
Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland

Abschätzung der Auswirkungen
auf den Wasserhaushalt

KLIWA-Projekt B 1.1.1/1.1.4

„Entwicklung und Vergleich regionaler Klimaszenarien“

KLIWA-Projekt B 2.4/2.5

*„Simulation des Abflusskontinuums und des Hochwasser-
abflusses mit regionalen Klimaszenarien“*

KLIWA-Berichte

Heft 9



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland

Abschätzung der Auswirkungen
auf den Wasserhaushalt

KLIWA-Projekt B 1.1.1

„Entwicklung regionaler Klimaszenarien“

KLIWA-Projekt B 1.1.4

„Vergleich regionaler Klimaszenarien“

KLIWA-Projekt B 2.4

*„Simulation des Abflusskontinuums mit regionalen
Klimaszenarien“*

KLIWA-Projekt B 2.5

*„Simulation des Hochwasserabflusses mit regionalen
Klimaszenarien“*

KLIWA-Berichte

Heft 9



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

IMPRESSUM

Herausgeber	Arbeitskreis KLIWA (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Deutscher Wetterdienst (DWD)) www.kliwa.de
Herausgabedatum	Mai 2006
ISBN	3-88251-305-5
Bearbeitung	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 43 Ingenieurbüro Dr. Ludwig, Karlsruhe
Redaktionelle Bearbeitung	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 43 Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 81
Umschlaglayout	Stephan Riedlberger - Graphik Design, München
Druck	Stork Druckerei GmbH, 76646 Bruchsal
Umwelthinweis	Druck auf Recyclingpapier
Bezug über	Vertragsauslieferung der LUBW bei der JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim, Telefax: (0621)-398-370

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

Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland

Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

Inhaltsverzeichnis	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	5
1 EINFÜHRUNG	9
2 ENTWICKLUNG VON REGIONALEN KLIMASZENARIEN	13
2.1 Rahmenbedingungen für die Klimaszenarien	13
2.2 Methode des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung (PIK-Modell)	15
2.3 Methode Meteo-Research (MR-Modell)	16
2.4 Methode des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-Modell).....	18
3 AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE DER KLIMASZENARIEN	20
3.1 Grundlagen der vergleichenden Auswertung	20
3.3 Regionenspezifische Auswertung der Klimaszenarien des MR-Modells.....	28
3.5 Vergleichende Auswertung der Klimaszenarien.....	41
4 BEWERTUNG DER METHODEN UND ERGEBNISSE SOWIE FOLGERUNGEN FÜR KLIWA	50
4.1 Bewertung aus klimatologischer Sicht.....	50
4.2 Bewertung aus hydrologischer Sicht	53
4.3 Zusammenfassende Bewertung der Methoden und Ergebnisse.....	55
4.4 Folgerungen für KLIWA.....	56
5 DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE	58
5.1 Hydrometeorologische Ergebnisse	58
5.1.1 Spannweite der Lufttemperaturen und der Niederschläge	58
5.1.2 Veränderung der Lufttemperatur	61
5.1.3 Veränderung der Niederschläge	70
5.1.4 Veränderung von extremen Trocken- und Nassperioden.....	73
5.1.4.1. Trockentage	73
5.1.4.2. Extreme Trockenperioden	74
5.1.4.3. Tage mit hohen Niederschlägen	74
5.1.4.4. Extreme Nassperioden.....	75
5.1.5 Frostzeiten und Schneeschmelze	75
5.2 Hydrologische Ergebnisse.....	77
5.2.1 Modellierung der Abflüsse mit Wasserhaushaltsmodellen	77
5.2.2 Änderungen der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse (MoMnQ).....	79
5.2.3 Änderungen der monatlichen mittleren Abflüsse (MoMQ).....	81
5.2.4 Änderungen der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse (MoMHQ).....	83
5.3 Ableitung von Klimaänderungsfaktoren.....	85
5.3.1 Klimaänderungsfaktor Hochwasser.....	85
5.3.2 Klimaänderungsfaktor Niederschlag	88
6 AUSBLICK	90
7 LITERATUR	93
8 VERZEICHNISSE	96
8.1 Abbildungsverzeichnis.....	96
8.2 Tabellenverzeichnis.....	100

Zusammenfassung



Abb. Z-1: Deutschland aus dem All

Die bereits bestehenden Veränderungen im regionalen Klima von Süddeutschland der letzten Jahrzehnte wurden im Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durch Untersuchungen langer Messreihen nachgewiesen.

Ein wesentliches Ziel von KLIWA ist, für die nächsten Jahrzehnte (Zielhorizont: Jahr 2050) möglichst gesicherte Aussagen über die zukünftigen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt zu erhalten.

Für diese Abschätzung wurden geeignete regionale Klimaszenarien erstellt. Grundlage bildeten die Berechnungsergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM4 unter Annahme eines realitätsnahen Emissionsszenarios. Da es derzeit noch kein optimales Verfahren für die Erstellung regionaler Klimaszenarien aus globalen Klimamodellen gibt, wurden mit drei unterschiedlichen Methoden Klimaszenarien für Süddeutschland berechnet:

- mit dem statistischen Verfahren des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK-Modell),
- mit dem statistisch-dynamischen Verfahren (unter Berücksichtigung von Wetterlagen) von Meteo-Research (MR-Modell),
- mit dem regionalen dynamischen Klimamodell REMO des Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-Modell).

Die Ergebnisse der drei Arbeitsgruppen wurden auf neun Regionen in Bayern und Baden-Württemberg bezogen einheitlich ausgewertet und dargestellt. Dabei wurden insbesondere die hydrologisch als besonders wichtig erachteten Ergebnisse für die mittlere Lufttemperatur sowie für die Niederschlagshöhe verglichen. Betrachtet wurde zunächst, wie gut die Simulation der Jahre 1971-2000 (Ist-Zustand) mit den Messwerten übereinstimmt. Anschließend wurden die Veränderungen zwischen der Simulation des Ist-Zustands und der Jahre 2021-2050 als zukünftig erwarteter Zustand (Zukunftsszenario) analysiert.

Simulation des Ist-Zustands:

Die Simulation des Ist-Zustandes beim MR-Modell stimmt im Allgemeinen gut mit den Messwerten überein. Beim PIK-Modell liegt keine Simulation für den Ist-Zustand vor. Die Simulation des Ist-Zustands beim MPI-Modell weicht von den Messwerten ab. Dies ist auf den starken Einfluss des globalen Klimamodells zurückzuführen, mit dem das MPI-Modell angetrieben wird. Das Globalmodell weist bei der Simulation des Ist-Zustands noch Schwächen auf.

Zukunftsszenario Lufttemperatur:

Im Jahresdurchschnitt werden für das Zukunftsszenario des MPI-Modells die stärksten Temperaturzunahmen (ca. 1,8 bis 1,9°C) simuliert.



Ebenfalls starke Zunahmen mit ca. 1,6 bis 1,8°C im Jahresdurchschnitt werden vom MR-Modell simuliert. Das PIK-Modell übernimmt die Zunahme der Lufttemperatur, die für das Zukunftsszenario des globalen Klimamodells ECHAM4 ermittelt wurde, in seine Ergebnisse. Dadurch ergibt sich eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur um ca. 1,1°C.

Für das hydrologische Sommerhalbjahr des Zukunftsszenarios simulieren die statistischen Modelle (PIK und MR) Temperaturzunahmen von ca. 1,1 bis 1,4°C. Beim MPI-Modell liegt die Temperaturzunahme mit 1,6 bis 1,7°C noch höher.

Für das hydrologische Winterhalbjahr ergeben sich sowohl mit dem MR-Modell als auch mit dem MPI-Modell Temperaturzunahmen von ca. 2°C. Beim PIK-Modell liegen die für den Winter vorhergesagten Temperaturzunahmen mit ca. 1°C deutlich niedriger.

Zukunftsszenario Niederschläge:

Die simulierten Veränderungen der mittleren Jahresniederschläge sind beim PIK-Modell und beim MPI-Modell gering. Beim PIK-Modell ergeben sich die stärksten Zunahmen mit maximal 7,5% (ca. 90 mm) je Jahr in der Region „Rhein“. In den zwei Alpenregionen treten beim PIK-Modell sogar Abnahmen auf. Die relativ geringen Zunahmen beim MPI-Modell liegen zwischen 0,5% (ca. 6 mm) für die Region „Westalpen“ und 6,7% (ca. 76 mm) für die Region „Bayerische Mittelgebirge“.

Die stärksten Zunahmen bei den mittleren Jahresniederschlägen mit durchschnittlich ca. 15% ergeben sich beim MR-Modell. Diese Zunahme beträgt zwischen ca. 4% (31 mm) für die Region „Mittlere Donau“ und ca. 17% (121 mm) für die Region „Unterer Main“. Nur für die Region „Ostalpen“ ergeben sich geringe Abnahmen (-0,6%).

Vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr werden mit dem MR-Modell erhebliche Zunahmen der Niederschlagshöhen simuliert, die je nach Region zwischen etwa 10 und 34% liegen. Beim PIK- und beim MPI-



Abb. Z-2: Künftig mehr Regen als Schnee?

Modell werden für den hydrologischen Winter hingegen kaum veränderte Niederschlagshöhen simuliert; in einigen Regionen treten im Winterhalbjahr sogar Abnahmen auf.

Im hydrologischen Sommerhalbjahr ergeben sich beim MR-Modell meistens Abnahmen der Niederschläge. Beim PIK- und MPI-Modell treten im Sommerhalbjahr hingegen bei fast allen Regionen Zunahmen auf, die z.T. mehr als 10% betragen. Die Spannweite der simulierten Niederschlagszunahme beim MPI-Modell reicht im hydrologischen Sommerhalbjahr von ca. 4% bei der Region „Westalpen“ bis ca. 9,3% bei der Region „Donau und Bodensee“. Damit liegt der Wertebereich der Zunahmen im Sommer höher als der Wertebereich für den hydrologischen Winter (minimal -3,3% bei „Westalpen“ bis maximal 5,3% bei „Unterer Main“).

Bewertung der Klimaszenarien:

Die Ergebnisse der einzelnen Verfahren weisen teilweise eine erhebliche Bandbreite auf. Die durchgeführte Bewertung der Verfahren im Hinblick auf klimatologische und hydrologische Kriterien ergab Folgendes:

- Derzeit erscheinen die Ergebnisse der Klimaszenarienrechnungen nach dem MR-Modell für das Zukunftsszenario am wahrscheinlichsten, da sie tendenziell mit den aus den Langzeituntersuchungen abgeleiteten Ergebnissen übereinstimmen. Auch treten beim MR-Modell nur geringe Differenzen zwischen simuliertem Ist-Zustand und den Messdaten der mittleren Lufttempera-

tur und Niederschlagshöhe auf. Weiterentwicklungen des Verfahrens sind wünschenswert.

- Mittelfristig wird die dynamische regionale Modellierung (u.a. REMO) am besten geeignet sein, um die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt genügend genau quantifizieren zu können. Allerdings werden für REMO noch intensive Entwicklungen hinsichtlich der Anpassungsgüte ebenso wie für die globale Modellierung notwendig sein.
- Die Ergebnisse des PIK-Modells geben auf Grund der verfahrensbedingten Einschränkungen die untere Grenze möglicher regionaler Auswirkungen der Klimaveränderung wieder.

Ergebnisse des MR-Modells:

Auf Grund dieser Bewertung werden im Rahmen von KLIWA derzeit mit Priorität die Ergebnisse des MR-Modells den weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt.

Dabei zeigt sich, dass die Anzahl der Sommertage (Tage mit $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) deutlich steigen wird. Auch die Anzahl der heißen Tage (Tage mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) wird teilweise um nahezu das Doppelte zunehmen. Gleichzeitig wird infolge der Klimaerwärmung die Zahl der Frosttage (Tage mit $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) und auch die Zahl der Eistage (Tage mit $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) deutlich abnehmen, letztere größtenteils um mehr als die Hälfte.

Spätfröste im Frühjahr können je nach Zeitpunkt große Schäden in der Landwirtschaft verursachen. Auf Grund der erwarteten Erwärmung wird der letzte Frost im Frühjahr im Mittel früher auftreten als derzeit, so dass sich für die Landwirtschaft die Gefahr von Frostschäden verringern könnte.

Für die Landwirtschaft ist bedeutsam, dass künftig die Anzahl der Trockenperioden pro Jahr (mindestens 11 aufeinander folgende Tage mit einem Niederschlag von weniger als 1 mm) abnimmt. Ebenso wird die Anzahl der Trockentage (Niederschlag weniger als 1 mm) geringer.



Abb. Z-3: Niedrigwasser im Sommer

Auswirkungen auf die Abflüsse:

Der Klimawandel wirkt sich auch auf die Gewässer aus. Die Ergebnisse des regionalen Klimaszenario des MR-Modells wurden als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodelle genutzt, um den Einfluss der Klimaveränderung auf die Abflüsse mit Hilfe von statistischen Berechnungen (Regimekurven, Extremwertstatistik) abzuschätzen.

Die monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse werden sich im Zukunftsszenario für das Winterhalbjahr erhöhen, so dass die Situation für die gerade im Winterhalbjahr stattfindende Grundwasserneubildung sich nicht verschlechtern wird. Aber gleichzeitig wird eine deutliche, regional unterschiedliche Abnahme der Niedrigwasserabflüsse im Sommerhalbjahr berechnet. Auch wenn im Jahresmittel die Trockenperioden nicht zunehmen, scheint eine zukünftige Verschärfung der Niedrigwasserproblematik im Sommer v.a. in weiten Teilen Baden-Württembergs wahrscheinlich.

Die Auswertungen zeigen zudem, dass die Hochwasserabflüsse vor allem im Winterhalbjahr an fast allen Pegeln Baden-Württembergs sowie auch in Bayern zunehmen werden. Dabei treten ebenfalls regionale Unterschiede auf. Bei der Bemessung neuer wasserwirtschaftlicher Anlagen ist es daher aus heutiger Sicht notwendig, die Auswirkungen des Klimawandels durch einen „Klimaänderungsfaktor“ zu berücksichtigen.

Dies geschieht durch eine Erhöhung des Bemessungswerts wie z.B. des hundertjährigen Hochwasserabflusses HQ_{100} . Der



Abb. Z-4: Hochwasser im Februar 1990 an der Donau bei Riedlingen

Klimaänderungsfaktor wurde in Bayern einheitlich für das HQ_{100} auf 15 % festgelegt. In Baden-Württemberg erfolgte eine regional unterschiedliche Bestimmung des Klimaänderungsfaktors, der für unterschiedliche Wiederkehrintervalle des Hochwassers differenziert wird.

Ausblick:

Da sowohl die globale Klimamodelle als auch die Verfahren zur Erstellung der regionalen Klimaszenarien kontinuierlich weiterentwickelt werden, sind die vorgestellten Ergebnisse bei Vorliegen verbesserter Verfahren weiter fortzuschreiben.

1 Einführung



Abb. 1-1: Globales System Erde

Das Klima unterliegt natürlichen Schwankungen, die bezogen auf unterschiedliche Zeitskalen der Erdgeschichte unterschiedlich stark ausfallen. Die etwa seit Mitte des 20. Jahrhunderts deutliche Zunahme der globalen Lufttemperatur ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die anthropogen bedingte Freisetzung von Treibhausgasen zurückzuführen. Diese Klimaänderung ist nachgewiesen; sie bildet sich bereits jetzt in Messdaten ab. Sie hat Folgen für den globalen Wasserkreislauf mit regional unterschiedlichen Auswirkungen.

Die regionalen Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland werden im Vorhaben KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) untersucht.

Da in der Bewertung und Beurteilung über das Ausmaß der zukünftigen regionalen Entwicklung des Wasserkreislaufs noch erhebliche Unsicherheiten bestehen, wurden innerhalb des KLIWA-Vorhabens verschiedene Klimaszenarien entwickelt. Aus diesen Klimaszenarien können Aussagen über die möglichen Veränderungen der hydrometeorologischen Größen und deren Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft für die

nächsten Jahrzehnte abgeleitet werden. Im vorliegenden KLIWA-Heft werden der derzeitige Stand der Entwicklung von regionalen Klimaszenarien für Süddeutschland und deren Ergebnisse zusammengefasst.

Um die bereits bestehenden Trends der Klimaänderung zu identifizieren und um deren Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft zu untersuchen, bietet die Analyse des Langzeitverhaltens bisher beobachteter hydrometeorologischer Daten eine wichtige Grundlage. Für Süddeutschland im Rahmen von KLIWA durchgeführte Studien zeigen, dass sich die klimatischen Bedingungen im vergangenen Jahrhundert und zwar insbesondere während der letzten drei Jahrzehnte erkennbar verändert haben [13, 35]. Die gefundenen Veränderungen überschreiten regional-spezifisch und jahreszeitenunabhängig die bisher aus langen Zeitreihen bekannte Schwankungsbreite bei einigen Untersuchungsgrößen. Allerdings sind diese Trends nicht direkt in die Zukunft extrapolierbar, da es sich bei den Klimaprozessen und ihren komplexen Wechselwirkungen um nichtlineare und möglicherweise zeitlich befristete Prozesse handelt.

Daher sind zur Modellierung der zukünftigen Entwicklungen Klimamodelle erforderlich, denen zur Prognose des Klimas definierte Randbedingungen zu Grunde gelegt werden. Solche Klimamodelle basieren auf einem Atmosphärenmodell, wie es auch zur numerischen Wettervorhersage verwendet wird. Dieses Modell wird jedoch für die Klimamodellierung erweitert, um alle physikalischen Erhaltungsgrößen korrekt abzubilden. In der Regel wird dabei ein Ozeanmodell, ein Schnee- und Eismodell und ein Vegetationsmodell mit dem Atmosphärenmodell zu einem **globalen Klimamodell (GCM)** gekoppelt.

Mathematisch entsteht dadurch ein gekoppeltes System von nichtlinearen Differentialgleichungen sowie algebraischen Gleichungen. Die numerische Berechnung dieses Gleichungssystems erfordert eine sehr große Rechenleistung, wie sie nur von Supercomputern bereitgestellt wird.

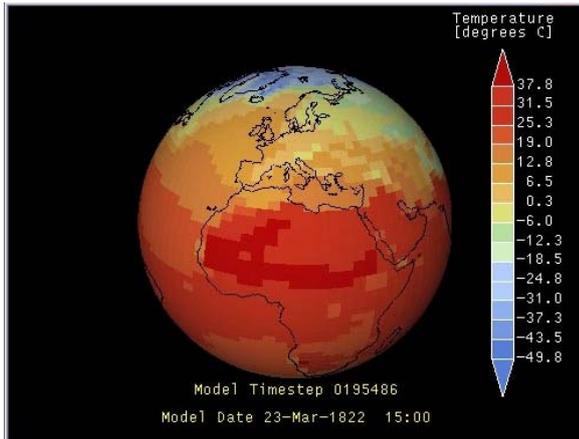


Abb. 1-2: Simulation der Lufttemperatur mit globalen Klimamodellen

Ein globales Klimamodell beschreibt die wichtigsten klimarelevanten physikalischen Vorgänge in der Erdatmosphäre, den Ozeanen und auf der Erdoberfläche. Mit solchen voll gekoppelten Atmosphären/Ozean/Land-Modellen können die relevanten Klimaprozesse auf der Erde modelliert werden. Dabei wird die Erde in Modellelemente einer bestimmten räumlichen Auflösung unterteilt und für jedes dieser Modellelemente werden die Berechnungen durchgeführt. Die Simulationsläufe der GCM werden mit bestimmten Emissionsszenarien für die Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolteilchen durchgeführt.

Allerdings sind die GCM auf Grund der komplexen Prozesse und der zur Verfügung stehenden Computerkapazitäten in ihrer räumlichen Modellauflösung limitiert. So liegen z.B. die Ergebnisse des gekoppelten globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC¹ des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI), welche im Rahmen des KLIWA-Projekts verwendet werden, nur mit einem horizontalen Gitterabstand von ca. 250 km vor. Ein Gebiet wie z.B. Europa wird damit nur sehr vergrößert repräsentiert (vgl. Abb.1-3 Mitte).

Zudem können bei einem solchen Gitterabstand atmosphärische Strukturen erst ab einer Wellenlänge von ca. 1.000 km aufgelöst werden. Auch die Topographie der Erdoberfläche wird damit nur recht ungenau

dargestellt. Die Alpen zum Beispiel stellen in diesen Modellen eine unrealistisch flache Erscheinung mit einer Höhe von nur etwa 1.000 m dar. Damit wird deren große Bedeutung im regionalen Klima und für den Wasserkreislauf nicht realistisch wiedergegeben [32].

Für die Erstellung von Klimaszenarien auf der regionalen Skala müssen daher globale Klimamodelle und Regionalisierungsverfahren zusammen eingesetzt werden.

Bei den Regionalisierungsverfahren erfolgt ein Downscaling, also ein Herunterskalieren der globalen Antriebsdaten des GCM auf eine feinere regionale Auflösung. Dabei wird zwischen statistischen Verfahren und dynamischen regionalen Klimamodellen unterschieden:

- Die **statistischen Methoden** gehen z.B. davon aus, dass zwischen der großräumigen Druck- und Temperaturverteilung über dem Nordatlantik und Europa und den Witterungsgrößen an ausgewählten Standorten statistische Beziehungen bestehen. Diese können für das gegenwärtige Klima aufgrund von Messdaten bestimmt werden. Auf dieser Grundlage werden dann die GCM-Ergebnisse in Form von Temperatur- und Niederschlagsverläufen auf einzelne, regional höher aufgelöste Gebiete abgebildet.

Statistische Regionalisierungsverfahren setzen somit voraus, dass die am historischen Datenmaterial gewonnenen Informationen zwischen großräumigen Feldern (z.B. Druckverteilungen) und lokalen Wetterelementen auf die Klimamodellsimulationen mit dem GCM für das Zukunftsszenario angewendet werden dürfen.

- **Dynamische Regionale Klimamodelle (RCM)** basieren auf den gleichen Prinzipien wie GCM, aber sie betrachten lediglich einen Ausschnitt auf der Erde. Daher benötigen sie zur Simula-

¹ ECHAM/OPYC: European Center for Medium-Range Weather Forecasts Model, modified in HAMBURG / Isopycnal Ocean Model [29]

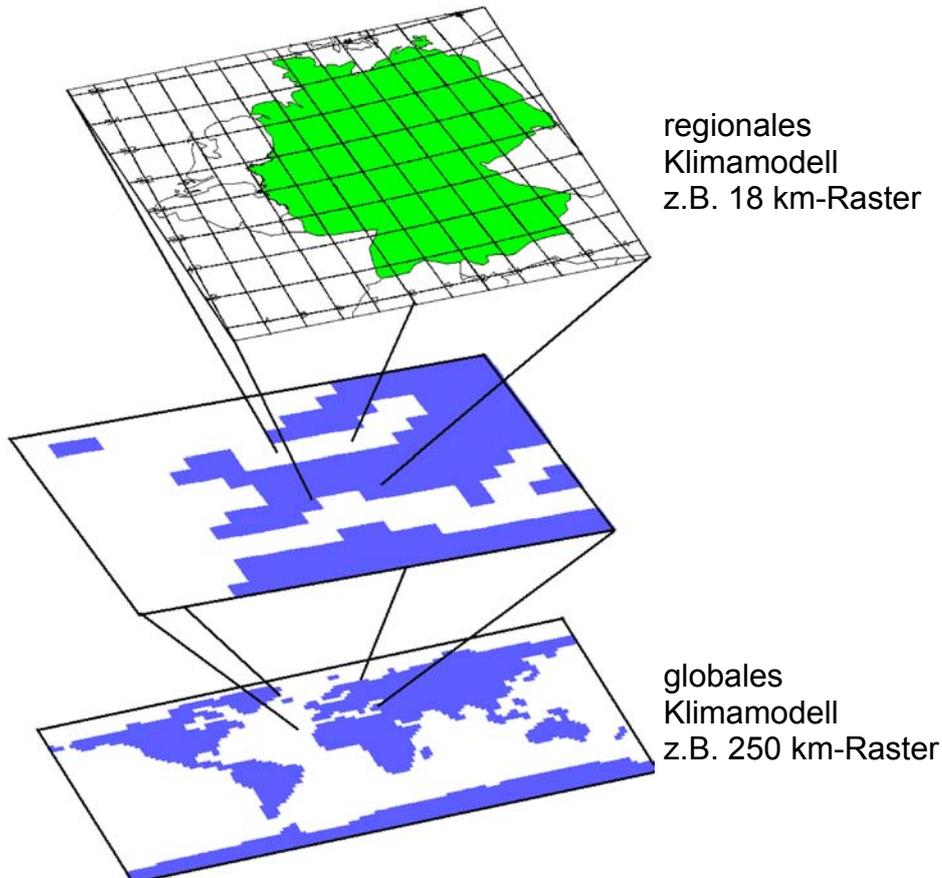


Abb. 1-3: Darstellung des Downscaling aus einem GCM zu einem RCM [36]

tion geeignete Randbedingungen an den Rändern des Modellgebietes. Typischerweise wird dabei von den regionalen Klimamodellen ein Gebiet wie z.B. Europa mit einer horizontalen Skala von 1.000 bis 5.000 km Seitenlänge abgedeckt.

