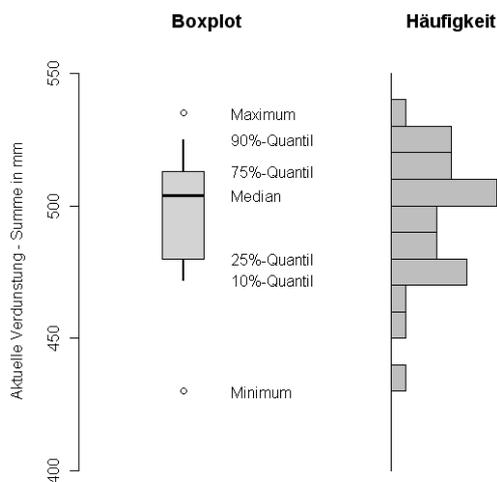
vorgegangen. Hier steht der Wert für das mittlere Wasseräquivalent des Schneespeichers im jeweiligen Zeitraum.



Die Farben der Felder entsprechen stets der Skala am unteren Rand des Diagramms und beziehen sich immer auf Monatsmittelwerte. Eine mittlere Jahresverdunstung von 522 mm fällt in die Klasse "30 bis 45 mm/Monat" ($522/12 = 43.5$), 156 mm im Winterhalbjahr entsprechen einem mittleren Monatswert von 26 mm.

Bei den Größen Trockenheitsindex und Wasseräquivalent der Schneedecke treten bei der Berechnung von relativen Änderungen Nulldivisionen auf (Wert für Ist-Zustand 1971-2000 = Null). 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 Boxplot?



Ein Boxplot dient zur grafischen Darstellung der Verteilung von Daten, wobei auf robuste Lage- und Streumaße wie die Quantile der Verteilung zurückgegriffen wird. Die "Box" umfasst den Bereich zwischen dem 25%-Quantil und dem 75%-Quantil (den sogenannten "Interquantilabstand"), also die mittleren 50% aller Werte des Datensatzes. Der Median wird mit einer horizontalen Linie in die Box eingezeichnet; eine Hälfte aller Werte befindet sich oberhalb, die andere unterhalb des Medians.

Für die senkrechten Linien ("Whisker", also "Schnurrhaare" genannt) gibt es keine einheitliche Konvention. Hier wurden die Enden der Linien durch das 10%-Quantil und das 90%-Quantil begrenzt, 80% aller Werte des Datensatzes liegen also innerhalb des von den senkrechten Linien und der Box aufgespannten Bereichs.

Der kleinste und größte Wert des Datensatzes wird zusätzlich in Form eines Kreissymbols im Diagramm markiert.

Zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen der Werteverteilung und ihren Lagemaßen ist in diesem Beispieldiagramm der Datensatz (hier: Jahressummen der tatsächlichen Verdunstung) links als Boxplot und rechts als Häufigkeitsverteilung dargestellt.

Bisher erschienene KLIWA-Berichte

Herausgeber: Arbeitskreis KLIWA

(Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg;

Bayerisches Landesamt für Umwelt;

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
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.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>