Der Antrieb eines RCM an den seitlichen Modellrändern erfolgt mit den Ergebnissen aus dem GCM, wodurch das regionale Klimamodell dann eine höhere Auflösung als das übergeordnete globale Modell hat. Wird solch eine eingebettete („genestete“) Modellkette mehrmals verwendet (also von einem GCM zu einem RCM mit grober Auflösung, dann zu einem RCM mit feiner Auflösung), so kann die räumliche Auflösung über der betrachteten Region schrittweise erhöht werden.

Großräumige Modellfehler im zugrunde gelegten globalen Klimamodell (zum Beispiel in Bezug auf die Lage und Amplitude von Zugbahnen von Tiefdruckgebieten

(Stormtracks)) haben Einschränkungen für die nachfolgende dynamische regionale Klimamodellierung zur Folge, denn Änderungen oder Fehler in der synoptischen Klimatologie pflanzen sich fort und wirken sich direkt auf die Modellgüte der RCM aus. Die Realitätsnähe der RCM ist damit entscheidend von der Güte der GCMs abhängig.

Aber auch die statistischen regionalen Klimamodelle setzen auf den Ergebnissen der GCM auf, so dass auch statistisch basierte Regionalisierungsverfahren ungenaue Ergebnisse liefern, wenn die globalen Klimasimulationen nicht präzise sind. Je nach Verfahren (Leitgröße Temperatur oder Wetterlagen) wird die Information aus dem GCM jedoch im Vergleich zu den RCM mit einer geringeren Intensität genutzt, so dass damit der Fehlereinfluss des GCMs auf die regionalen Klimaszenarien geringer wird.

Im September 2005 wurden vom Max-Planck-Institut für Meteorologie die neuen Ergebnisse mit dem Nachfolgemodell von ECHAM4/OPYC, dem globalen Klima-



Modell ECHAM5/MPI-OM, der Öffentlichkeit als deutscher Beitrag zum nächsten IPCC-Bericht vorgestellt. Hier zeigten sich Verbesserungen in der Abbildung des Wasserkreislaufes auf der Skala des GCMs. Damit wird deutlich, dass die Weiterentwicklung globaler wie regionaler Klimamodellierung einen kontinuierlichen Prozess darstellt, der durch die rechenzeitintensiven Simulationen eng an die Weiterentwicklung der Rechnerkapazitäten gekoppelt ist.

Sowohl bei globalen als auch bei statistischen und dynamischen regionalen Klimamodellen werden trotz einiger prinzipieller Schwierigkeiten große Anstrengungen zu deren Verbesserung unternommen, die in den letzten Jahren auch zu viel versprechenden Fortschritten führten.

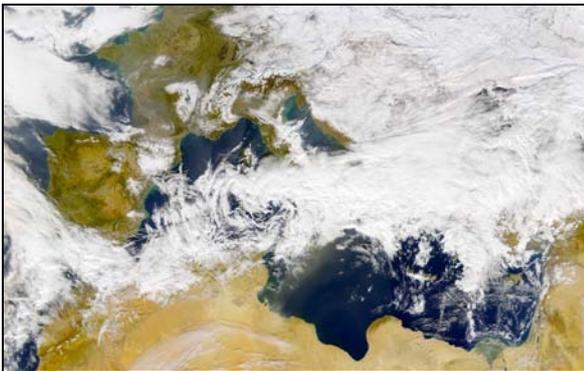


Abb. 1-4: Tiefdruckgebiete über Europa im Winter

Abschließende Antworten zum genauen Umfang der Auswirkungen der Klimaänderung werden nicht in bereits wenigen Jahren vorliegen, sondern die Beantwortung dieser Fragen wird viele Jahre in Anspruch nehmen. Dabei ist die Kompetenz und die Zusammenarbeit zahlreicher Wissensgebiete

erforderlich.

Im Bereich der Wasserwirtschaft ist es wegen des Besorgnisgrundsatzes, der langfristigen Auswirkungen bzw. der langen Lebensdauer wasserwirtschaftlicher Anlagen und der damit verbundenen hohen Investitionskosten nicht zweckmäßig, so lange mit ersten Anpassungsmaßnahmen zu warten.

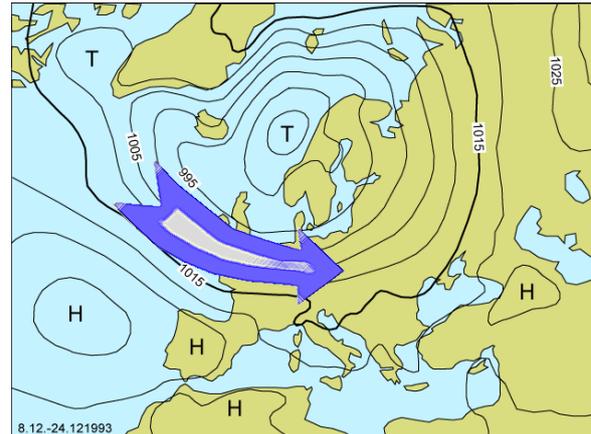


Abb. 1-5: Wetterlage „Westlage zyklonal“

Da nach der im Rahmen von KLIWA veranlassten Studie [31, 32] derzeit kein gesichertes Verfahren für die Ermittlung von regionalen Klimaszenarien vorliegt, hat man sich im Rahmen von KLIWA entschieden, für die Region Süddeutschland (insbesondere Baden-Württemberg und Bayern) mit drei verschiedenen Verfahren Klimaszenarien durch namhafte Forschungsinstitute ermitteln zu lassen, um eine Bandbreite möglicher Entwicklungen durch die Klimaänderung zu erhalten. Dafür wurden die Jahre 2021 bis 2050 als Untersuchungszeitraum festgelegt.

2 Entwicklung von regionalen Klimaszenarien

Zur Ermittlung von regionalen Klimaszenarien auf der Basis von Mess- und Beobachtungszeitreihen hydrometeorologischer Größen wurden ein statistisches Verfahren, ein statistisch-dynamisches Verfahren und ein dynamisches regionales Klimamodell herangezogen:

- Beim PIK-Modell (statistisches Modell, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, [11]) werden langjährige Beobachtungszeitreihen mit statistischen Methoden so aufbereitet, dass sie die vom Globalmodell berechneten Temperaturänderungen im Szenario wiedergeben.
- Mit dem MR-Modell (statistisch-dynamisches Modell, Fa. MeteorResearch, [8]) werden die regionalen Klimaänderungen mit Hilfe einer Wetterlagenklassifikation auf Basis der Ergebnisse des Globalmodells abgeleitet.
- Im MPI-Modell (dynamisches Modell, Max-Planck-Institut für Meteorologie in

Hamburg, [20]) wird das regionale Klimamodell REMO angewendet, welches in das Globalmodell eingebettet ist und von diesem mit den notwendigen Randbedingungen versorgt wird.

2.1 Rahmenbedingungen für die Klimaszenarien

Um möglichst einheitliche Voraussetzungen für die Berechnung der Klimaszenarien zu schaffen, erhielten die beteiligten Institutionen die folgenden Vorgaben:

- Im Rahmen des KLIWA-Projektes wurde 2002 entschieden, sich auf die Ergebnisse des international anerkannten, in Mitteleuropa entwickelten Modells ECHAM4 zu stützen. Somit setzen alle hier dargestellten regionalen Modelle und Verfahren auf den Ergebnissen des gekoppelten globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 in der horizontalen Auflösung T42 (ca. 250x250 km²) auf. Für die Simulation mit diesem GCM standen die sozioökonomisch

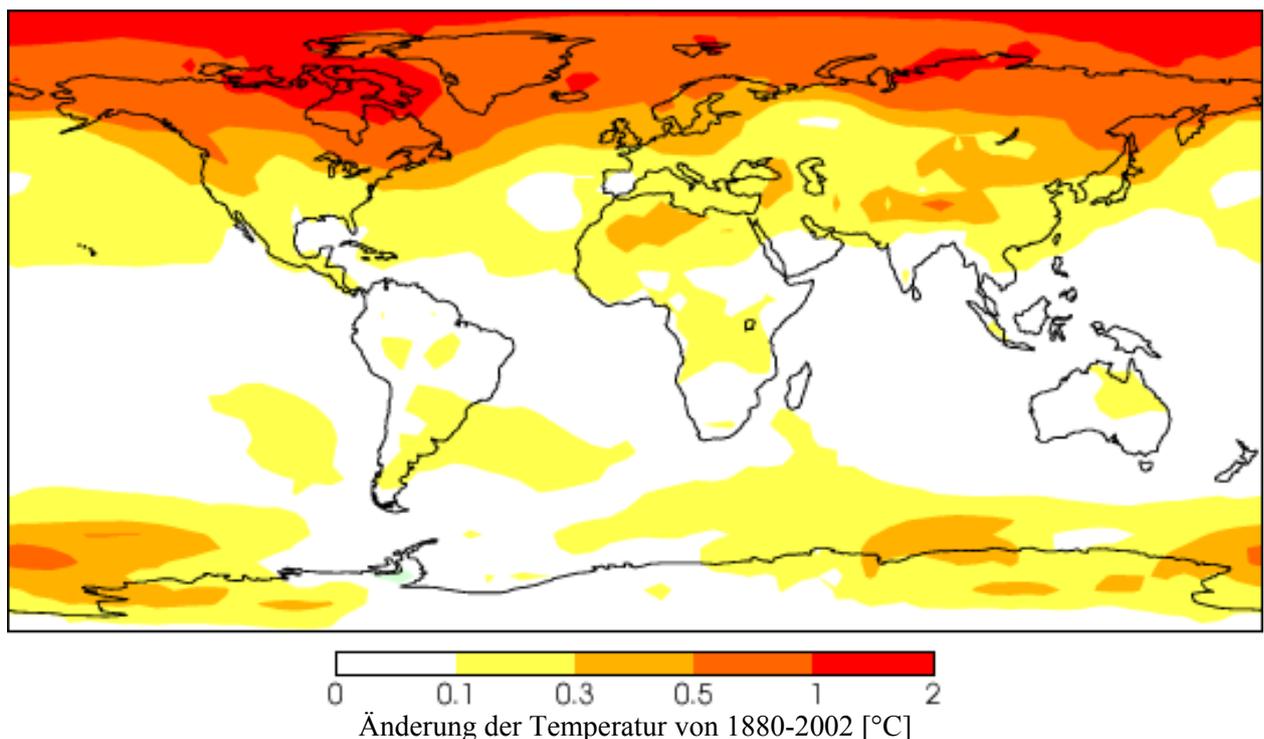


Abb. 2-1: Globale Temperaturveränderungen von 1880 bis 2002



und technologisch begründeten Emissionsszenarien (SRES-Szenarien) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für die zukünftige Konzentration der Treibhausgase und Aerosolteilchen zur Verfügung. Im KLIWA-Projekt wurde das Emissionsszenario B2 verwendet, welches eine Welt beschreibt, in der das Schwergewicht auf lokalen Lösungen hin zu wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit liegt. Unter Berücksichtigung einer eigenständigen Umweltpolitik bewegt sich die wirtschaftliche Entwicklung auf einem mittleren Niveau. Die CO₂-Konzentration wächst dabei bis 2050 etwa auf das 1,4-fache an. Dieses Szenario wurde für Europa als plausibel erachtet.

- Prinzipiell wäre die Verwendung von unterschiedlichen Emissionsszenarien aus der Simulation mit dem GCM wünschenswert, um die Spannweite regionaler Änderungen besser abschätzen zu können. Abbildung 2-2 zeigt die

Temperaturentwicklung unter Annahme unterschiedlicher Emissionsszenarien. Es wird deutlich, dass für den bei KLIWA definierten Zeitraum des Zukunftsszenarios (2021–2050) die prognostizierten Temperaturen der unterschiedlichen Szenarien sich auf einem engen Bereich erstrecken.

- Für den Zeitraum 1951 bis 2000 wurden für Süddeutschland geprüfte, vollständige (alle Parameter vorhanden) und lückenlose Datensätze von rund 70 Klimastationen und etwa 450 Niederschlagsstationen zur Verfügung gestellt. Sie umfassen die Größen Niederschlag, Lufttemperatur (T_{\max} , T_{mit} , T_{\min}), relative Luftfeuchte, Luftdruck, Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer, Dampfdruck, Bewölkungsgrad und Windgeschwindigkeit.
- Die Güte der regionalen Simulationen wird an Hand der Mess- und Beobachtungsdaten von 1971 bis 2000 verifiziert bzw. validiert. Dadurch werden die

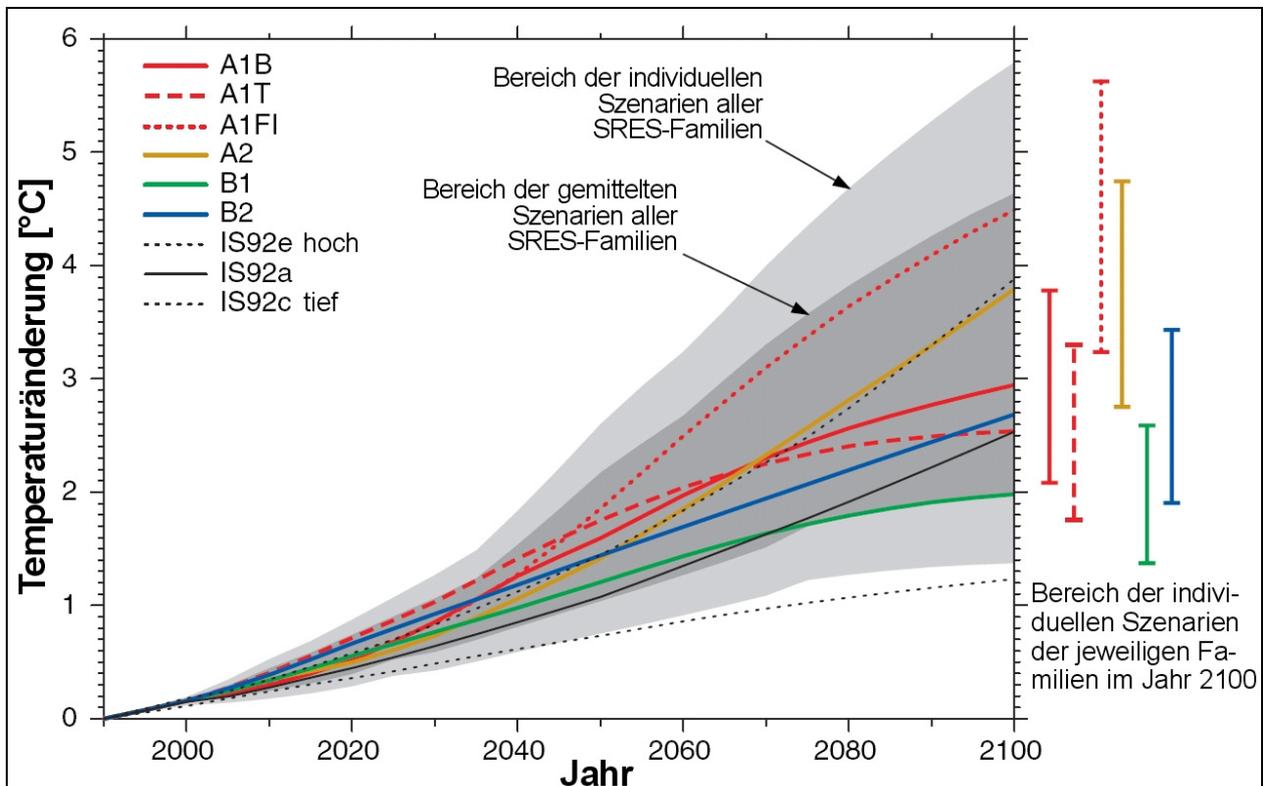


Abb. 2-2: Änderung der mittleren globalen Lufttemperatur (bezogen auf den Wert von 1990) nach den Emissionsszenarien des IPCC [17]

veränderten klimatischen Bedingungen der jüngsten Vergangenheit, insbesondere hinsichtlich der Temperaturerhöhungen und der Zunahme der Niederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr, berücksichtigt.

Beim Vergleich mit der parallel durchzuführenden Simulation des Ist-Zustands (1971 bis 2000) wird deutlich, wie gut die angewandte Methode das gegenwärtige Klima simulieren kann. Mit Hilfe dieser Simulation des Ist-Zustands werden gleichzeitig die Differenzen zum vorgesehenen Zeitraum des Zukunftsszenarios bestimmbar. Durch die Betrachtung der relativen Änderung zwischen simuliertem Ist-Zustand und Zukunftsszenario können systematische Fehler des globalen Klimamodells zum Teil ausgeglichen werden.

- Für die Verifikation werden statistische Kennzahlen zu den Mittel- und Extremwerten, zur Schwellenwertüber- bzw. -unterschreitung sowie zum Andauerverhalten für hydrologische Halbjahre der o.a. hydrometeorologischen Größen festgeschrieben.
- Für den Vergleich der regionalen Klimaszenarien für das Zukunftsszenario wird ein einheitlicher, in der näheren Zukunft liegender Zeithorizont von 2021 bis 2050 vorgegeben.
- Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen werden als Zeitreihen von Tageswerten der hydrometeorologischen Größen bereitgestellt. Eine Ausnahme ist die dynamische Modellierung (Modell REMO, MPI), die stündliche Auflösungen liefert.

Die drei eingesetzten Verfahren werden im folgenden kurz erläutert.

2.2 Methode des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung (PIK-Modell)

Das statistische Downscaling im PIK-Modell [11] nutzt allein den vom globalen Klimamo-

dell ECHAM4/OPYC3 prognostizierten (relativ sicheren) Temperaturtrend in seiner großräumigen Verteilung. Mit Hilfe von Clusteranalysen wird über die Leitgröße Temperatur ein Zusammenhang mit den Feldverteilungen der bisherigen anderen hydrometeorologischen Beobachtungen und Messungen (1951 bis 2000) hergestellt (Abb. 2-3).

Datenbasis sind die mehrfach überprüften, vollständigen (alle Parameter vorhanden), lückenlosen und vom PIK homogenisierten Datensätze von 68 Klimastationen. Um eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Sicherheit des Eintretens der simulierten Klimaveränderungen zu treffen, werden mittels einer Monte-Carlo-Simulation 100 Simulationsläufe (Realisierungen) sowohl für das jetzige Klima des Ist-Zustands als auch für das Zukunftsszenario durchgeführt.

Grundannahme ist die regional korrekte Wiedergabe großräumiger (im GCM simulierter) Änderungen meteorologischer Größen (speziell der langjährigen Mittelwerte der Temperatur). Der abgeleitete Temperaturtrend für den Zeitraum 2001-2055 beträgt für Süddeutschland: $1,35^{\circ}\text{C}$ (T_{\max}), $1,21^{\circ}\text{C}$ (T_{mit}) und $1,14^{\circ}\text{C}$ (T_{\min}). Der entsprechende Trend wird auf eine per Zufallszahlengenerator (unter Berücksichtigung der interannuellen Variabilität und des Ranges) erzeugte Rekombination der Jahresmittelwerte aufgeprägt.

Für die gemessenen Tageswerte (Tagesmitteltemperatur) eines jeden Jahres werden die Abweichungen vom Jahresmittelwert ermittelt. Diese werden unter Beachtung der Rangfolge zufällig ausgewählter Jahre der simulierten Zeitreihe der Jahresmittel zugeordnet. Die Tageswerte dieser simulierten Zeitreihe ergeben sich also als Summe von Jahresmittel, Änderungswert (Jahrestrend) und Tageswerteabweichung.

Die simulierte Zeitreihe wird im Vergleich mit den Messwerten korrigiert, um den Erhalt statistischer Charakteristika zu gewährleisten.

Zwischenergebnis ist eine simulierte Zeitreihe von Tageswerten der Tagesmitteltem-

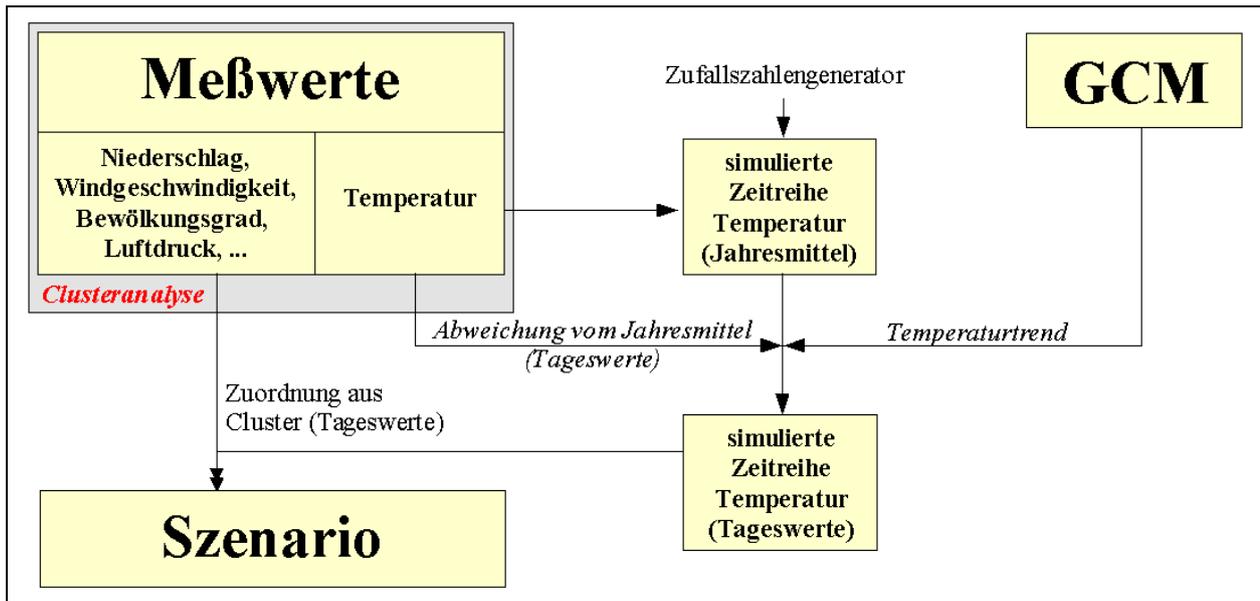


Abb. 2-3: Vereinfachte schematische Darstellung des PIK-Modells [4]

peratur. Die Zeitreihe der Messdaten wird anhand von temperaturbezogenen Parameterkombinationen (Tagesmittel, Tagesamplitude, astronomisch mögliche Sonnenscheindauer, Temperaturverhalten der Vortage) einer Clusteranalyse unterzogen und die Tageswerte in Cluster ähnlicher Tage aufgeteilt.

Für die simulierte Zeitreihe werden die temperaturbezogenen Parameterkombinationen bestimmt. Über ein Distanzmaß erfolgt für jeden Tag der simulierten Zeitreihe aus dem nächstgelegenen Cluster der Zeitreihe der Messdaten die Wahl eines entsprechenden Tages 'bedingt zufällig' (unter Berücksichtigung der Verhältnisse des Vortages). Die meteorologischen Größen (Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Wind, usw. [ohne Temperatur]) dieses Tages (reale Messdaten) werden dem Tag der simulierten Zeitreihe zugeordnet.

Eine Clusterzuordnung ist immer möglich, selbst wenn der simulierte Tageswert außerhalb des Wertebereiches der Messwerte liegt. Somit bleiben (bis auf die Temperatur) alle meteorologischen Größen innerhalb des Wertebereiches der Messdaten.

Die bislang beschriebenen Arbeitsschritte werden für eine Bezugsstation (Station Gschwend), welche die mittleren klimati-

schen Verhältnisse der Region bestmöglich widerspiegelt, durchgeführt. Nachdem die Tageszuordnung von simulierter Zeitreihe und der Zeitreihe der Messwerte bekannt ist, wird eine Übertragung auf alle Stationen vorgenommen und somit die räumliche Konsistenz gewahrt. Durch erneute Rekombinationen der Jahresmittelwerte der Temperatur und Durchführung der nachfolgenden Arbeitsschritte können weitere Szenarienrealisationen erstellt werden.

Aus 100 Realisationen von Szenarien für zukünftige Verhältnisse wurden in Untersuchungen jeweils Szenarien ausgewählt, deren Rang dem Szenario für den Ist-Zustand entspricht, das die Messdaten am besten widerspiegelt. Die ausgewählte Realisation (das Zukunftsszenario) befindet sich im mittleren Bereich zwischen sehr feuchten bzw. sehr trockenen Realisationen.

2.3 Methode Meteo-Research (MR-Modell)

Im MR-Modell [8,9] werden über ein statistisch-dynamisches Downscaling aus Zeitreihen von Messdaten Szenarienzeitreihen erzeugt, die von globalen Klimamodellen simulierte regionale Änderungen (Häufigkeiten von Wetterlagen) wiedergeben (Abb. 2-4).

Als Datenbasis für Süddeutschland gehen die geprüften, vollständigen (alle Parameter vorhanden), lückenlosen Datensätze von etwa 70 Klimastationen und ca. 450 Niederschlagsstationen ein. Die Relationen zwischen den historischen Beobachtungen dieser lokalen meteorologischen Größen mit den gleichzeitig großräumig beobachteten Feldern (dreidimensionale Re-Analysen des NCAR (Nationales Zentrum für Atmosphärenforschung)) werden mit Hilfe von Regressionsanalysen ermittelt. Anschließend werden aus den simulierten großräumigen Feldern des GCM (ECHAM4/OPYC3) die Auswirkungen auf die lokalen meteorologischen Größen abgeleitet.

Dazu erfolgt zunächst eine objektive Wetterlagenklassifikation normierter Feldtypen. Es werden 10 Klassen von Wetterlagen für das Temperaturregime und 8 Klassen von Wetterlagen für das Feuchteregime der Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter unterschieden. Die Bestimmung der objektiven Wetterlagenklassifikation erfolgt über horizontale und vertikale Luftdruckdifferenzen sowie über die Rotationsrichtung der Luftpakete (Vorticity) und die relative Topographie verschiedener Höhenschichten in der Atmosphäre.

Die entsprechenden Klassen weisen eine

gute Übereinstimmung mit subjektiven (empirischen) Klassen (Niederschlagsklassen: „sehr trocken“ bis „sehr starker Niederschlag“, bzw. Temperaturklassen: „sehr extrem kalt“ bis „extrem warm“) auf.

Die Zeitreihen der Messdaten werden anhand der Leitgröße „Temperatur“ (d.h. jahresgangsbereinigte zeitlich geglättete Tagesmitteltemperatur - über alle Stationen gemittelt) in übernormal warme bzw. unternormal kalte Abschnitte unterteilt. Per Zufallsgenerator wird eine Neukombination der Witterungsabschnitte zu einer simulierten Zeitreihe unter bestmöglicher Annäherung an die vorgegebene Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen des Temperaturregimes (aus GCM abgeleitet) durchgeführt. Aufeinanderfolgende Wetterlagen (neu aneinander kombinierte Tage) müssen eine Übergangswahrscheinlichkeit von mehr als 10% aufweisen. Jeder Tag dieser simulierten Zeitreihe enthält eine Zuordnung zu Wetterlagen des Temperatur- und Feuchteregimes und den originalen Datumsbezug.

Der Jahresgang der meteorologischen Größen, der als Abweichung vom stationsspezifischen Jahresgang vorliegt, wird anschließend auf die simulierte Zeitreihe aufgeprägt. Die simulierten Werte liegen auf dieser Verarbeitungsstufe im Wertebereich der Mess-

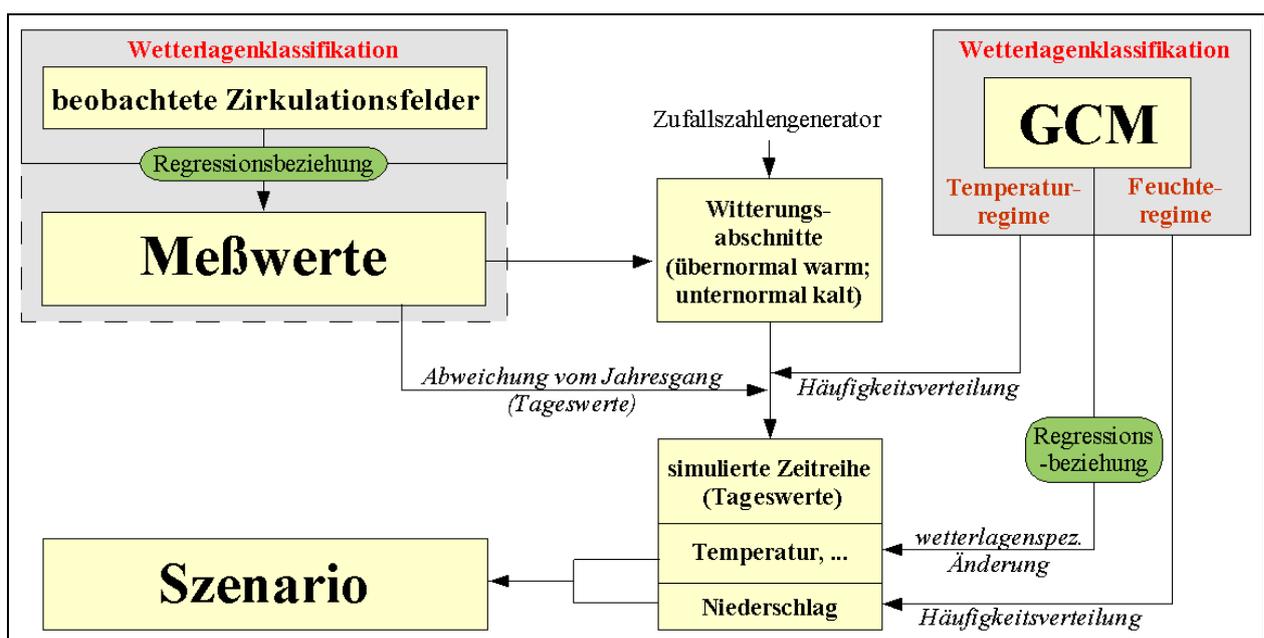


Abb. 2-4: Vereinfachte schematische Darstellung des MR-Modells [4]



werte, können jedoch eine andere Häufigkeitsverteilung annehmen.

Um höhere Extremwerte als in der Ist-Zeit zu ermöglichen, wird für alle meteorologischen Größen (bis auf den Niederschlag) eine wetterlagenspezifische Änderung auf die simulierte Zeitreihe aufgeprägt. Diese Änderung wird an einem repräsentativen Gitterpunkt des GCM als Änderung der großräumigen Felder der entsprechenden Dekade in Relation zur Dekade 2001 bis 2010 mittels Regressionsbeziehungen bestimmt.

Für den Niederschlag erfolgt eine Anpassung der mittleren Verteilung der Niederschlagsklassen des Temperaturregimes an die Häufigkeitsverteilung des Feuchteregimes (Anpassung, gesondert für jede Dekade und jeden Simulationslauf) für das gesamte Untersuchungsgebiet (Mittel über alle Stationen). Dabei erfolgt für jede Niederschlagsklasse, beginnend mit der trockensten Klasse die Zufallsauswahl eines Tages, eine Niederschlagserhöhung um 10% für alle Stationen und eine erneute Bestimmung der Häufigkeitsverteilung. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis die vorgegebene Häufigkeitsverteilung des Feuchteregimes erreicht ist. Einzelne Tage können bei diesem Vorgang auch mehrfach

selektiert werden.

2.4 Methode des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-Modell)

Das MPI-Modell [18, 19, 20] wendet zur Szenarienerstellung ein Verfahren mit dem in das globale Klimamodell ECHAM4 eingebetteten („genesteten“) Regionalmodell REMO an.

Es wird ein doppelt genesteter Ansatz verfolgt: das GCM ECHAM4/OPYC3 mit grober räumlicher Auflösung treibt das Modell REMO mit 1/2 Grad Auflösung an, das wiederum als Antrieb des Modells REMO mit 1/6 Grad Auflösung dient. Dadurch wird ein flächiges Raster mit ca. 18x18 km² großen Zellen erzeugt (Abb. 2-5).

Das dreidimensionale hydrostatische regionale Klimamodell REMO (Regional-Modell) wird verwendet, um die hydrometeorologischen Größen Niederschlagsintensität, Niederschlagsmenge und Verdunstung, die für den Wasserhaushalt bestimmend sind, zu berechnen.

Das regionale Klimamodell REMO ist aus dem „Europa-Vorhersagemodell“ des DWD entstanden [26] und kann dessen spezifische Parametrisierung physikalischer Pro-

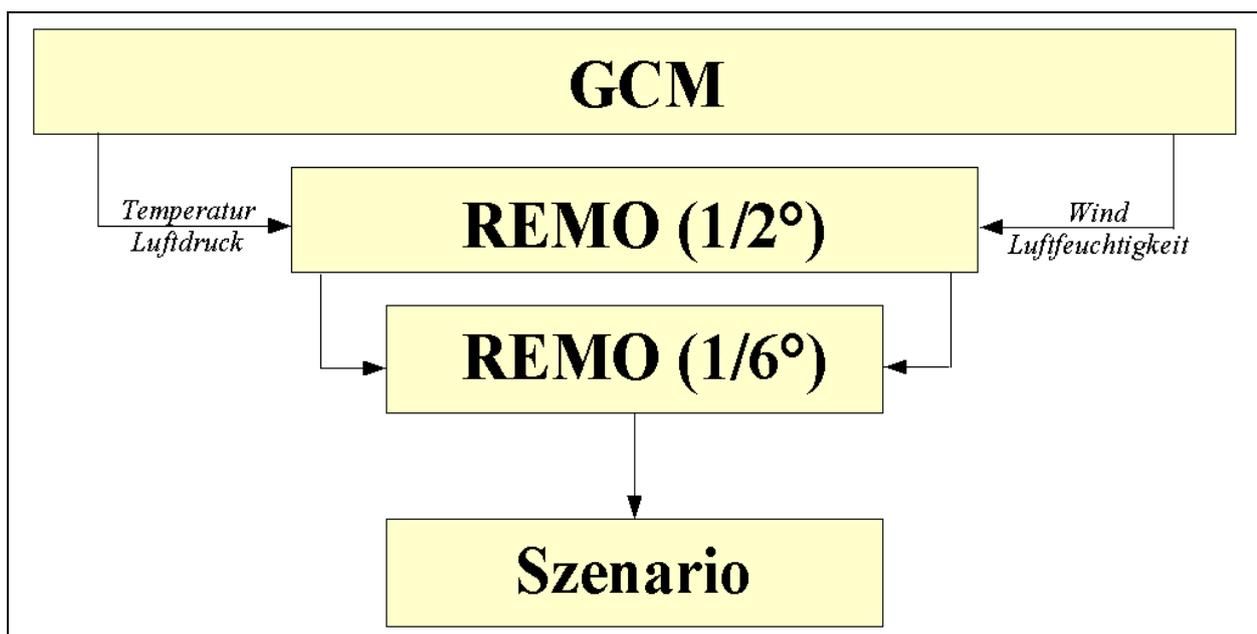


Abb. 2-5: Vereinfachte schematische Darstellung des MPI-Modells (REMO) [4]



zesse verwenden. Es kann alternativ auch die Parametrisierung des GCM ECHAM4/OPYC3 genutzt werden, mit dem Vorteil einer einheitlichen Parametrisierung aller beteiligten Klimamodelle. Die physika-

lischen Prozesse werden dynamisch berechnet und somit kann das Regionalmodell REMO auch nichtlineare Zusammenhänge berücksichtigen.



3 Ausgewählte Ergebnisse der Klimaszenarien

3.1 Grundlagen der vergleichenden Auswertung

- den Ist-Zustand (1971 bis 2000) und
- einen zukünftigen Zeitraum (Zukunfts-szenario, 2021 bis 2050)

Mit allen drei regionalen Modellen bzw. Verfahren wurden einheitlich Szenarien für

simuliert. Die Ergebnisse der drei Modelle

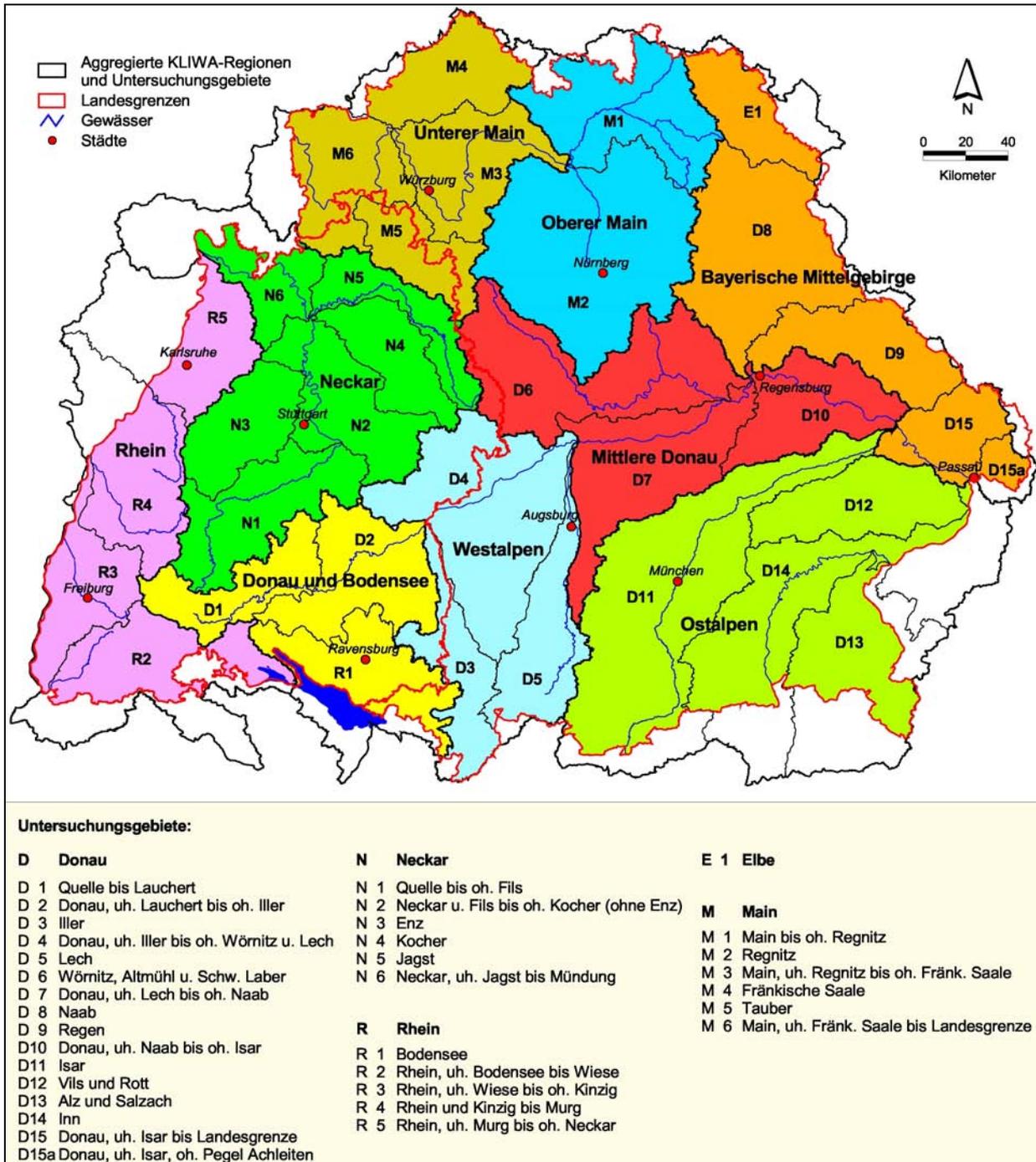


Abb. 3-1: 33 Untersuchungsgebiete und neun aggregierte KLIWA-Regionen in Süddeutschland (Baden-Württemberg und Bayern, insgesamt ca. 106.000 km²)

liegen in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen vor:

- PIK-Modell: alle Größen punktuell für 67 Klimastationen (davon 23 in Baden-Württemberg, 31 in Bayern und 13 Stationen außerhalb), in Tageswerten
- MR-Modell: Niederschlag punktuell für 537 Stationen (davon 160 in Baden-Württemberg, 331 in Bayern und 46 Stationen außerhalb) und die übrigen Klimagrößen punktuell für 67 Klimastationen, alle in Tageswerten
- MPI-Modell (REMO): alle Größen als Flächenmittel für Raster mit ca. 18 km x 18 km (ca. 320 km², dies entspricht ca. 340 Rasterwerten für Baden-Württemberg und Bayern), in Stundenwerten

Um die Ergebnisse der drei Modelle für die Klimaszenarien einfach und übersichtlich zu vergleichen, wurde nach grundsätzlichen Überlegungen zu sinnvollen räumlichen Interpolationen bzw. Regionalisierungen [22] eine einfache Ergebnismittelung über neun relativ großflächige Gebiete (KLIWA-Regionen) durchgeführt.

In Abbildung 3-1 sind die neun (aus 33 kleineren Flussgebietseinheiten aggregierten) KLIWA-Regionen mit ihren Kurzbezeichnungen farblich gekennzeichnet. Sie können folgenden Gewässer-Einzugsgebieten (jeweils bis zu den Landesgrenzen von Baden-Württemberg und Bayern) zugeordnet werden:

- Rhein: rechtsseitige Zuflüsse von Hoch- und Oberrhein,
- Neckar: Gesamteinzugsgebiet des Neckar,
- Oberer Main: Einzugsgebiet Oberer Main und Regnitz bis Bamberg,
- Unterer Main: Unterer und mittlerer Main sowie Tauber,
- Donau und Bodensee: Donauoberlauf bis Ulm und Bodenseeeinzugsgebiet,
- Westalpen: Westliche bayerische Alpen und Donaueinzugsgebiet von Ulm bis zur Lechmündung,
- Mittlere Donau: Donau von Lechmündung bis zur Isarmündung,

- Ostalpen: Östliche bayerische Alpen mit Isar- und Inngebiet,
- Bayerisches Mittelgebirge: Gebiete der bayerischen Elbe, Naab- und Regengebiet.

Abbildung 3-2 zeigt die Klimastationen, für die von PIK- und MR-Modell Klimadaten simuliert wurden. Innerhalb der einzelnen KLIWA-Regionen befinden sich zwischen 4 und 10 Klimastationen, was für eine einfache Mittelung der Werte ausreichend erscheint. Die Region „Westalpen“ ist allerdings mit nur zwei Klimastationen unterrepräsentiert.

Folgende Klimagrößen wurden regionspezifisch zur Verfügung gestellt:

- Lufttemperatur [°C]
- Niederschlagshöhe [mm]
- Relative Luftfeuchte [%]
- Luftdruck [hPa]
- Globalstrahlung [J/cm²]
- Windgeschwindigkeit [m/s]

Für die statistischen Klimamodelle (PIK und MR) liegen zudem noch die Werte zur minimalen und maximalen Tagestemperatur vor. Außerdem wurden Angaben zu Dampfdruck, Sonnenscheindauer und Bewölkungsgrad geliefert, die aber redundant zu Angaben von Globalstrahlung und relativer Luftfeuchte sind.

Alle für die jeweiligen Modelle vorliegenden Klimagrößen wurden für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario hinsichtlich der Kalenderjahre und der hydrologischen Halbjahre ausgewertet. Darüber hinaus wurde (mit Ausnahme des PIK-Modelles) aus der Differenz zwischen Zukunftsszenario und Simulation des Ist-Zustands die simulierte Veränderung ermittelt und bewertet. Die Ergebnisse wurden getrennt für die einzelnen Klimamodelle tabellarisch und zudem für die Klimagrößen Tagesmittel der Lufttemperatur sowie Niederschlag regionspezifisch grafisch aufbereitet [22]. Aus dieser Untersuchung werden in den folgenden Kapiteln die wichtigsten Ergebnisse exemplarisch dargestellt.



Abb. 3-2: Verteilung der 54 Klimastationen in den KLIWA-Regionen

3.2 Regionenspezifische Auswertung der Klimaszenarien des PIK-Modells

Für die Auswertung wurden die Ergebnisse des PIK-Modells für die 54 innerhalb der neun aggregierten KLIWA-Regionen gelegenen Klimastationen herangezogen [11]. Dabei sollten aus den simulierten Zeitreihen des PIK die beiden 30-jährigen Zeiträume 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 ausgewertet werden. Dadurch ist die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der anderen Modellergebnisse (MR und MPI) gewährleistet.

Da vom PIK-Modell keine Simulation des Ist-Zustands vorgelegt wurde, konnte dafür kein Vergleich zwischen Simulation des Ist-Zustands und Messdaten erfolgen, um die Güte der Simulationsmethode zu beurteilen. Die simulierten künftigen Veränderungen müssen aus der Differenz zwischen Zukunftsszenario und homogenisierten Messdaten abgeleitet werden.

Somit wurden für das PIK-Modell die folgenden Datensätze ausgewertet:

- Homogenisierte Messdaten (Messdaten 1971 bis 2000)
- Zukunftsszenario (Szenario 2021 bis 2050) (basierend auf den Temperaturtrends (für T_{\max} , T_{mit} und T_{\min}), die aus dem ECHAM4/OPYC3 T42 Szenarioauf abgeleitet wurden)

Zur Übersicht sind die wesentlichen Ergebnisse der homogenisierten Messwerte und des Zukunftsszenarios in den Abbildungen 3-3 und 3-4 für die mittlere Lufttemperatur und den Niederschlag zusammengestellt. Gezeigt werden sowohl die Auswertungsergebnisse der Kalenderjahre als auch die der hydrologischen Halbjahre (Mai bis Oktober, November bis April). Hieraus werden sowohl die Unterschiede zwischen den Regionen als auch die simulierten Veränderungen (Differenzen zwischen den Säulen) deutlich.

Tabellarische Übersichtsdarstellungen der Differenzen zwischen Szenario 2021-2050 und homogenisierten Messdaten 1971-2000 für alle simulierten Klimagrößen und alle untersuchten Zeitintervalle werden in den Tabellen 3-1 und 3-2 gezeigt.

Die Unterschiede zwischen den KLIWA-Regionen beruhen in erster Linie auf den verschiedenen mittleren Gebiets- bzw. Stationshöhen: Die tiefsten Temperaturen und zugleich höchsten Niederschläge treten erwartungsgemäß in den beiden Alpen-Regionen auf. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die mittlere Höhe der Klimastationen in der Region „Ostalpen“ wesentlich über der mittleren Höhe der gesamten Region liegt. Dies ist insbesondere auf die beiden Bergstationen Zugspitze und Wendelstein zurückzuführen. Daher wird die Temperatur vermutlich unterschätzt und der Niederschlag überschätzt.

Auch in der KLIWA-Region „Neckar“ werden die Jahresniederschläge mit nahezu 1.000 mm bei den homogenisierten Messdaten offenbar etwas überschätzt. Dies ist wiederum eine Folge der im Mittel zu hohen Lage der Klimastationen in dieser Region, da die Stationen im Schwarzwald bzw. auf der Schwäbischen Alb überrepräsentiert sind.

Für die simulierte Veränderung, d.h. die Differenz zwischen Zukunftsszenario und homogenisierten Messdaten des Ist-Zustands, spielen die Fehleinschätzungen insbesondere bei den relativen Differenzen eine geringe Rolle. Durch die Differenzenbildung werden die Fehleinschätzungen minimiert, da sie gleichermaßen beim Ist-Zustand und beim Zukunftsszenario auftreten.

Hinsichtlich der simulierten Veränderungen der mittleren Lufttemperaturen ergibt sich gemäß der Vorgaben im PIK-Modell [11] für alle Regionen eine gleichmäßige Temperaturerhöhung um etwa 1,1°C. Die Temperaturzunahmen sind sowohl im hydrologischen Sommerhalbjahr als auch im hydrologischen Winterhalbjahr etwa gleich groß (Abb. 3-3) und zeigen ein homogenes Bild.

Hinsichtlich der simulierten Veränderungen der Niederschlagshöhen (Abb. 3-4) ergibt sich dagegen ein heterogenes Bild:

- Für die Regionen „Bayerische Mittelgebirge“, „Donau und Bodensee“ sowie „Mittlere Donau“ ergeben sich minimale Zunahmen der Jahresniederschläge. Diese sind vor allem auf höhere Sommerniederschläge zurückzuführen.
- In den Regionen „Neckar“, „Oberer Main“, „Unterer Main“ und vor allem „Rhein“ werden hingegen deutlichere Zunahmen der mittleren Jahresniederschläge simuliert. Die simulierte Zunahme beträgt in der Region „Rhein“ 7,5% (89 mm). Auch in diesen Regionen ist die Zunahme der Jahresniederschläge vor allem auf Zunahmen im hydrologischen Sommerhalbjahr zurückzuführen.
- Für die beiden Alpenregionen leitet sich aus den Ergebnissen hingegen eine Abnahme der mittleren Jahresniederschläge ab, die vor allem durch die Abnahmen im hydrologischen Winterhalbjahr bedingt ist.

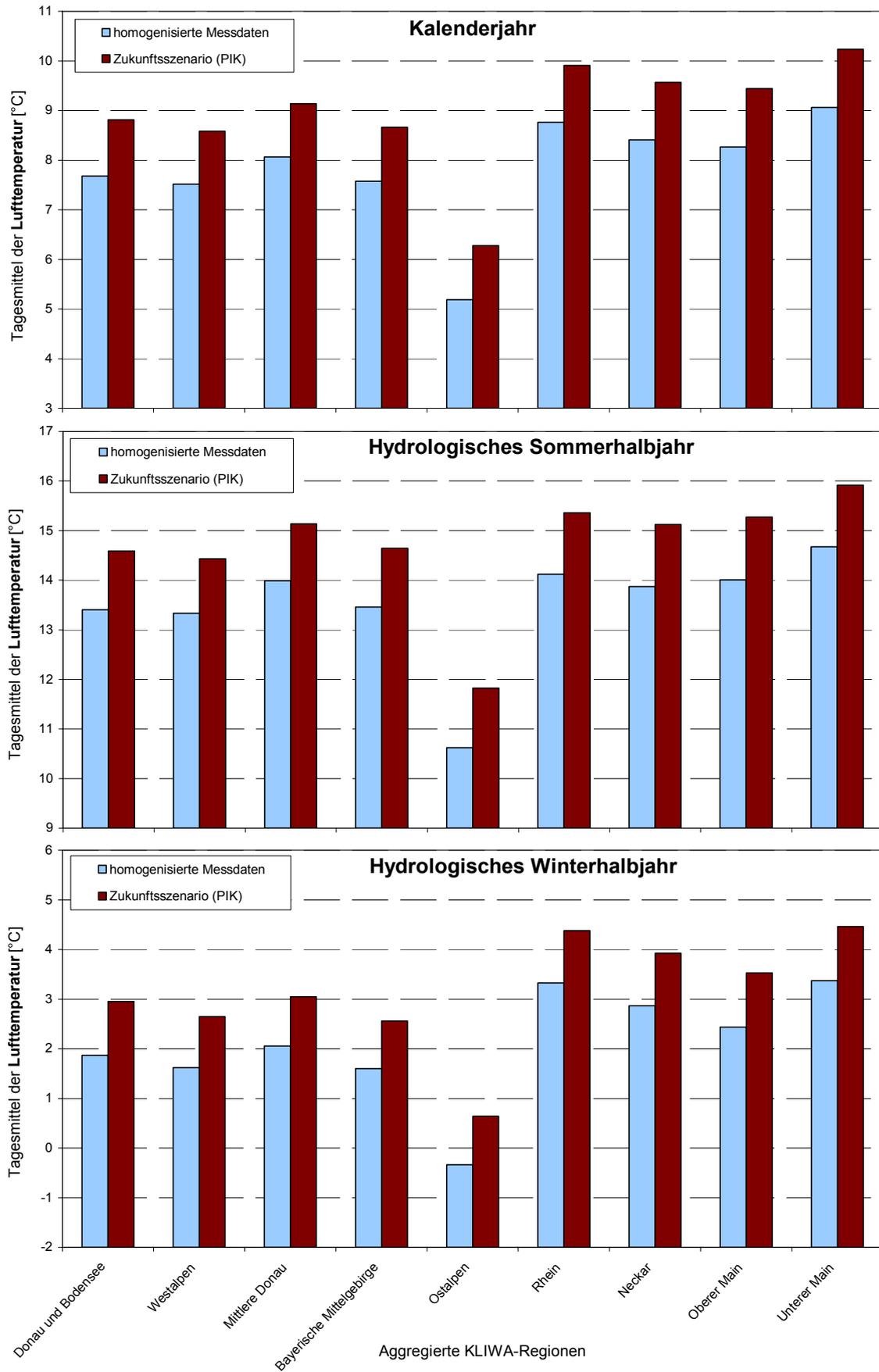


Abb. 3-3: PIK-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen **Lufttemperatur**

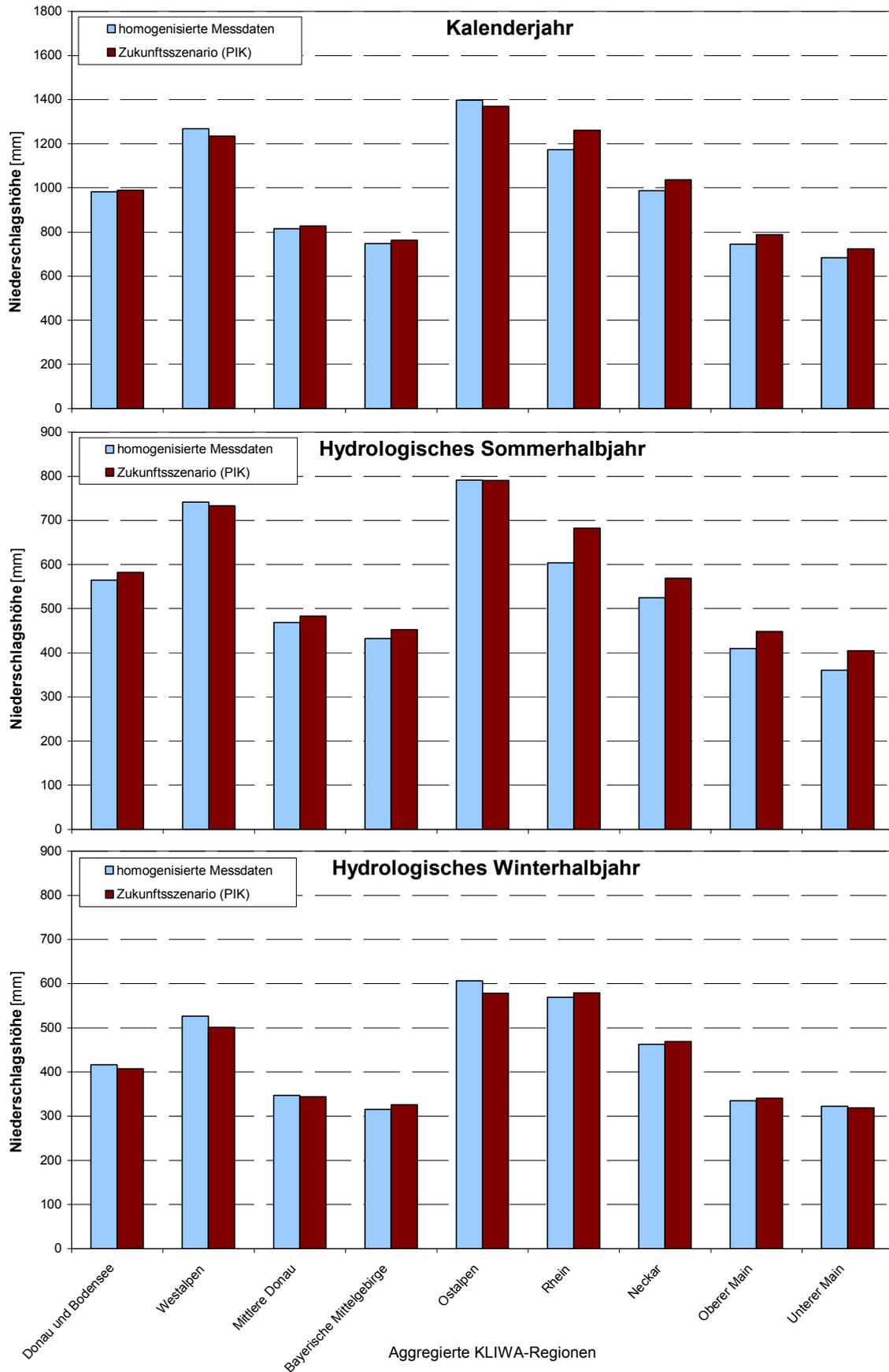


Abb. 3-4: PIK-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen **Niederschlagshöhen**



Tab. 3.1: PIK-Modell: **Absolute** Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und homogenisierten Messdaten 1971-2000²

Kalenderjahr													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	2.5	1.1	-0.6	7	-0.2	0.4	0.4	0.2	-0.1	1.9	-0.1
	Westalpen	10837	2.5	1.1	-0.5	-34	-1.3	0.1	0.3	0.1	-0.1	1.6	-0.1
	Mittlere Donau	12381	2.3	1.1	-0.5	11	-0.1	0.0	0.4	0.0	0.1	0.9	0.0
	Bayerische Mittelgebirge	13351	2.1	1.1	0.0	15	-1.2	0.2	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0
	Ostalpen	24192	2.7	1.1	-1.6	-28	-0.9	0.5	0.3	0.1	-0.1	2.2	-0.1
Rhein	Rhein	15960	2.4	1.1	-2.2	89	-0.9	0.4	0.4	0.0	0.0	1.4	-0.1
	Neckar	15732	2.0	1.2	-0.8	50	-1.0	0.4	0.4	0.1	0.0	1.3	0.0
	Oberer Main	11960	1.8	1.2	0.0	44	-1.1	0.4	0.3	0.1	0.0	3.1	-0.1
	Unterer Main	11486	1.7	1.2	-0.3	40	-0.6	0.0	0.3	0.1	0.0	2.0	-0.1
Mittel Donau			2.5	1.1	-0.7	-5	-0.7	0.4	0.4	0.1	0.0	1.4	-0.1
Mittel Rhein			2.0	1.2	-0.9	57	-0.9	0.3	0.4	0.1	0.0	1.8	-0.1
Mittel aller Stationen			2.2	1.1	-0.8	30	-0.8	0.3	0.4	0.1	0.0	1.6	-0.1
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai - Okt.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	2.5	1.2	-0.1	17	0.0	0.5	0.4	0.1	0.0	-1.7	-0.1
	Westalpen	10837	2.5	1.1	-0.6	-8	-1.2	0.1	0.2	0.0	-0.1	-1.9	0.0
	Mittlere Donau	12381	2.3	1.2	-0.3	14	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	-1.9	0.0
	Bayerische Mittelgebirge	13351	2.1	1.2	-0.3	20	-0.9	0.1	0.3	-0.1	0.1	-2.8	0.0
	Ostalpen	24192	2.7	1.2	-0.7	0	-1.0	0.5	0.3	0.0	-0.1	-1.3	0.0
Rhein	Rhein	15960	2.4	1.2	0.0	79	-0.9	0.4	0.3	-0.1	0.0	-2.9	0.0
	Neckar	15732	2.0	1.3	0.5	44	-0.9	0.4	0.3	0.0	0.1	-2.4	0.1
	Oberer Main	11960	1.8	1.3	0.2	39	-0.9	0.3	0.3	0.0	0.0	-0.3	-0.1
	Unterer Main	11486	1.7	1.2	0.5	44	-0.3	-0.2	0.3	0.0	0.1	-1.4	0.0
Mittel Donau			2.5	1.2	-0.4	10	-0.6	0.4	0.3	0.0	0.0	-1.9	0.0
Mittel Rhein			2.0	1.2	0.3	52	-0.8	0.2	0.3	0.0	0.0	-1.9	0.0
Mittel aller Stationen			2.2	1.2	0.0	34	-0.7	0.3	0.3	0.0	0.0	-1.9	0.0
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. - Apr.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	1.4	1.1	-0.6	-10	-0.4	0.4	0.5	0.2	-0.1	5.7	-0.1
	Westalpen	10837	1.5	1.0	-0.5	-25	-1.4	0.0	0.4	0.2	-0.1	5.1	-0.1
	Mittlere Donau	12381	1.5	1.0	-0.5	-3	-0.3	0.1	0.4	0.1	0.0	3.7	0.0
	Bayerische Mittelgebirge	13351	1.5	1.0	0.0	11	-6.2	-2.5	-0.2	0.3	0.1	4.2	0.1
	Ostalpen	24192	2.8	1.0	-1.6	-28	-0.8	0.4	0.4	0.2	-0.1	5.7	-0.2
Rhein	Rhein	15960	2.4	1.1	-2.2	10	-0.8	0.4	0.4	0.2	-0.1	5.7	-0.3
	Neckar	15732	1.4	1.1	-0.8	6	-1.1	0.5	0.4	0.2	0.0	5.0	-0.1
	Oberer Main	11960	1.6	1.1	0.0	5	-1.3	0.6	0.3	0.2	-0.1	6.7	-0.2
	Unterer Main	11486	1.6	1.1	-0.3	-3	-0.9	0.2	0.4	0.2	0.0	5.5	-0.1
Mittel Donau			1.9	1.0	-0.7	-11	-1.8	-0.4	0.3	0.2	0.0	5.0	-0.1
Mittel Rhein			1.7	1.1	-0.9	5	-1.0	0.4	0.4	0.2	-0.1	5.6	-0.2
Mittel aller Stationen			1.8	1.0	-0.8	-2	-1.4	0.1	0.3	0.2	0.0	5.3	-0.1

² Lufttemperatur: t_{max} , t_{mit} , t_{min} , Niederschlagshöhe: *nied*, Relative Luftfeuchte: *relf*, Luftdruck: *ludr*, Dampfdruck: *dadr*, Sonnenscheindauer: *sonn*, Bewölkungsgrad: *bewo*, Globalstrahlung: *stra*, Windgeschwindigkeit: *wind*

Tab. 3.2: PIK-Modell: **Relative** Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und homogenisierten Messdaten 1971-2000³

Kalenderjahr													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				0.8	-0.2	0.0	4.7	3.6	-1.1	1.6	-4.6
	Westalpen	10837				-2.6	-1.6	0.0	3.2	1.8	-1.9	1.2	-3.5
	Mittlere Donau	12381				1.4	-0.2	0.0	4.0	0.8	1.3	0.7	0.0
	Bayerische Mittelgebirge	13351				2.1	-1.5	0.0	3.7	0.8	0.5	0.1	0.6
	Ostalpen	24192				-2.0	-1.1	0.1	4.0	2.6	-1.1	1.8	-2.6
Rhein	Rhein	15960				7.5	-1.1	0.0	4.0	0.4	-0.5	1.1	-3.9
	Neckar	15732				5.1	-1.3	0.0	4.0	2.2	0.3	1.1	-1.1
	Oberer Main	11960				5.9	-1.4	0.0	3.5	2.4	-0.9	2.7	-3.7
	Unterer Main	11486				5.9	-0.8	0.0	3.7	2.0	0.6	1.7	-3.3
Mittel Donau					-0.4	-0.9	0.0	4.0	2.1	-0.4	1.1	-2.0	
Mittel Rhein					6.2	-1.1	0.0	3.9	1.7	0.0	1.5	-2.8	
Mittel aller Stationen					3.1	-1.0	0.0	3.9	1.9	-0.2	1.3	-2.5	
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai - Okt.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				3.0	0.0	0.0	3.2	1.5	-0.9	-1.0	-3.8
	Westalpen	10837				-1.1	-1.6	0.0	1.9	-0.1	-2.4	-1.1	0.1
	Mittlere Donau	12381				3.1	0.1	0.0	2.7	-0.7	2.5	-1.1	0.8
	Bayerische Mittelgebirge	13351				4.6	-1.2	0.0	2.7	-1.5	1.3	-1.7	1.2
	Ostalpen	24192				0.0	-1.2	0.1	2.4	0.7	-1.3	-0.8	-0.2
Rhein	Rhein	15960				13.0	-1.2	0.0	2.6	-2.2	0.4	-1.7	0.1
	Neckar	15732				8.4	-1.3	0.0	2.8	0.1	1.0	-1.4	2.3
	Oberer Main	11960				9.4	-1.2	0.0	2.4	-0.3	0.0	-0.2	-2.1
	Unterer Main	11486				12.2	-0.4	0.0	2.6	-0.6	2.0	-0.8	-1.3
Mittel Donau					1.6	-0.8	0.0	2.7	0.1	-0.1	-1.1	-0.5	
Mittel Rhein					10.7	-1.0	0.0	2.6	-0.7	0.9	-1.1	0.2	
Mittel aller Stationen					6.3	-0.9	0.0	2.6	-0.4	0.5	-1.1	-0.1	
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. - Apr.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				-2.3	-0.4	0.0	7.9	8.1	-1.4	7.5	-5.3
	Westalpen	10837				-4.8	-1.7	0.0	6.0	5.3	-1.4	6.3	-6.5
	Mittlere Donau	12381				-0.9	-0.4	0.0	6.8	4.2	0.3	5.3	-0.7
	Bayerische Mittelgebirge	13351				3.3	-7.4	-0.3	-3.1	11.5	1.3	6.4	2.5
	Ostalpen	24192				-4.6	-1.0	0.0	7.4	5.8	-0.9	7.2	-4.6
Rhein	Rhein	15960				1.7	-1.1	0.0	6.8	5.8	-1.3	7.8	-7.0
	Neckar	15732				1.3	-1.3	0.1	6.4	6.5	-0.4	7.1	-3.9
	Oberer Main	11960				1.6	-1.6	0.1	5.6	8.6	-1.7	10.0	-5.1
	Unterer Main	11486				-1.1	-1.1	0.0	5.8	7.8	-0.6	8.2	-5.0
Mittel Donau					-2.5	-2.2	0.0	4.9	7.1	-0.3	6.7	-2.9	
Mittel Rhein					1.1	-1.2	0.0	6.2	6.9	-0.9	8.0	-5.3	
Mittel aller Stationen					-0.5	-1.7	0.0	5.7	7.0	-0.7	7.4	-4.3	

³ Niederschlagshöhe: *nied*, Relative Luftfeuchte: *relf*, Luftdruck: *ludr*, Dampfdruck: *dadr*, Sonnenscheindauer: *sonn*, Bewölkungsgrad: *bewo*, Globalstrahlung: *stra*, Windgeschwindigkeit: *wind*



3.3 Regionenspezifische Auswertung der Klimaszenarien des MR-Modells

Die Ergebnisse des Klimamodells von Meteo-Research (MR) [9] basieren für alle Klimagrößen bis auf Niederschlag generell auf denselben Klimastationen (siehe Abb. 3-2) wie das PIK-Modell.

Von Meteo-Research liegen darüber hinaus zusätzliche Auswertungen von Simulationen für das wesentlich dichtere Netz von Niederschlagsstationen vor (Abb. 3-5). Sie liefern plausible Daten und erlauben eine größere räumliche Auflösung der Ergebnisse als die Niederschlagsdaten der Klimastationen. Daher werden bei der Auswertung der Niederschläge von Meteo-Research in Kapitel 5 die Niederschlagsdaten der Niederschlagsstationen verwendet. Für den besseren Vergleich mit den Ergebnissen des PIK-Modells sind im folgenden jedoch nur die Daten derjenigen Niederschlagssta-

tionen ausgewertet worden, die auch Klimastationen sind.

Als Grundlage dienen die folgenden Ergebnisdaten:

- Homogenisierte Messdaten (Messdaten 1971 bis 2000)
- Für den Ist-Zustand (Simulation 1971 bis 2000): Eine Dekade der Simulationsergebnisse für die Jahre 1961 bis 1970 und die der Jahre 1981 bis 2000 (basierend auf Häufigkeitsverteilungen der Großwetterlagen, die aus NCAR Re-Analysedaten abgeleitet wurden)
- Für das Zukunftsszenario (Szenario 2021 bis 2050): Simulationsergebnisse für die Dekaden 2021 bis 2030, 2031 bis 2040 und 2041 bis 2050 (basierend auf Häufigkeitsverteilungen der Großwetterlagen, die aus dem ECHAM4/OPYC3 Szenariolauf abgeleitet wurden).

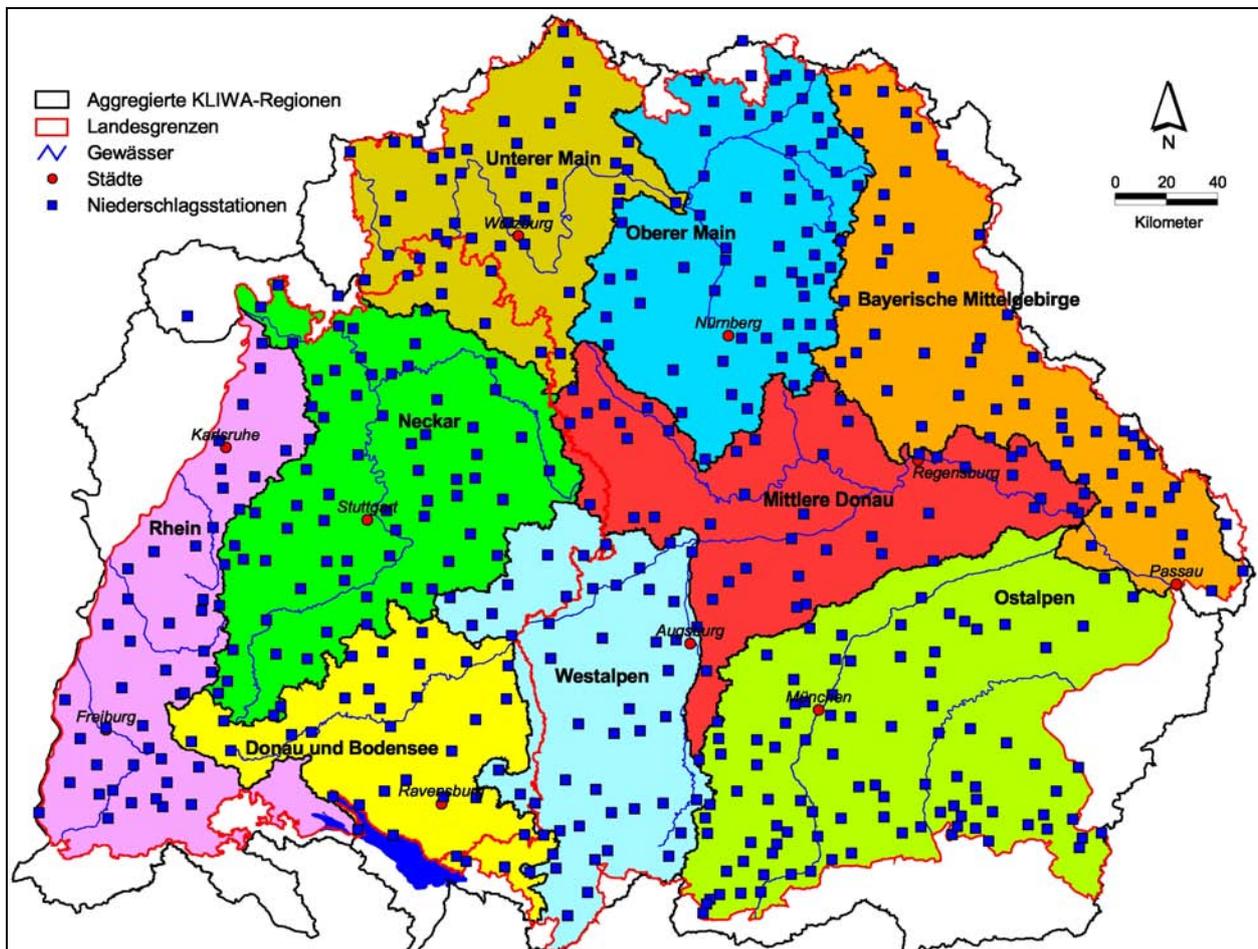


Abb. 3-5: Verteilung der Niederschlagsstationen in den KLIWA-Regionen

Hierbei ist anzumerken, dass mit dem MR-Modell für alle drei Dekaden des Zukunftsszenarios jeweils zehn unterschiedliche Simulationsläufe („Realisationen“) bereitgestellt wurden. Aus diesen zehn Simulationsläufen wurde eine Auswahl getroffen, die sich an den höchsten Niederschlagssummen der hydrologischen Halbjahre der Daten der Klimastationen orientierte, und zu einem „Kombilauf Klima“ zusammengestellt. Bei jedem Simulationslauf wurde zudem für jede Dekade eine repräsentative 20-jährige Datenreihe bereitgestellt.

Zur Übersicht sind die Ergebnisse der homogenisierten Messwerte, der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios in den Abbildungen 3-6 und 3-7 für die mittlere Lufttemperatur und den Niederschlag zusammengestellt. Gezeigt werden sowohl die Auswertungsergebnisse der Kalenderjahre als auch der hydrologischen Halbjahre.

Tabellarische Übersichtsdarstellungen der Differenzen zwischen Zukunftsszenario 2021-2050 und simuliertem Ist-Zustand 1971-2000 für alle simulierten Klimagrößen und alle untersuchten Zeitintervalle werden in den Tabellen 3-3 und 3-4 gezeigt. Anhand der Abbildungen 3-6 und 3-7 kann einerseits die Simulation des Ist-Zustands mit den homogenisierten Messdaten verglichen werden, andererseits wird aus der Differenz zwischen Ist-Zustand und Zukunftsszenario die für die Zukunft simulierte Veränderung deutlich.

Die mittleren Jahrestemperaturen des simulierten Ist-Zustands stimmen im Allgemei-

nen gut mit den homogenisierten Messwerten überein. Lediglich im hydrologischen Winter ergeben sich aus der Simulation etwas tiefere Werte als aus den homogenisierten Messwerten. Für das Zukunftsszenario wird überall eine deutliche Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur um 1,6 bis 1,8°C simuliert. Dabei liegt die Zunahme mit über 2°C im hydrologischen Winter höher als im hydrologischen Sommer (Zunahme 1,2 bis 1,4°C).

Die für den Ist-Zustand simulierten Jahresniederschläge liegen geringfügig höher als die homogenisierten Messwerte. Eine Ausnahme stellt die Region „Westalpen“ dar, für die es aber nur Werte an zwei Stationen gibt. Generell stimmen die für den Ist-Zustand simulierten Niederschläge gut mit den homogenisierten Messwerten überein.

Aus dem MR-Modell ergeben sich für das Zukunftsszenario überwiegend Zunahmen der mittleren Jahresniederschläge, die je nach Region zwischen 4% (31 mm) und 17% (121 mm) liegen. Die stärkste prozentuale Zunahme der Niederschläge ist für die KLIWA-Region „Unterer Main“ zu verzeichnen. Einzig für die „Ostalpen“ ergeben sich geringe Abnahmen.

Auffällig ist, dass die simulierte Zunahme des Jahresniederschlags ausschließlich auf Veränderungen im hydrologischen Winterhalbjahr zurückzuführen sind. So kommt es im Winterhalbjahr z.T. zu Zunahmen von über 30%. Für das hydrologische Sommerhalbjahr ergeben sich hingegen bei fast allen Regionen Abnahmen des Niederschlags.

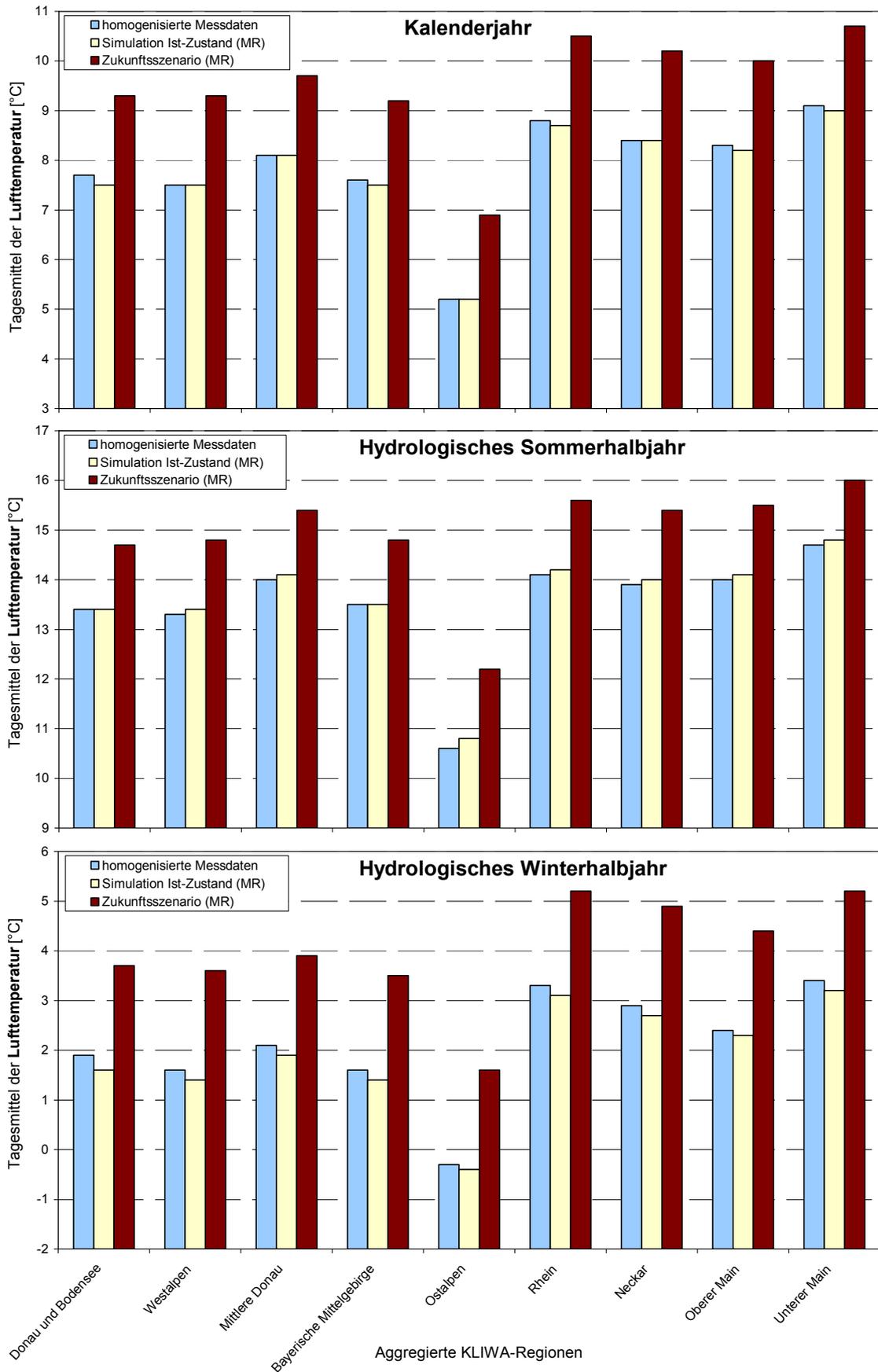


Abb. 3-6: MR-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen **Lufttemperaturen**

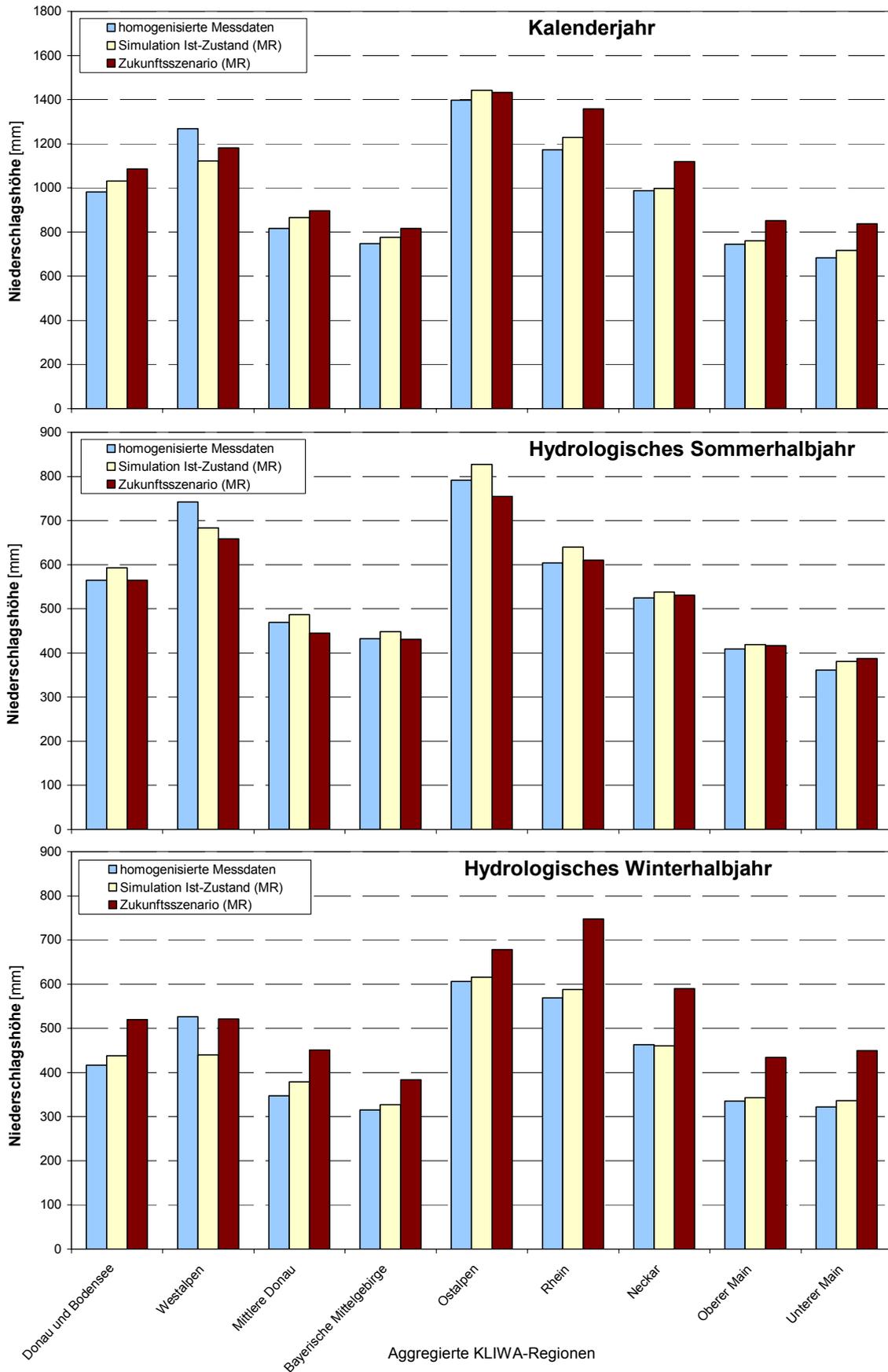


Abb. 3-7: MR-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen **Niederschlagshöhen**


 Tab. 3.3: MR-Modell: **Absolute** Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands 1971-2000⁴

Kalenderjahr													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	1.1	1.7	4.5	55	-1.0		1.1	0.3	-0.3	-0.2	
	Westalpen	10837	1.0	1.8	4.2	58	-1.7	0.4	1.1	0.3	-0.2	0.0	
	Mittlere Donau	12381	1.9	1.6	3.5	31	-0.9	1.2	1.1	0.3	-0.1	0.0	
	Bayerische Mittelgebirge	13351	1.5	1.7	3.7	40	-1.1	0.0	1.1	0.2	-0.2	0.0	
	Ostalpen	24192	1.6	1.7	4.0	-9	-1.6	0.9	1.0	0.3	-0.2	0.1	
Rhein	Rhein	15960	1.5	1.8	4.0	129	-1.3	-0.4	1.2	0.3	-0.1	0.2	
	Neckar	15732	1.4	1.8	3.8	122	-1.4	-0.1	1.2	0.3	-0.2	0.0	
	Oberer Main	11960	1.4	1.7	4.6	90	-1.1	-0.1	1.1	0.3	-0.2	-0.2	
	Unterer Main	11486	1.4	1.6	4.2	121	-0.1	-1.4	1.2	0.2	-0.1	0.1	
Mittel Donau		1.5	1.7	4.0	28	-1.2	0.7	1.1	0.3	-0.2		0.0	
Mittel Rhein		1.4	1.7	4.1	118	-1.0	-0.5	1.2	0.3	-0.2		0.0	
Mittel aller Stationen		1.4	1.7	4.0	78	-1.1	-0.1	1.1	0.3	-0.2		0.0	
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai - Okt.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	1.1	1.4	0.9	-28	-1.2		1.1	0.5	-0.4	-0.2	
	Westalpen	10837	1.0	1.4	0.9	-24	-1.7	0.7	1.1	0.5	-0.3	-0.1	
	Mittlere Donau	12381	1.9	1.3	0.6	-42	-1.7	1.8	1.1	0.5	-0.3	0.0	
	Bayerische Mittelgebirge	13351	1.5	1.3	1.0	-17	-1.9	0.7	1.0	0.6	-0.4	-0.1	
	Ostalpen	24192	1.6	1.4	1.0	-72	-2.1	1.3	1.0	0.6	-0.4	-0.2	
Rhein	Rhein	15960	1.5	1.4	0.8	-30	-1.7	0.1	1.1	0.4	-0.3	0.0	
	Neckar	15732	1.4	1.4	0.6	-7	-1.7	0.6	1.2	0.4	-0.3	-0.2	
	Oberer Main	11960	1.4	1.4	0.9	-2	-1.8	0.7	1.1	0.5	-0.4	-0.2	
	Unterer Main	11486	1.3	1.2	0.7	6	-0.5	-0.5	1.2	0.5	-0.3	-0.2	
Mittel Donau		1.5	1.4	0.9	-41	-1.8	1.2	1.0	0.6	-0.4		-0.1	
Mittel Rhein		1.4	1.4	0.7	-9	-1.4	0.2	1.2	0.4	-0.3		-0.1	
Mittel aller Stationen		1.4	1.4	0.8	-23	-1.6	0.6	1.1	0.5	-0.3		-0.1	
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. - Apr.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	-0.2	2.1	4.5	82	-0.7		1.1	0.2	-0.2	0.0	
	Westalpen	10837	0.1	2.2	4.2	81	-1.6	0.1	1.1	0.1	-0.1	0.1	
	Mittlere Donau	12381	0.3	2.0	3.5	72	-0.1	0.7	1.1	0.1	0.1	0.1	
	Bayerische Mittelgebirge	13351	0.2	2.1	3.7	57	-0.4	-0.8	1.2	0.0	0.0	0.0	
	Ostalpen	24192	0.4	2.0	4.0	62	-1.1	0.7	0.9	0.0	0.1	0.3	
Rhein	Rhein	15960	0.2	2.1	4.0	160	-1.0	-0.9	1.2	0.0	0.0	0.4	
	Neckar	15732	-0.1	2.2	3.8	130	-1.1	-0.7	1.2	0.1	0.0	0.2	
	Oberer Main	11960	-0.1	2.1	4.6	91	-0.6	-0.9	1.2	0.0	0.0	0.0	
	Unterer Main	11486	-0.3	2.0	4.2	114	0.4	-2.3	1.3	0.1	0.1	0.2	
Mittel Donau		0.2	2.1	4.0	69	-0.7	0.2	1.1	0.1	0.0		0.1	
Mittel Rhein		-0.1	2.1	4.1	127	-0.6	-1.2	1.2	0.1	0.0		0.2	
Mittel aller Stationen		0.0	2.1	4.0	101	-0.7	-0.6	1.2	0.1	0.0		0.2	

⁴ Lufttemperatur: t_{max} , t_{mit} , t_{min} , Niederschlagshöhe: *nied*, Relative Luftfeuchte: *relf*, Luftdruck: *ludr*, Dampfdruck: *dadr*, Sonnenscheindauer: *sonn*, Bewölkungsgrad: *bewo*, Windgeschwindigkeit: *wind*

Tab. 3.4: MR-Modell: **Relative** Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands 1971-2000⁵

Kalenderjahr													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				5.3	-1.3		12.2	6.4	-5.7	-8.0	
	Westalpen	10837				5.2	-2.1	0.0	12.4	6.4	-3.9	0.0	
	Mittlere Donau	12381				3.6	-1.1	0.1	11.8	6.3	-1.9	0.0	
	Bayerische Mittelgebirge	13351				5.2	-1.4	0.0	12.4	4.3	-3.7	0.0	
	Ostalpen	24192				-0.6	-2.0	0.1	12.8	6.1	-3.8	2.6	
Rhein	Rhein	15960				10.5	-1.7	0.0	13.0	6.4	-1.9	6.1	
	Neckar	15732				12.2	-1.8	0.0	13.0	6.3	-3.8	0.0	
	Oberer Main	11960				11.8	-1.4	0.0	12.1	6.7	-3.7	-7.4	
	Unterer Main	11486				16.9	-0.1	-0.1	12.6	4.4	-1.9	4.3	
Mittel Donau					2.6	-1.6	0.1	12.3	5.9	-3.9	-0.5		
Mittel Rhein					12.5	-1.3	-0.1	12.8	5.9	-2.8	1.5		
Mittel aller Stationen					7.8	-1.4	0.0	12.6	5.9	-3.3	0.7		
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai - Okt.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				-4.7	-1.6		9.7	8.1	-8.2	-8.7	
	Westalpen	10837				-3.5	-2.2	0.1	9.7	8.3	-6.1	-5.6	
	Mittlere Donau	12381				-8.6	-2.2	0.2	9.4	7.8	-5.9	0.0	
	Bayerische Mittelgebirge	13351				-3.8	-2.5	0.1	8.9	9.8	-7.8	-4.8	
	Ostalpen	24192				-8.7	-2.7	0.2	10.2	10.0	-7.8	-5.7	
Rhein	Rhein	15960				-4.7	-2.3	0.0	9.6	6.3	-6.1	0.0	
	Neckar	15732				-1.3	-2.2	0.1	10.5	6.2	-6.0	-7.7	
	Oberer Main	11960				-0.5	-2.4	0.1	9.7	8.2	-7.8	-8.0	
	Unterer Main	11486				1.6	-0.7	-0.1	10.3	8.3	-6.0	-9.1	
Mittel Donau					-6.6	-2.3	0.1	9.6	9.0	-7.4	-5.1		
Mittel Rhein					-1.7	-1.9	0.0	10.1	7.1	-6.4	-5.7		
Mittel aller Stationen					-4.1	-2.1	0.1	9.9	7.9	-6.8	-5.4		
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. - Apr.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				18.7	-0.8		16.4	6.5	-3.6	0.0	
	Westalpen	10837				18.4	-2.0	0.0	16.9	3.0	-1.9	5.0	
	Mittlere Donau	12381				19.0	-0.1	0.1	15.9	3.2	1.8	3.3	
	Bayerische Mittelgebirge	13351				17.4	-0.5	-0.1	18.2	0.0	0.0	0.0	
	Ostalpen	24192				10.1	-1.4	0.1	15.5	0.0	1.9	7.3	
Rhein	Rhein	15960				27.2	-1.3	-0.1	17.1	0.0	0.0	11.1	
	Neckar	15732				28.3	-1.4	-0.1	17.1	3.1	0.0	6.7	
	Oberer Main	11960				26.5	-0.7	-0.1	17.6	0.0	0.0	0.0	
	Unterer Main	11486				33.9	0.5	-0.2	18.3	3.4	1.8	8.0	
Mittel Donau					15.0	-0.9	0.0	16.6	2.1	-0.1	3.9		
Mittel Rhein					28.7	-0.8	-0.1	17.5	1.8	0.4	7.3		
Mittel aller Stationen					22.5	-0.8	-0.1	17.1	2.0	0.2	5.8		

⁵ Niederschlagshöhe: *nied*, Relative Luftfeuchte: *relf*, Luftdruck: *ludr*, Dampfdruck: *dadr*, Sonnenscheindauer: *sonn*, Bewölkungsgrad: *bewo*, Windgeschwindigkeit: *wind*



3.4 Regionenspezifische Auswertung der Klimaszenarien des MPI-Modells

Im Gegensatz zu den beiden statistischen Modellen liegen die Ergebnisse der Klimaszenarien des MPI-Modells REMO als Gebietsmittel für ca. 18 x 18 km große Zellen vor (entspricht dem REMO-Raster 1/6 Grad; [20]). Daher war für die regionenspezifische Auswertung hier eine andere Vorgehensweise erforderlich als bei den statistischen Modellen. Zunächst wurden die Flächenanteile der Raster an den einzelnen Regionen ermittelt. Anschließend wurden die für die Rasterflächen ermittelten Werte entsprechend ihrer Flächenanteile gewichtet, um die mittleren Werte für die jeweilige Region zu berechnen. Zur Orientierung zeigt Abbildung 3-8 die Lage des REMO-Rasters im Bereich der aggregierten KLIWA-Regionen.

Beim MPI-Modell ergeben sich die bei den statistischen Modellen beschriebenen Prob-

leme hinsichtlich repräsentativer Bezugshöhen-Niveaus für die untersuchten Klimadaten nicht, da die REMO-Rasterzellen jeweils die zugehörige mittlere Höhenlage der Rasterfläche repräsentieren.

Für das MPI-Modell (REMO) liegen im Unterschied zu den beiden statistischen Modellen zwei Simulationsläufe für den Ist-Zustand vor, die als Validierungslauf und Kontrolllauf bezeichnet werden:

- Beim Validierungslauf wird REMO an den Modellrändern über Re-Analysedaten angetrieben. Es wurden dabei die dreidimensionalen Re-Analysedaten des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersage (EZMW) verwendet. Durch die Verwendung der Re-Analysedaten sind die Ergebnisse des Validierungslaufs mit Messdaten vergleichbar und erlauben eine unmittelbare Überprüfung der Güte des

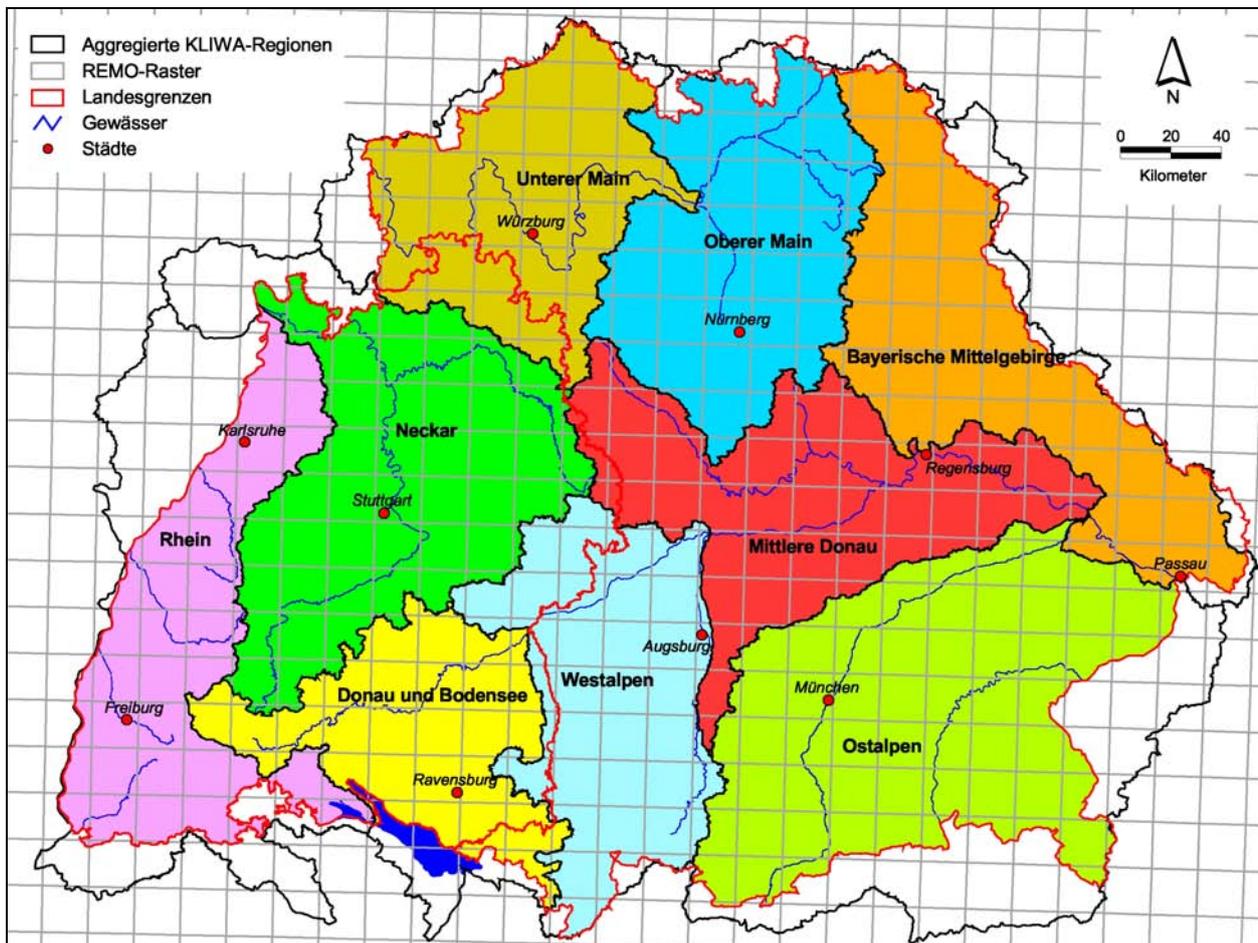


Abb. 3-8: REMO-Modellraster und KLIWA-Regionen

REMO-Modells. Auf Grund der Verfügbarkeit der Re-Analysedaten liegt der Validierungslauf allerdings nur für den Zeitraum 1979 bis 2000 vor.

- Beim Kontrolllauf und der Simulation des Zukunftsszenarios erfolgt der Randantrieb von REMO mit Ergebnissen des globalen Klimamodells ECHAM4 (in der horizontalen Auflösung T42 mit ca. 250 x 250 km großen Modellzellen). Damit wirken sich bei der dynamischen Modellierung im Vergleich zu den statistischen Modellen systematische Abweichungen der Ergebnisse des GCM am stärksten aus.

Allerdings sind die Unsicherheiten des GCM beim Kontrolllauf und bei der Simulation des Zukunftsszenarios gleichermaßen mit enthalten. Deshalb erfolgt die Einschätzung der zukünftig zu erwartenden Veränderungen hier nicht durch Vergleich mit Messdaten oder Validierungslauf, sondern wird als Vergleich zwischen Kontrolllauf und Zukunftsszenario durchgeführt.

Daher dienen als Grundlage für die Auswertungen die folgenden Daten:

- Homogenisierte Messdaten (Messdaten 1971 bis 2000)
- Validierungslauf (Simulation 1979 bis 2000): Ergebnisse des REMO-Validierungslaufs für die Jahre 1979 bis 2000 (basierend auf den Re-Analysedaten des EZMW)
- Für die Simulation des Ist-Zustandes (Simulation 1970 bis 1999): Ergebnisse des REMO-Kontrolllaufs für die Jahre 1970 bis 1999 (basierend auf dem ECHAM4/OPYC3 T42 Kontrolllauf)
- Für das Zukunftsszenario (Szenario 2021 bis 2050): Ergebnisse des REMO-Szenariolaufs für die Jahre 2021 bis 2050 (basierend auf dem ECHAM4/OPYC3 T42 Szenariolauf)

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse des Kontrolllaufs wurde der Validierungslauf herangezogen. Zur Übersicht sind die Ergebnisse der homogenisierten Messdaten, des Validierungslaufes, der Simulation des

Ist-Zustands (Kontrolllauf) und des Zukunftsszenarios in den Abbildungen 3-9 und 3-10 gegenübergestellt. Tabellarische Übersichtsdarstellungen der Differenzen zwischen Zukunftsszenario 2021-2050 und simuliertem Ist-Zustand (Kontrolllauf) 1971-2000 für alle simulierten Klimagrößen und alle untersuchten Zeitintervalle werden in den Tabellen 3-5 und 3-6 gezeigt.

Aus Abbildung 3-9 wird deutlich, dass die mittleren Temperaturen des Kontrolllaufs durchgehend über den Werten der homogenisierten Messdaten liegen. Die absoluten Differenzen der Werte liegen dabei beim Kontrolllauf sowohl für das Kalenderjahr als auch die hydrologischen Halbjahre gleich bleibend um ca. 2°C höher als bei den homogenisierten Messdaten.

Beim Validierungslauf liegen die mittleren Temperaturen im Kalenderjahr und im Sommerhalbjahr auch durchweg höher als die homogenisierten Messdaten; im Winterhalbjahr ist die Übereinstimmung dagegen relativ gut. Der Vergleich zwischen Kontrolllauf und Validierungslauf zeigt, dass die Temperaturwerte des Kontrolllaufs sowohl im Kalenderjahr als auch im hydrologischen Winterhalbjahr über denen des Validierungslaufs liegen, im hydrologischen Sommerhalbjahr allerdings liegen die Werte darunter.

Bei der Interpretation dieser Unterschiede ist zu beachten, dass es sich bei den homogenisierten Messdaten um Punktmessungen handelt, die nur bedingt repräsentativ für die Gesamtfläche der Regionen sind. So ist die größte Temperaturdifferenz zwischen homogenisierten Messwerten und insbesondere dem Kontrolllauf in der Region „Ostalpen“ sicherlich z.T. dadurch bedingt, dass die Stationen, die für die Ermittlung der homogenisierten Messwerte verwendet wurden, deutlich zu hoch liegen (vgl. Kap. 3.1).

Die gegenüber den homogenisierten Messdaten für alle Regionen höheren Temperaturen weisen jedoch darauf hin, dass zumindest ein Teil der Unterschiede durch das regionale MPI-Modell bedingt ist.



Beim Niederschlag sind die Abweichungen zwischen Validierungslauf und homogenisierten Messdaten im Kalenderjahr und Sommerhalbjahr relativ gering; im Winterhalbjahr sind die Abweichungen zwar geringfügig größer, aber insgesamt zeigt Abbildung 3-10, dass die Niederschlagshöhe in den meisten Regionen ausreichend gut simuliert wird. Dagegen weichen die mit dem Kontrolllauf erzielten Ergebnisse deutlich von den homogenisierten Messdaten ab (Abb. 3-10). Es werden bei allen Gebieten wesentlich höhere Niederschläge simuliert.

Man könnte vermuten, dass dies wieder teilweise auf die generellen Unterschiede zwischen Punktdaten und Flächenmitteln zurückzuführen ist. Aber auch der Vergleich des Validierungslaufs mit dem Kontrolllauf zeigt, dass der Kontrolllauf insgesamt zu hohe Niederschläge simuliert. Da sowohl Validierungslauf als auch Kontrolllauf durch die Mittelung über die Flächen ausgewertet wurden, bestehen keine Skalenunterschiede in den Ergebnissen. Daher liegen insbesondere im hydrologischen Winterhalbjahr die Werte des Kontrolllaufs unplausibel hoch, z.T. höher als die Werte des Zukunftsszenarios.

Somit sind die Unterschiede vermutlich auf grundlegende Probleme mit dem Kontrolllauf bzw. dessen Antrieb aus ECHAM4 zurückzuführen. So wird durch den ECHAM4-Lauf eine zu starke „zonale Strömung“ für Europa vorgegeben, die zu einer Überschätzung der Niederschläge führt [19]. Der Kontrolllauf simuliert damit grundsätzlich für den Ist-Zustand zu hohe Niederschläge. Der Fehler aus dem GCM bestimmt damit direkt die Güte der regionalen Modellierung.

Darüber hinaus treten auch Unterschiede zwischen der gemessenen und simulierten räumlichen Verteilung der durchschnittlichen Niederschläge auf. Diese Unterschiede sind z.B. dadurch gekennzeichnet, dass im Lee des Schwarzwalds zu geringe Niederschläge simuliert werden, weshalb in der

Region „Neckar“ eine leichte Unterschätzung der Niederschläge vorliegt [19]. Die Unschärfe der Lagegenauigkeit der REMO-Ergebnisse wird mit mindestens zweimal der Rasterweite (36 x 36 km) angegeben.

Diese Ausführungen verdeutlichen, dass beim derzeitigen Stand des MPI-Modells eine Beurteilung der zu erwartenden Veränderungen von Klimagrößen, wenn überhaupt, ausschließlich auf Basis des Vergleichs von Kontrolllauf und Szenarienlauf erfolgen sollte.

Im Vergleich der mittleren Jahrestemperatur zwischen Kontrolllauf und Szenarienlauf wird für alle Regionen eine Zunahme um 1,8°C simuliert. Dies ist sowohl durch eine deutliche Zunahme von ca. 2°C im hydrologischen Winter bedingt, als auch durch eine Zunahme von 1,7°C im hydrologischen Sommerhalbjahr.

Für die mittleren Jahresniederschläge werden zwischen Kontroll- und Szenariolauf nur sehr geringe Zunahmen simuliert, die zwischen ca. 6 mm (0,5%) für die Region „Westalpen“ und ca. 76 mm (6,7%) für die Region „Bayerische Mittelgebirge“ liegen.

Die Niederschlagszunahme im Zukunftsszenario liegt in allen Regionen im hydrologischen Sommerhalbjahr über der für den hydrologischen Winter simulierten Zunahme. Zum Teil werden im Winterhalbjahr sogar Abnahmen der Niederschläge im Zukunftsszenario simuliert. So beträgt die geringste Zunahme im hydrologischen Sommerhalbjahr ca. 4% („Westalpen“) und die maximale Zunahme ca. 9,3% („Donau und Bodensee“). Dahingegen tritt im Winterhalbjahr eine maximale Zunahme von ca. 5,3% („Oberer Main“) und eine maximale Abnahme von ca. -3,3% („Westalpen“) auf. Die Niederschlagsergebnisse sind somit in allen KLIWA-Regionen sowohl in der Höhe als auch in der räumlichen und jahreszeitlichen Zuordnung unplausibel.

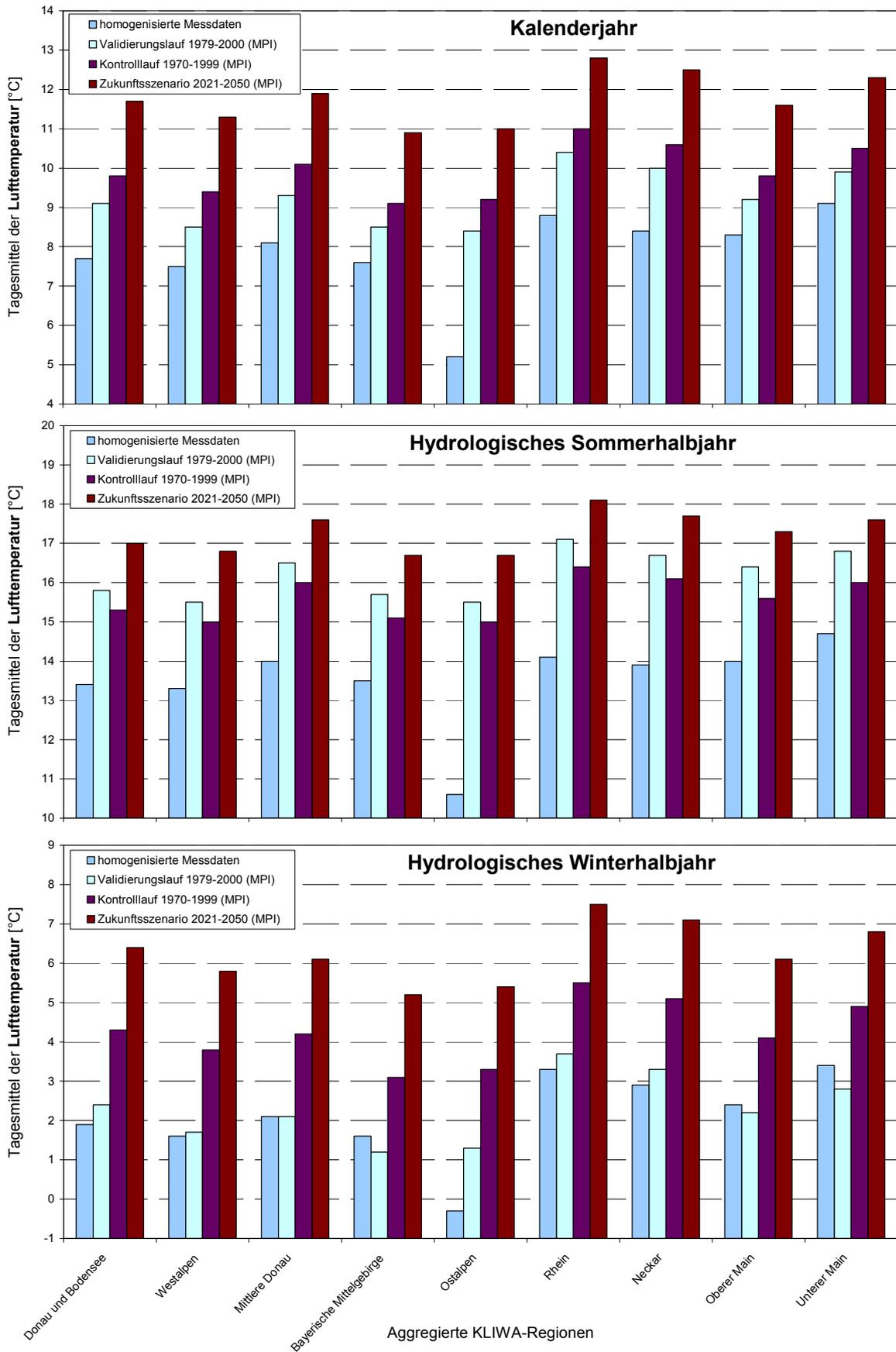


Abb. 3-9: MPI-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen Lufttemperatur

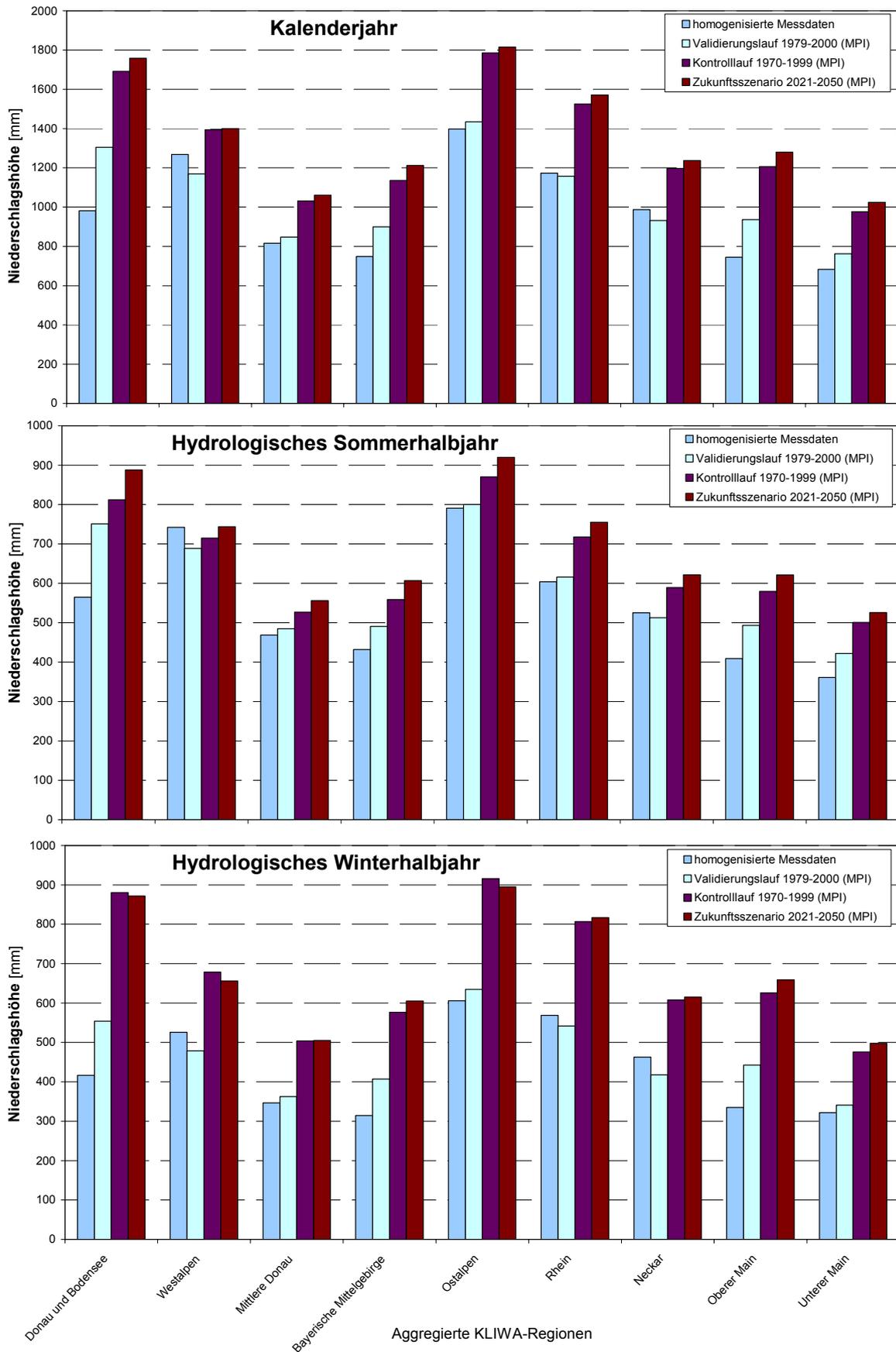


Abb. 3-10: MPI-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen **Niederschlagshöhen**



Tab. 3.5: MPI-Modell: **Absolute** Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands (Kontrolllauf) 1970-1999⁶

Kalenderjahr													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	1.9		67	-0.8	0.0				34.7	0.4	
	Westalpen	10837	1.9		6	-0.8	0.0				31.5	0.3	
	Mittlere Donau	12381	1.8		30	-0.6	0.1				28.8	-0.1	
	Bayerische Mittelgebirge	13351	1.8		76	-0.1	0.0				27.9	-0.1	
	Ostalpen	24192	1.8		29	-0.6	0.1				37.6	-0.1	
Rhein	Rhein	15960	1.8		47	-0.6	0.2				32.9	0.3	
	Neckar	15732	1.9		40	-0.6	0.1				30.7	0.2	
	Oberer Main	11960	1.8		73	-0.3	0.0				25.7	0.0	
	Unterer Main	11486	1.8		47	-0.1	0.0				27.9	0.1	
Mittel Donau		1.8		40	-0.6	0.1					32.9	0.0	
Mittel Rhein		1.8		51	-0.4	0.1					29.7	0.2	
Mittel aller Raster		1.8		45	-0.5	0.1					31.5	0.1	
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai - Okt.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	1.7		76	0.0	-0.5				28.4	0.1	
	Westalpen	10837	1.8		29	0.2	-0.4				25.6	0.2	
	Mittlere Donau	12381	1.6		29	0.2	-0.6				24.9	-0.4	
	Bayerische Mittelgebirge	13351	1.6		48	0.5	-0.6				25.3	-0.2	
	Ostalpen	24192	1.7		50	0.1	-0.5				34.2	-0.1	
Rhein	Rhein	15960	1.7		37	-0.1	-0.5				27.9	0.2	
	Neckar	15732	1.6		33	-0.1	-0.6				26.1	0.0	
	Oberer Main	11960	1.7		41	0.2	-0.6				22.9	0.0	
	Unterer Main	11486	1.6		25	0.2	-0.5				24.3	0.0	
Mittel Donau		1.7		46	0.2	-0.5					28.7	-0.1	
Mittel Rhein		1.7		35	0.0	-0.5					25.6	0.1	
Mittel aller Raster		1.7		41	0.1	-0.5					27.3	0.0	
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. - Apr.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [°C]	tmit [°C]	tmin [°C]	nied [mm]	relf [%]	ludr [hPa]	dadr [hPa]	sonn [h]	bewo [1/8]	stra [W/m ²]	wind [m/s]	
Donau	Donau und Bodensee	9307	2.1		-8	-1.6	0.6				40.8	0.5	
	Westalpen	10837	2.0		-23	-1.5	0.7				37.3	0.6	
	Mittlere Donau	12381	1.9		1	-1.1	0.6				32.6	0.0	
	Bayerische Mittelgebirge	13351	2.1		28	-0.7	0.6				30.7	0.0	
	Ostalpen	24192	2.1		-21	-1.4	0.5				40.9	-0.1	
Rhein	Rhein	15960	2.0		10	-1.1	0.6				37.7	0.4	
	Neckar	15732	2.0		7	-1.0	0.6				35.3	0.3	
	Oberer Main	11960	2.0		33	-0.7	0.6				28.5	0.2	
	Unterer Main	11486	1.9		22	-0.5	0.5				31.5	0.5	
Mittel Donau		2.0		-6	-1.2	0.6					36.9	0.1	
Mittel Rhein		2.0		17	-0.9	0.6					33.7	0.3	
Mittel aller Raster		2.0		4	-1.1	0.6					35.5	0.2	

⁶ Lufttemperatur: t_{mit} , Niederschlagshöhe: *nied*, Relative Luftfeuchte: *relf*, Luftdruck: *ludr*, Globalstrahlung: *stra*, Windgeschwindigkeit: *wind*



Tab. 3.6: MPI-Modell: **Relative** Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands (Kontrolllauf) 1970-1999⁷

Kalenderjahr													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				4.0	-0.9	0.0				25.7	10.7
	Westalpen	10837				0.5	-0.9	0.0				24.1	8.8
	Mittlere Donau	12381				2.9	-0.6	0.0				22.3	-1.9
	Bayerische Mittelgebirge	13351				6.7	-0.1	0.0				22.4	-2.2
	Ostalpen	24192				1.6	-0.8	0.0				31.0	-2.6
Rhein	Rhein	15960				3.1	-0.7	0.0				24.7	8.5
	Neckar	15732				3.4	-0.7	0.0				23.6	5.7
	Oberer Main	11960				6.1	-0.3	0.0				20.6	0.3
	Unterer Main	11486				4.8	-0.2	0.0				21.9	2.7
Mittel Donau						2.7	-0.7	0.0				26.0	1.2
Mittel Rhein						4.1	-0.5	0.0				22.9	4.5
Mittel aller Raster						3.3	-0.6	0.0				24.6	2.7
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai - Okt.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				9.3	0.0	-0.1				14.8	3.2
	Westalpen	10837				4.0	0.2	0.0				13.6	5.7
	Mittlere Donau	12381				5.4	0.2	-0.1				13.2	-11.0
	Bayerische Mittelgebirge	13351				8.6	0.6	-0.1				13.7	-5.3
	Ostalpen	24192				5.8	0.2	0.0				19.4	-3.9
Rhein	Rhein	15960				5.2	-0.2	0.0				14.7	8.2
	Neckar	15732				5.6	-0.1	-0.1				13.9	-0.9
	Oberer Main	11960				7.2	0.3	-0.1				12.5	0.1
	Unterer Main	11486				5.1	0.2	-0.1				13.1	0.9
Mittel Donau						6.4	0.2	-0.1				15.6	-3.1
Mittel Rhein						5.7	0.0	-0.1				13.7	2.1
Mittel aller Raster						6.1	0.1	-0.1				14.8	-0.7
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. - Apr.)													
Region	Fläche [km ²]	tmax [%]	tmit [%]	tmin [%]	nied [%]	relf [%]	ludr [%]	dadr [%]	sonn [%]	bewo [%]	stra [%]	wind [%]	
Donau	Donau und Bodensee	9307				-1.0	-1.8	0.1				52.5	11.8
	Westalpen	10837				-3.3	-1.7	0.1				50.8	13.9
	Mittlere Donau	12381				0.2	-1.2	0.1				46.2	0.8
	Bayerische Mittelgebirge	13351				4.9	-0.7	0.1				46.7	-0.1
	Ostalpen	24192				-2.3	-1.6	0.0				61.7	-1.5
Rhein	Rhein	15960				1.3	-1.3	0.1				49.4	9.5
	Neckar	15732				1.2	-1.1	0.1				48.7	7.1
	Oberer Main	11960				5.3	-0.7	0.1				43.6	4.1
	Unterer Main	11486				4.5	-0.6	0.0				45.4	10.1
Mittel Donau						-0.9	-1.4	0.1				53.1	3.5
Mittel Rhein						2.6	-1.0	0.1				47.3	7.7
Mittel aller Raster						0.5	-1.2	0.1				50.5	5.4

⁷ Niederschlagshöhe: *nied*, Relative Luftfeuchte: *relf*, Luftdruck: *ludr*, Globalstrahlung: *stra*, Windgeschwindigkeit: *wind*

3.5 Vergleichende Auswertung der Klimaszenarien

Die Absolutwerte der Ergebnisse des MPI-Modells lassen sich nur schwer mit denen der beiden statistischen Modelle (PIK und MR) vergleichen, wie die Erläuterungen zu den Abweichungen zwischen Kontrolllauf und den homogenisierten Messdaten sowie zwischen Kontroll- und Validierungslauf in Abschnitt 3.4 verdeutlichen. Hauptziel des hier vorzunehmenden Vergleichs sind jedoch die Modellaussagen hinsichtlich der zu erwartenden Veränderungen von Klimagrößen in der Zukunft. Zu diesem Zweck können die Differenzen zwischen den Zukunftsszenarien und den Simulationen zum Ist-Zustand bei den jeweiligen Modellen herangezogen werden.

Für das PIK-Modell liegt zwar keine Simulation für den Ist-Zustand vor, aber das statistische Modell beruht auf den homogenisierten Messdaten. Daher ist davon auszugehen, dass die Simulation des Ist-Zustands beim PIK-Modell die homogenisierten Messwerte ähnlich gut wiedergibt wie das MR-Modell. Hilfsweise kann daher für das PIK-Modell die Differenz zwischen Zukunftsszenario und homogenisierten Messwerten verwendet werden.

In den Abbildungen 3-11 und 3-12 sind daher die absoluten Differenzen zwischen

- PIK-Zukunftsszenario und homogenisierten Messwerten,
- MR-Zukunftsszenario und MR-Simulation des Ist-Zustands sowie zwischen
- MPI-Zukunftsszenario und MPI-Kontrolllauf

für mittlere Tagestemperaturen und Niederschlagssummen vergleichend dargestellt. Abbildung 3-13 zeigt zudem die prozentualen Differenzen der Niederschlagshöhen. Die Abbildungen 3-14 bis 3-17 stellen die räumliche Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen in den KLIWA-Regionen dar.

Generalisierend fasst Tabelle 3-7 die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren

für Süddeutschland im Überblick zusammen.

Lufttemperatur:

Abbildung 3-11 verdeutlicht, dass im Zukunftsszenario vom MPI-Modell die stärksten Temperaturzunahmen im Jahresschnitt mit ca. 1,8 bis 1,9°C simuliert werden. Ebenfalls starke Zunahmen mit ca. 1,6 bis 1,8°C werden vom MR-Modell simuliert. Mit dem PIK-Modell werden geringere Temperaturzunahmen von 1,0 bis 1,2°C im Jahresdurchschnitt simuliert, die verfahrensbedingt aufgeprägt und daher zu einem Vergleich mit den anderen Verfahren nicht geeignet sind.

Die deutlichsten Unterschiede ergeben sich hinsichtlich der jahreszeitlichen Verteilung der simulierten Temperaturänderungen. Für das hydrologische Sommerhalbjahr simulieren die beiden statistischen Modelle (PIK und MR) vergleichbare Temperaturzunahmen in allen Regionen von ca. 1,1 bis 1,4°C, das MPI jedoch 1,6 bis 1,8°C. Für das hydrologische Winterhalbjahr sind die Temperaturzunahmen von MR und MPI sehr ähnlich (ca. 2,0°C), während beim PIK-Modell die Zunahmen mit ca. 1°C deutlich niedriger liegen.

Die flächenhafte Darstellung der halbjährlichen Lufttemperaturänderungen zeigen, dass die regionalen Unterschiede sowohl im Sommer- wie im Winterhalbjahr gering sind (Abb. 3-14 und 3-15).

Die Unterschiede zwischen den Modellen für das hydrologische Winterhalbjahr sind dabei für das KLIWA-Vorhaben insgesamt von besonderer Bedeutung, da sie großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee haben und somit entscheidend für das zukünftig zu erwartende Abflussregime sein können.

Niederschläge:

Hinsichtlich der Niederschlagshöhen werden durch das Zukunftsszenario des MR-Modells im Jahresmittel deutliche Niederschlagszunahmen um ca. 8% simuliert (mit Ausnahme der „Ostalpen“, s. Abb. 3-13). Im



Vergleich hierzu sind die simulierten Veränderungen beim PIK- und beim MPI-Modell in fast allen Regionen geringer (im Mittel ca. 3%, in einzelnen Regionen bis maximal ca. 7%); in den zwei Alpenregionen treten beim PIK-Modell sogar Abnahmen auf.

Hinsichtlich der jahreszeitlichen Verteilung ergeben sich beim MR-Modell für den hydrologischen Winter deutliche Zunahmen (im Mittel ca. 23%, maximal bis ca. 34%), für den hydrologischen Sommer jedoch zu meist Abnahmen (im Mittel ca. 4%, in einzelnen Regionen maximal bis zu 8%). Beim PIK- und beim MPI-Modell kommt es im Sommerhalbjahr hingegen mit maximal bis zu 13% zu stärkeren Zunahmen als im Winterhalbjahr. In einigen Regionen treten beim PIK- und beim MPI-Modell im Winterhalbjahr sogar Abnahmen auf.

Die flächenhaften Darstellungen der prozentualen Veränderung der Ergebnisse im Sommer- und Winterhalbjahr (Abb. 3-16 und Abb. 3-17) zeigen folgendes:

- Beim PIK-Modell treten die stärksten Niederschlagszunahmen im Sommer vor allem im Westen und Norden Süddeutschlands (Rhein-, Neckar-, Main-Einzugsgebiet) auf. Im Winter sind kaum Zunahmen der Niederschläge zu verzeichnen.
- Das MR-Modell zeigt Niederschlagszunahmen im Sommer nur im Maingebiet. Im Winterhalbjahr des Zukunftsszenarios dagegen steigen die Niederschläge im Rhein-, Main-, Neckar- und Donauegebiet deutlich an .
- Beim MPI-Modell sind die größten Niederschlagszunahmen eher im Nordosten (Oberes Maingebiet, Bayerisches Mittelgebirge) zu verzeichnen. Dies gilt sowohl im Sommer- wie auch im Winterhalbjahr.

Die Bewertung der unterschiedlichen Ergebnisse und das weitere Vorgehen sind in Kapitel 4 enthalten.

Tabelle 3-7: Veränderung von Lufttemperatur und Niederschlag zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand

	Kalenderjahr	Hydrologischer Sommer (Mai – Oktober)	Hydrologischer Winter (November – April)
Lufttemperatur			
PIK-Modell	+ 1,1°C	+ 1,2°C	+ 1,0°C
MR-Modell	+ 1,7°C	+ 1,4°C	+ 2,1°C
MPI-Modell	+ 1,8°C	+ 1,7°C	+ 2,0°C
Niederschlag			
PIK-Modell	+ 3,1 %	+ 6,3 %	- 0,5 %
MR-Modell	+ 7,8 %	- 4,1 %	+ 22,5 %
MPI-Modell	+ 3,3 %	+ 6,1 %	+ 0,5 %

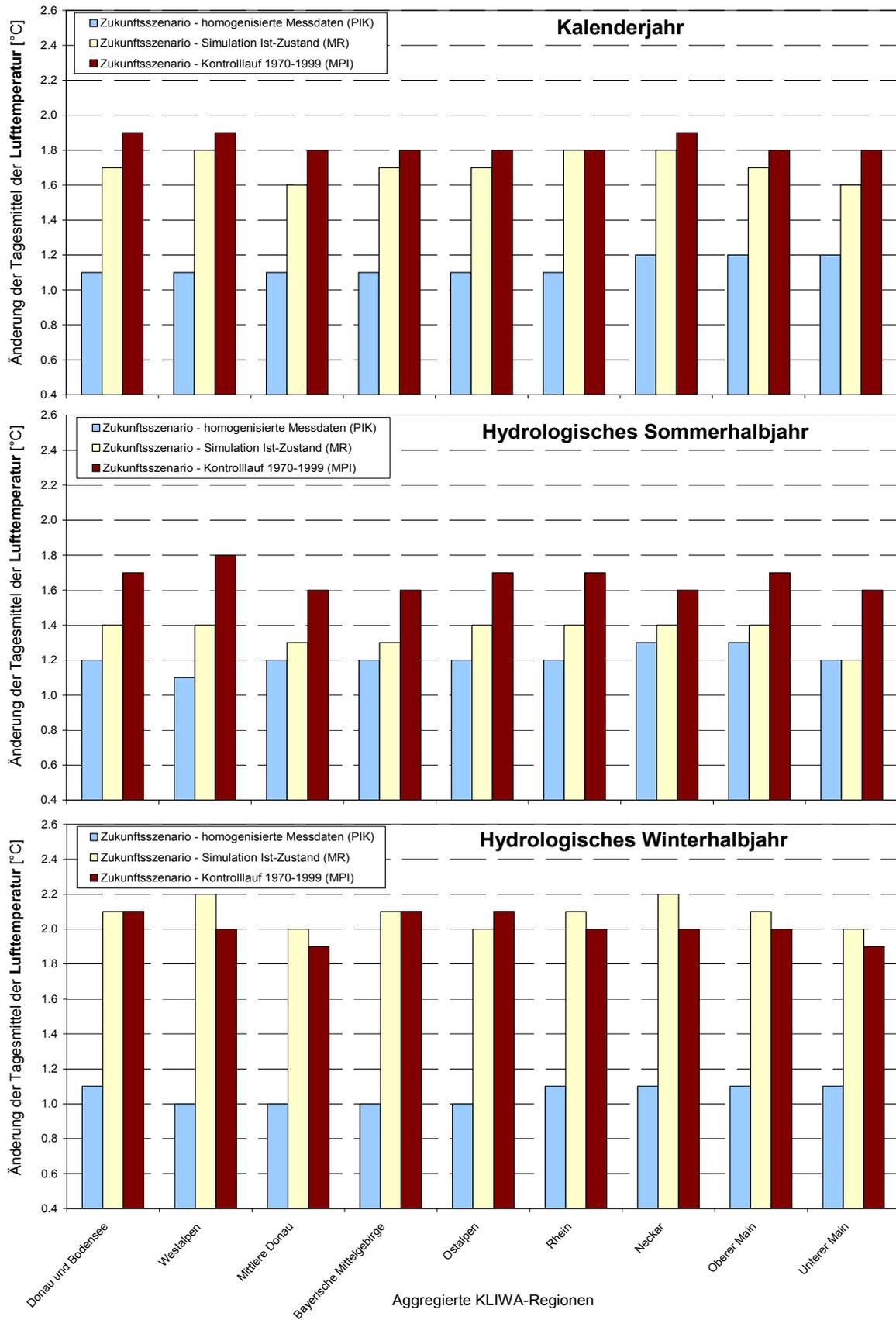


Abb. 3-11: **Absolute** Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen Lufttemperaturen zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)

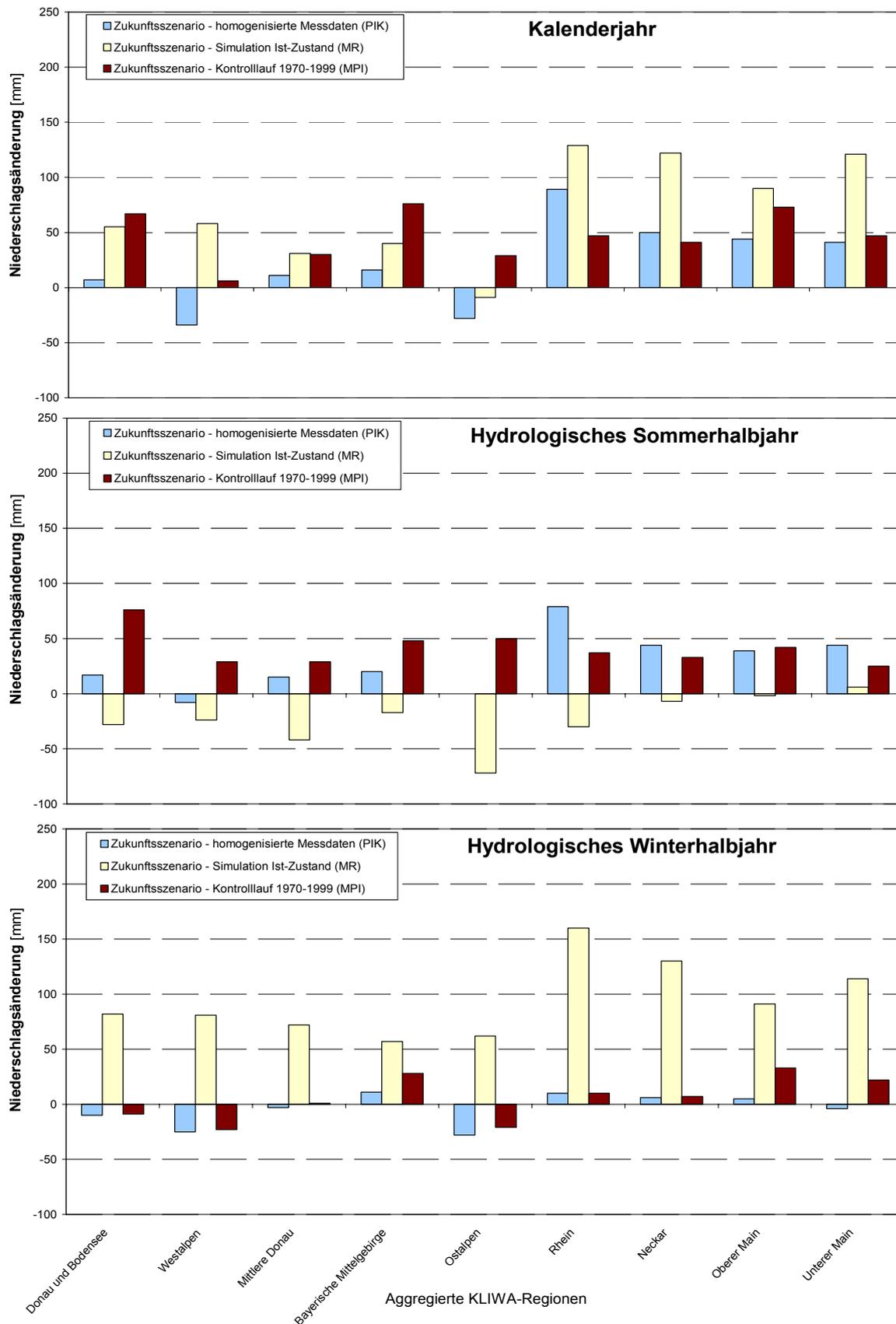


Abb. 3-12: **Absolute** Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen **Niederschlagshöhen** zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)

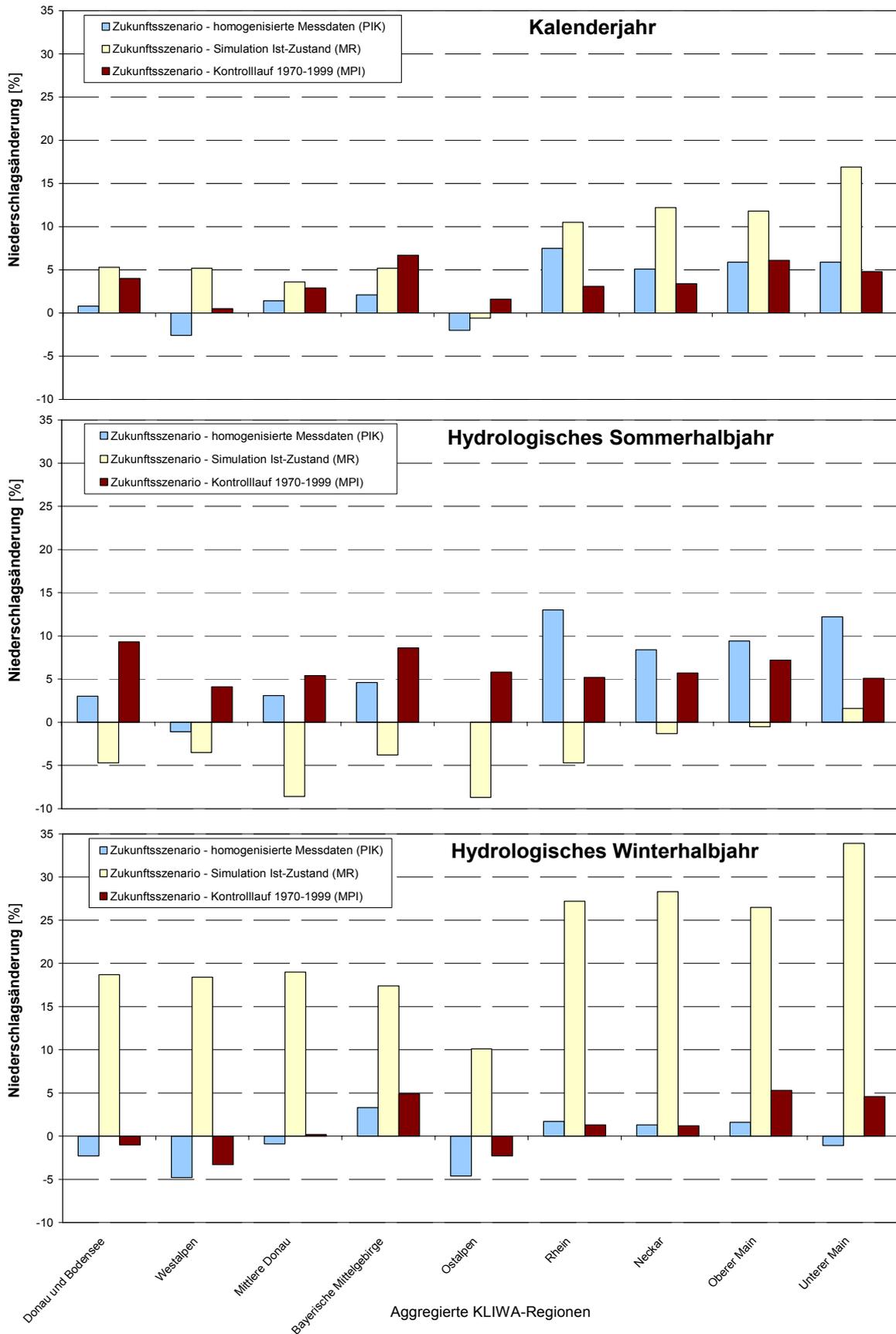


Abb. 3-13: **Relative** Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen **Niederschlagshöhen** zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)

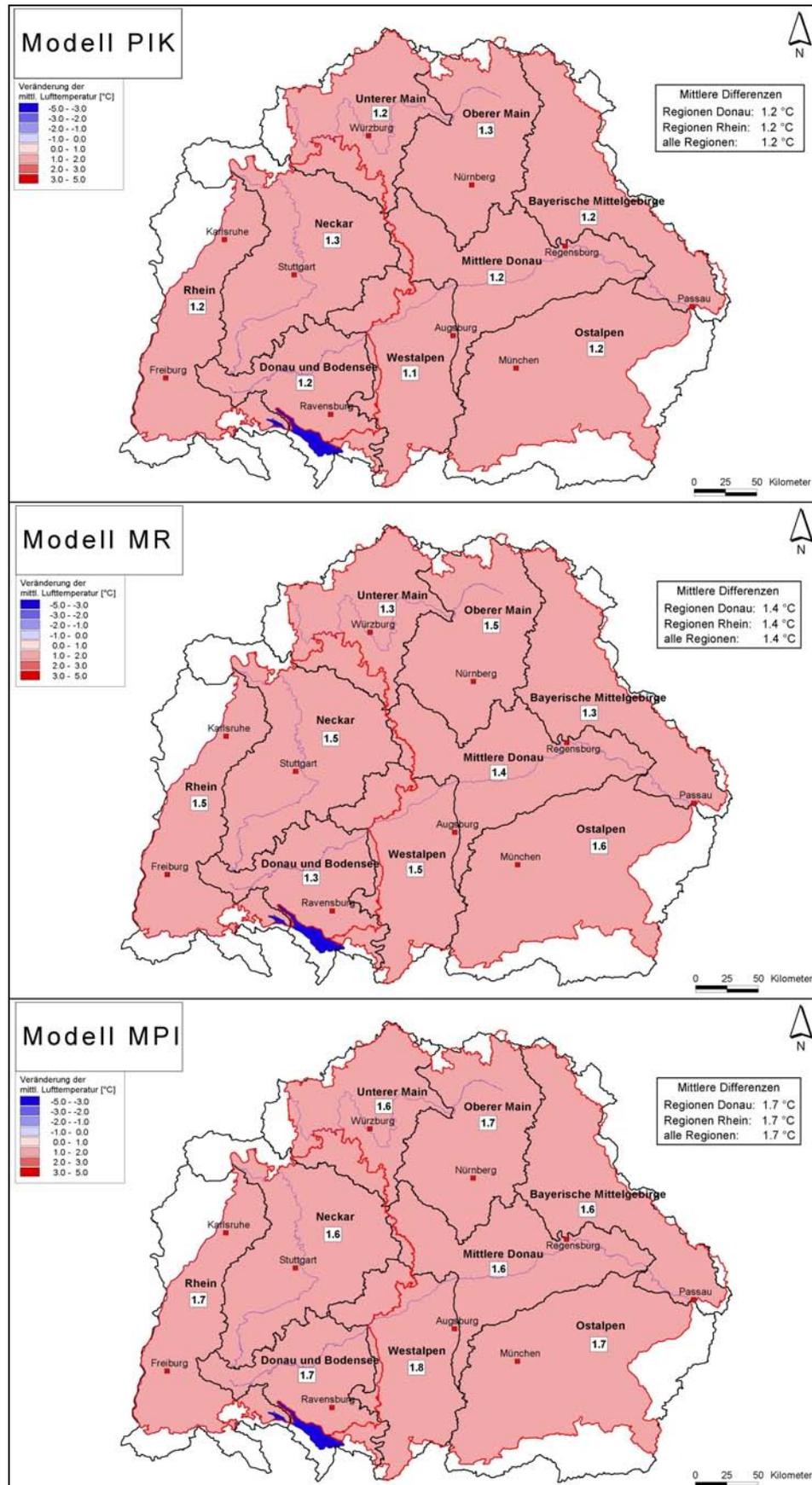


Abb. 3-14: **Absolute** Veränderungen der mittleren **Lufttemperaturen** im hydrologischen **Sommerhalbjahr** zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)

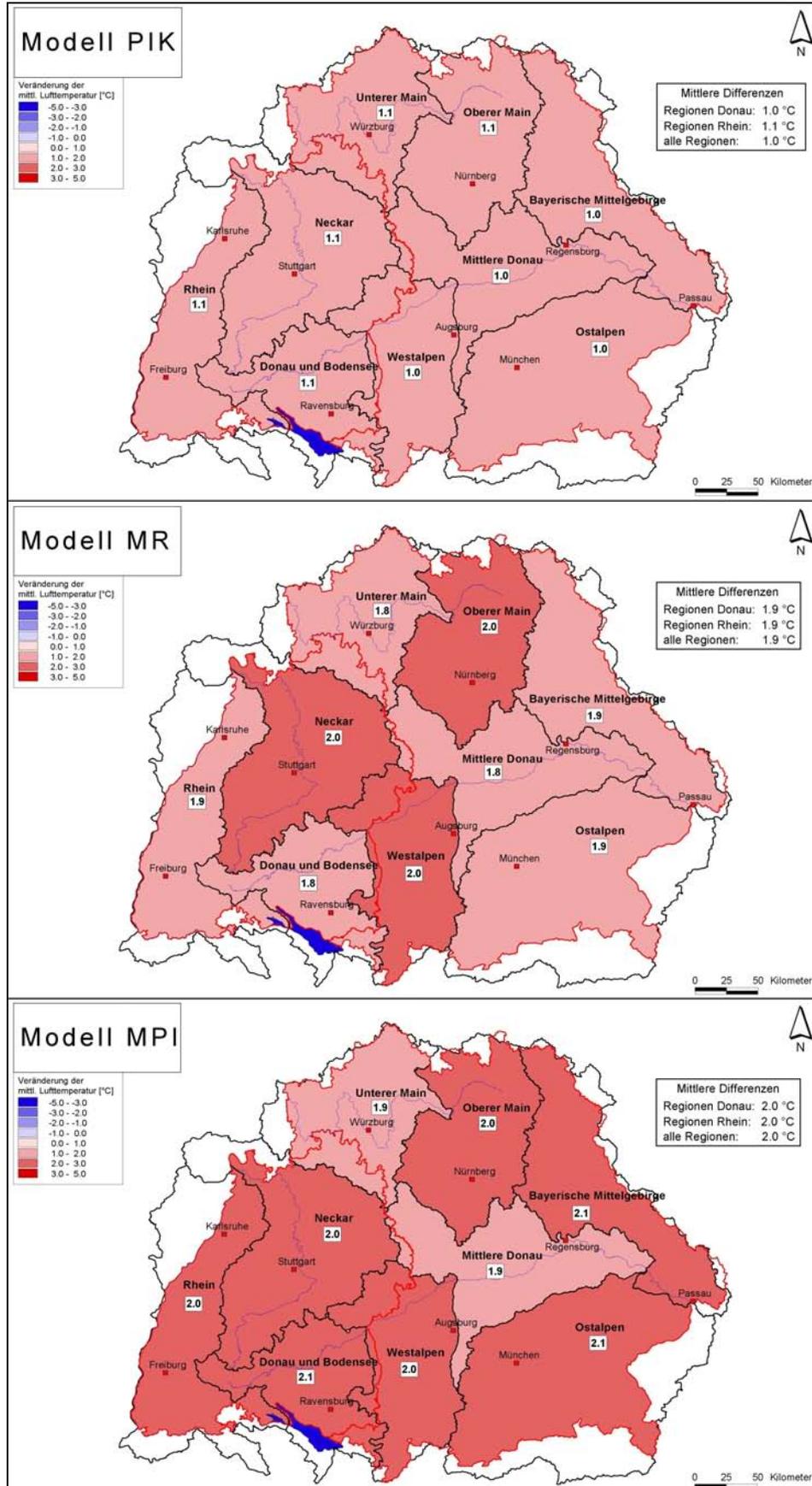


Abb. 3-15: **Absolute** Veränderungen der mittleren **Lufttemperaturen** im hydrologischen **Winterhalbjahr** zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)

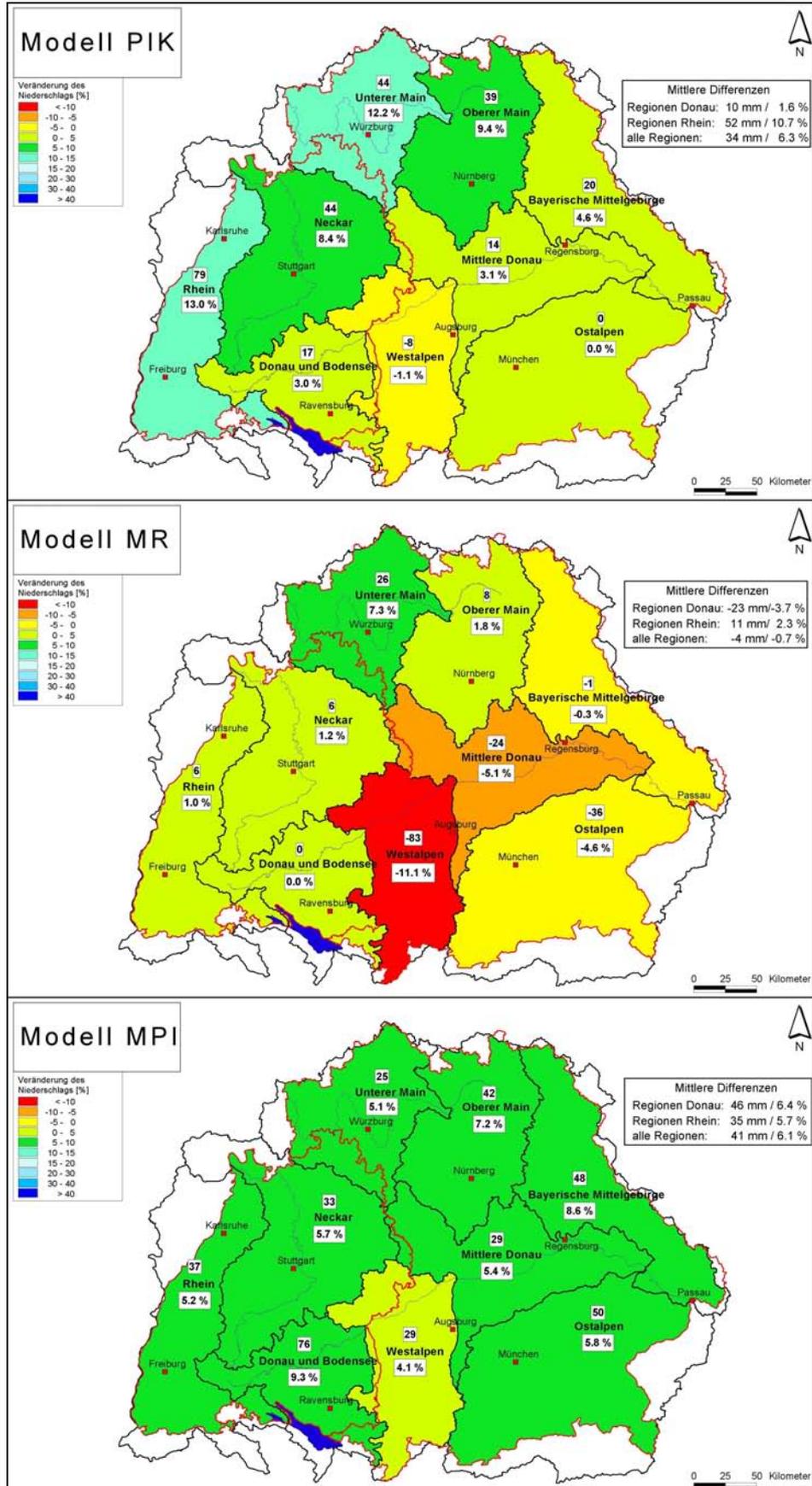


Abb. 3-16: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Niederschlagshöhen im hydrologischen Sommerhalbjahr zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR, MPI)

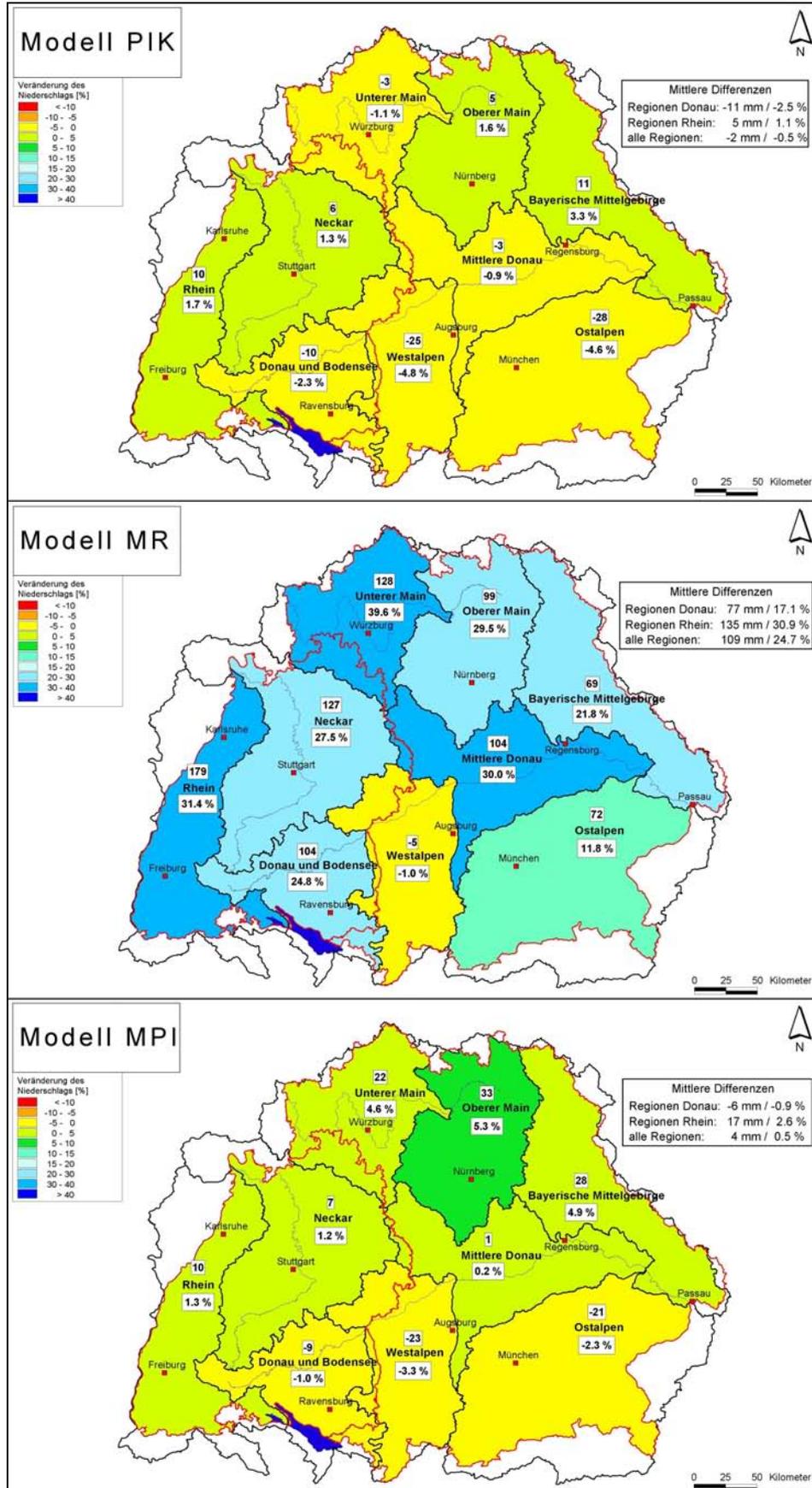


Abb. 3-17: **Absolute** und **relative** Veränderungen der mittleren **Niederschlagshöhen** im hydrologischen **Winterhalbjahr** zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR, MPI)



4 Bewertung der Methoden und Ergebnisse sowie Folgerungen für KLIWA

In den bisherigen Kapiteln sind die Übersicht über die Methodik und die Darstellungen ausgewählter Ergebnisse der drei verwendeten Modelle zur Erstellung von Klimaszenarien enthalten. Die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Methoden und Modelle zur Erstellung regionaler Klimaszenarien ist von Vorteil, da dadurch die Aussagekraft insgesamt erhöht wird. Auf Grund der drei unterschiedlichen methodischen Ansätze waren durch die Gegenüberstellung der Modellergebnisse in Kapitel 3 Plausibilitätsprüfungen möglich. Um die aber in einigen Aspekten recht deutlichen Abweichungen der Modellergebnisse einschätzen zu können, wird im folgenden versucht, die Modelle zu bewerten.

Eine solche Bewertung soll sich an einer größtmöglichen Objektivität und an der beabsichtigten Weiterverwendung der Ergebnisse im Vorhaben KLIWA orientieren. Daher ist abzuschätzen, mit welchem Modell möglichst plausible und belastbare Aussagen für die künftigen wasserwirtschaftlichen Verhältnisse in Süddeutschland erhalten werden können. Dazu werden die drei Modelle bzw. deren Ergebnisse vorerst aus klimatologischer Sicht (Kap. 4.1) und anschließend hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene hydrologische Untersuchungen (Kap. 4.2) bewertet. Auf dieser Basis werden eine zusammenfassende Bewertung (Kap. 4.3) und die entsprechenden Folgerungen für KLIWA (Kap. 4.4) erstellt.

4.1 Bewertung aus klimatologischer Sicht

Bei der Bewertung der regionalen Klimaszenarien aus klimatologischer Sicht kann eine Beurteilung der prinzipiellen Möglichkeiten und Schwächen der verwendeten Modelle sowie eine Beurteilung der Plausibilität der Ergebnisse (für den simulierten Ist-Zustand und für das Zukunftsszenario) genutzt werden.

a) Grundlegende Schwächen und Stärken der einzelnen Modelle lassen sich z.T.

aus der Analyse der jeweiligen Methodik erkennen:

PIK-Modell:

- Die Veränderungen der hydrometeorologischen Größen im PIK-Modell basieren auf dem Klima aus der Vergangenheit, so dass für die Zukunft keine neuen Extrema und Änderungen im Andauerverhalten simuliert werden können. Zukünftig mögliche Veränderungen in den Zirkulationsmustern der Atmosphäre können ebenfalls nur zum Teil berücksichtigt werden.
- Die Dauer zusammenhängender Perioden mit ähnlichen klimatischen Bedingungen wird beim PIK-Modell generell unterschätzt. Daher fehlen z.B. lang andauernde trockene oder feuchte Perioden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Verknüpfung von simulierten Zeitreihen der Temperatur mit Messdaten der anderen meteorologischen Größen eingeschränkt nur die Werte des Vortags berücksichtigt werden. Hinzu kommen Unschärfen der Clusteranalyse und der nur für Einzeltage berücksichtigten räumlichen Zusammenhänge, die weiter zur Unterschätzung der Persistenz (Erhaltungseigenschaft) des Niederschlags beitragen.

MR-Modell:

- Das MR-Modell verwendet im Gegensatz zum PIK-Modell klassifizierte Wetterlagen auf Basis der Ergebnisse des globalen Klimamodells. Durch die Rekombination längerer Witterungsabschnitte kann beim MR-Modell die Persistenz trockener und feuchter Perioden weitgehend bewahrt bleiben.
- Um die Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsklassen des Temperaturregimes an die Häufigkeitsverteilung des Feuchteregimes anzupassen, werden im MR-Modell die Niederschläge um

einen Faktor erhöht. Dieser Erhöhungsfaktor, der nur für Änderungen zu feuchten Zuständen hin anwendbar ist, wurde auf 10 % festgesetzt. Es können daher auch Werte außerhalb der bisherigen Spannweite der Beobachtungsdaten simuliert werden. Die räumliche Struktur der Niederschlagswerte zwischen Stationen bleibt dadurch erhalten, aber die absoluten Differenzen zwischen den Stationen nehmen zu.

- Die Festlegung der Grenzen der Niederschlagsklassen beeinflusst die Anpassung der Häufigkeitsverteilung.
- Die getrennte Behandlung von Niederschlag und anderen meteorologischen Größen kann zu Inkonsistenzen in den simulierten Tageswerten führen.

MPI-Modell:

- Die berechneten Daten des MPI-Modells sind für die Zukunft nicht an Beobachtungsdaten (Messdaten) gebunden, so dass auch Werte außerhalb der Spannweite beobachteter Werte simuliert werden können. Änderungen in den Häufigkeiten und Extreme aller meteorologischer Größen sind somit möglich.
- Auf Grund des hohen Rechenaufwands des MPI-Modells kann nur ein einziger Simulationslauf für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario zur Verfügung gestellt werden. Vom PIK- und MR-Modell werden dagegen mehrere Simulationsläufe erstellt.
- Das MPI-Modell nutzt direkt die Ergebnisse des ECHAM4/OPYC3 als Randantrieb. Da der Kontrolllauf von ECHAM4/OPYC3 modellbedingt eine Temperaturüberschätzung aufweist, ist ein Vergleich des Kontrolllaufs des MPI-Modells und der Messdaten nicht sinnvoll. Zur Einschätzung der Realitätsnähe des MPI-Modells kann der Vergleich zwischen Validierungslauf (Antrieb durch Re-Analysen) und Messdaten genutzt werden.

Die Trends der Klimavariablen des MPI-Modells aus der Differenz von Zukunftsszenario und Kontrolllauf sind von der Temperaturüberschätzung zwar wenig beeinflusst [30], dennoch sind prinzipiell nur mittlere Zustände und deren Statistik vergleichbar. Kontroll- und Szenariolauf sind Klimäläufe, die nicht das reale Wettergeschehen wiedergeben. Daher sollte nur die relative Änderung der jeweiligen Ergebnisse verglichen werden.

- b) Prinzipiell sind beim Vergleich der Modellergebnisse auch noch deren unterschiedliche räumlich-zeitliche Auflösungen zu beachten (PIK- und MR-Modell: Punktwerte für Stationen und Tageswerte; MPI-Modell: Flächenwerte für Modellraster und Stundenwerte, die zu Tageswerten aggregiert wurden):

- Die Stationsdaten des PIK- und des MR-Modells geben eine eindeutige punktuelle Information. Um aber flächenhafte Ergebnisse zu erhalten, müssen Interpolationsverfahren verwendet werden, die die räumlich-zeitliche Variabilität beeinflussen. Insbesondere beim PIK-Modell, bei dem die Modellergebnisse nur für 54 Stationen in Süddeutschland vorliegen, bringt dies eine Unsicherheit in den Ergebnissen mit sich.
 - Die Flächenwerte des MPI-Modells decken das gesamte Gebiet ab. Die Diskretisierung des Untersuchungsgebietes in 18 x 18 km große Rasterzellen und die darin erforderlichen Mittelung der Parameter bedingt aber Unschärfen der realen regionalen Topographie. Dies betrifft die orographisch beeinflussten Parameter bzw. Ergebnisse sowie deren räumlich-zeitlicher Verteilung. Zudem sind die Ergebnisse mit einer Unschärfe der Lagegenauigkeit von mindestens zweimal der Rasterweite (36 x 36 km) behaftet.
- c) Bei allen drei Modellen handelt es sich um „Downscaling“-Verfahren. Damit werden mit unterschiedlichen Modellannahmen großräumige Klimainformationen



aus dem globalen Klimamodell auf feiner aufgelöste (regionale) Klimainformationen übertragen. Daher wird im weiteren bewertet, in wie weit die Modelle dieser Regionalisierungsaufgabe gerecht werden:

Solche Modelle sollten zur Ableitung zukünftiger Klimaszenarien in der Lage sein:

- den Ist-Zustand des Klimas ausreichend genau wiederzugeben und
- im Szenariolauf möglichst viele verlässliche („sichere“) und möglichst wenige unsichere Informationen über das künftige Klima aus dem GCM zu übernehmen (beides dient zur Einschränkung der Unsicherheit bzgl. des künftigen Klimas auf der regionalen Skala) und typische regionale Gegebenheiten des Klimas der betrachteten Region bei der Szenarienerstellung (z.B. Luv-Lee-Effekte) zu berücksichtigen.

Wiedergabe des Ist-Zustands des Klimas:

Die Wiedergabe des Klimas für den Ist-Zustand über den Vergleich der Modellergebnisse mit beobachteten Klimavariablen sowie deren räumlich-zeitlich-statistischen Charakteristiken wäre an sich für die Bewertung der Modelle bzw. die Beurteilung von deren Plausibilität sehr nützlich. Nun sind aber

- für das PIK-Modell nur die homogenisierten Messdaten für den Ist-Zustand zur Verfügung gestellt worden
- beim MPI-Modell systematische Temperaturüberschätzungen für den Kontrolllauf für den Ist-Zustand vorhanden, die eindeutig nicht aus dem eigentlichen regionalen Klimamodell, sondern aus dem GCM stammen.

Nur für das MR-Modell lässt sich feststellen, dass der simulierte Ist-Zustand im allgemeinen gut mit den homogenisierten Messwerten übereinstimmt.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Kriterien wird das MR-Modell positiv bewertet.

Als Fazit kann gezogen werden, dass eine Bewertung der drei verwendeten Modelle nur auf Basis der Wiedergabe des Ist-Zustands zwar wichtig ist, aber allein nicht ausreicht. Es sind weitere Kriterien wie Vor- und Nachteile der angewendeten Methodik sowie Plausibilität des Zukunftsszenarios heranzuziehen.

Szenarien für künftige Klimabedingungen:

Zur Beurteilung der drei verwendeten Modelle aus klimatologischer Sicht ergeben sich, bezogen auf das Zukunftsszenario, folgende Aspekte:

- Nutzung der großräumigen Information aus GCM-Modellläufen:

Bei den einzelnen Verfahren werden die GCM-Ergebnisse in unterschiedlichem Ausmaß genutzt: Trendinformationen der Lufttemperatur (PIK-Modell), Häufigkeitsverteilungen der Wetterlagen (MR-Modell), aber auch dynamische Antriebsdaten aller Klimaelemente aus den GCM-Ergebnissen (MPI-Modell).

Die zeitliche bzw. räumliche Ausprägung der Variabilität bzw. der Extreme der Modellergebnisse wird durch die Art der verwendeten Informationen aus GCM-Modellläufen beeinflusst. Daher wird am meisten Information aus dem GCM beim MPI-Modell und am wenigsten beim PIK-Modell übernommen, während das MR-Modell eine mittlere Position einnimmt.

- Eintrag der Unsicherheiten aus GCM-Ergebnissen:

Der grundsätzlich positiven Nutzung der GCM-Ergebnisse steht der negative Effekt verstärkter Unsicherheiten gegenüber. Dementsprechend wird beim PIK-Modell eine geringe, beim MR-Modell eine mittlere und beim MPI-Modell eine hohe Unsicherheit aus dem GCM übernommen.

Dabei sind die Unsicherheiten für Niederschlag und Temperatur unter-

schiedlich stark ausgeprägt. Temperaturen werden z.B. sicherer wiedergegeben als Niederschläge. Downscaling-Verfahren reduzieren die Unsicherheit der GCM-Ergebnisse, da sie zusätzliche, kleinräumige (regionale) Informationen über die Klimacharakteristik nutzen.

- Nutzung von Informationen bzgl. regionaler klimatischer Charakteristika:

Regionale Modifikationen des Klimas (z.B. Luv-Lee-Effekt oder Höhenabhängigkeiten meteorologischer Variablen) werden durch die verwendeten Modelle bei der Szenarienerstellung z.B. durch Aufprägung beobachteter statistisch-empirischer Stationsbeziehungen, aber auch durch die direkte Einbindung einer Modelltopographie im dynamischen Modell berücksichtigt. Diese regionalen Komponenten werden von den Modellen in ähnlichem Ausmaß genutzt, wobei das MPI-Modell im Vergleich am meisten flächenhafte Informationen mit einbezieht.

Gerade der letzte Punkt unterstreicht, dass durch die Nutzung von Downscaling-Verfahren ein bedeutender Qualitätszuwachs erreicht wird, indem die GCM-Ergebnisse nicht direkt, sondern erst nach deren Regionalisierung genutzt werden. Ein solches Vorgehen der Übernahme von Ergebnissen aus GCM ohne Downscaling für regionale Aussagen, was immer noch zuweilen durchgeführt wird, entspricht nicht dem Stand der regionalen Klimaforschung.

Die hier verwendeten Modelle für das Downscaling weisen ein besonders hohes Potential für die Erstellung von Szenarien für zukünftige mittlere Bedingungen auf. Bezüglich der Variabilitäten und Extreme des Niederschlags bestehen noch Schwächen. Variabilität und Extreme dürften für die Temperatur deutlich besser wiedergegeben sein als für den Niederschlag.

Als zusammenfassende Bewertung aus klimatologischer Sicht zeigt sich, dass die verwendeten Modelle von einem „idealen“

Verfahren generell deutlich, jedoch unterschiedlich weit entfernt sind. Grundsätzliche Unterschiede bestehen in der Übernahme großräumiger Informationen aus GCM-Modellläufen und dem damit verbundenen Eintrag von Unsicherheiten.

Die bei allen Modellen noch vorhandenen Schwächen in der Modelltechnik lassen eine eindeutige Präferenz für ein bestimmtes Modell aus klimatologischer Sicht nicht zu. Derzeit erscheinen jedoch die Ergebnisse des MR-Modelles am geeignetsten, um regionale Aussagen für einzelne meteorologische Elemente zu ziehen. Mittelfristig wird jedoch die dynamische regionale Modellierung vorteilhafter sein, um das breite Spektrum der Anwendungsgebiete der Klimafolgen abdecken zu können. Allerdings sind hier noch intensive Entwicklungen zur Verbesserung der Validierung sowie im Bereich der globalen Modellierung (Kontrolllauf) notwendig [1].

4.2 Bewertung aus hydrologischer Sicht

Generell ist bei der Bewertung der Klimaszenarien für hydrologische Untersuchungen zu beachten, dass die Eignung der drei Modelle je nach hydrologischer Fragestellung von der Qualität der Wiedergabe verschiedener Klimavariablen und deren statistischen Eigenschaften abhängt.

Im Einzelnen sind nachstehend für wesentliche hydrologische Fragestellungen die dafür jeweils in erster Linie relevanten Klimainformationen angegeben, die möglichst verlässlich vorliegen sollten:

- Mittlere Abflussdynamik (mittlere langjährige, saisonale Ganglinie des Abflusses):
Erforderlich sind dafür vor allem der mittlere und saisonale Verlauf des Niederschlags, der Schneeschmelze und der mittlere und saisonale Verlauf der Verdunstung.
- Aktuelle Verdunstung (insbesondere Mittelwert und saisonale Dynamik):
Erforderlich sind dafür vor allem der mittlere und saisonale Verlauf des Niederschlags, der mittlere und saisonale



Verlauf der Temperatur, und Informationen über Wind und Luftfeuchte.

- Bodenfeuchte, Grundwasserneubildung (jeweils mittlere und saisonale Dynamik):
Neben dem saisonalen Verlauf der Verdunstung sind hierfür auch der saisonale Verlauf des Niederschlags und dessen raum-zeitliche Variabilität erforderlich.
- Schneeschnmelze:
Der saisonale Niederschlagsverlauf und die zugehörige Temperaturdynamik sind hierfür von besonderem Belang, ebenso der zeitliche Verlauf des Schneefalls für die Schneeakkumulation und die damit mögliche Schneeschnmelze.
- Hydrologische Extreme (Hoch- und Niedrigwasser):
Wegen der großen Bedeutung von Hochwasser wird hier zwischen Ereignissen kleiner bis mittlerer Jährlichkeiten (ca. $T = 10$ bis 50 Jahre) und Extremhochwassern ($T > 100$ Jahre) unterschieden. Da es sich um Ereignisse mit relativ kurzer Dauer (Stunden bis Tage) handelt, ist insbesondere die zeitliche Variabilität des Niederschlags von großer Bedeutung.
 - Mittlere Hochwasser:
Maßgeblich sind neben der mittleren und saisonalen Niederschlagsdynamik immer auch die räumlich-zeitliche Variabilität des Niederschlags, bei Schneeschnmelze auch Temperaturen sowie für den möglichen Gebietsrückhalt von Regen und Schmelzwasser mittlere Bodenfeuchten.
 - Extreme Hochwasser:
Neben den Bedingungen für mittlere Hochwasser ist die räumlich-zeitliche Niederschlagsdynamik und die absolute Menge des Extremniederschlags noch wichtiger. Die Bodenfeuchte ist wenig bedeutend.
 - Niedrigwasser:

Hier spielt insbesondere die zeitliche Variabilität des Niederschlags eine Rolle, weil diese auch die Auftrittswahrscheinlichkeit und Dauer niederschlagsfreier oder -armer Perioden bestimmt. Hinzu kommt die Verdunstung (aktuell und potentiell) und - mit etwas geringerer Wichtigkeit - die Bodenfeuchte zu Beginn der Trockenperiode.

Die folgende Einschätzung der Eignung der drei Modelle zur Erstellung regionaler Klimaszenarien beruht auf deren Erstellungsmethodik, der Untersuchung der Ergebnisdaten (insbesondere für das Zukunftsszenario) und der Bewertung aus klimatologischer Sicht. Bei dieser Einschätzung ist noch keine Weiterverwendung in hydrologischen Modellen (z.B. Wasserhaushaltsmodellen) berücksichtigt:

Mittlere Abflussdynamik und Verdunstung:

- Für diese Fragestellungen, für die insbesondere mittlere und saisonale Bedingungen bedeutsam sind, können die statistischen Verfahren (PIK- und MR-Modell) als (zumeist) befriedigend eingestuft werden. Das dynamische MPI-Modell fällt dabei etwas ab.

Hydrologische Extremzustände:

- Das Zukunftsszenario des PIK-Modells ist wegen des Persistenzproblems (siehe 4.1) sowohl für die Simulation von Hochwasser (Maximalwerte der Dauerstufen des Niederschlags werden unterschätzt) als auch für die Simulation von Trockenperioden und Niedrigwasser nicht geeignet. Während die durchschnittliche Anzahl von (hydrologischen) Trockentagen pro Jahr beim Zukunftsszenario bei den meisten Stationen nur geringfügig niedriger ist als bei den homogenisierten Messdaten, ist die durchschnittliche Anzahl von Trockenperioden pro Jahr deutlich (ca. 50%) niedriger.
- Für die Simulation von Trockenperioden zeigte sich beim MR-Modell, dass die relative Häufigkeit der hydrologischen Trockentage ($N \leq 1$ mm) für den

Ist-Zustand jeweils gut wiedergegeben wird.

- Das Zukunftsszenario des MPI-Modells wäre für die Simulation von Hochwasserperioden und Trockenperioden (Niedrigwasser) zwar prinzipiell besser geeignet, da es die räumlich-zeitliche Variabilität der Niederschläge prinzipiell realitätsnäher und regional konsistenter beschreiben könnte. Da jedoch die simulierten Temperatur- und Niederschlagsdaten erheblich über den gemessenen Werten liegen, kommt eine direkte Anwendung des Kontrolllaufs wie auch des Zukunftsszenarios in hydrologischen Modellen derzeit nicht in Frage.

Hinzu kommt, dass eine Korrektur der geringen Lagegenauigkeit bei REMO für die hydrologische Modellierung nur bedingt möglich ist. Ein Ausweg bietet hier die künftige Erhöhung der räumlichen Auflösung bei REMO, die gleichzeitig aber an modelltechnische Verbesserungen gekoppelt sein muss.

- Kleine und mittlere Hochwasserereignisse werden insgesamt von allen Modellen besser als seltene Ereignisse dargestellt, da mittlere/saisonale Bedingungen besser getroffen werden.

Bodenfeuchte/Grundwasserneubildung/ Schneeschnmelze:

Diese Fragestellungen können mit allen drei Verfahren bedingt bis befriedigend analysiert werden, d.h. die Qualität der Modellergebnisse liegt zwischen der guten Eignung der Modelle für mittlere Verhältnisse und der eingeschränkten Eignung für hydrologische Extremzustände.

4.3 Zusammenfassende Bewertung der Methoden und Ergebnisse

Folgende zusammenfassenden Aussagen zur Bewertung der Modelle und deren Ergebnisse lassen sich aus den Überlegungen in den Abschnitten 4.1 und 4.2 ableiten:

- Die Anwendung von Downscaling-Verfahren als Regionalisierungsmethode bringt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur direkten Nutzung von GCM-Ergebnissen. Demnach ist eine differenzierte regionale Betrachtung der Klimatologie über klimatologische Regionalisierungsverfahren für regionale hydrologische Wirkungsanalysen unerlässlich.
- Downscaling-Verfahren sind unterschiedlich gut geeignet, um hydrologische Auswirkungen der Klimaänderungen abzubilden.
- Es lassen sich klare Unterschiede in der Eignung der Modelle erkennen, je nachdem welche hydrologische Fragestellung untersucht werden soll:
 - Die Eignung der drei Modelle zur Analyse mittlerer/saisonaler Bedingungen ist vergleichsweise hoch. Für Fragestellungen, für die die zeitliche und die räumliche Variabilität der Niederschläge bedeutsam sind, ist die Eignung weniger gut. Es werden daher kleinere bis mittlere Hochwasser besser als seltene Ereignisse dargestellt.
 - Bei der Simulation von Hoch- und Niedrigwasserereignissen zeigt das PIK-Modell Schwächen, weil es die Persistenz hydrologischer Prozesse nicht wiedergibt. Das MR-Modell ist hier aufgrund besserer Repräsentanz der Variabilität und höherer Persistenz deutlich besser geeignet.
 - Das MPI-Modell könnte prinzipiell im Vergleich zum MR-Modell zwar die raum-zeitliche Variabilität besser treffen, allerdings ist es für eine direkte Anwendung in hydrologischen Modellen derzeit ungeeignet, da es deutliche Abweichungen im Kontrolllauf von der gemessenen Klimatologie aufweist und noch erhebliche Probleme bei der Lagegenauigkeit von Luv-Lee-Effekten der Niederschläge bestehen.



4.4 Folgerungen für KLIWA

Die Ergebnisse der hier untersuchten regionalen Klimamodelle weisen wie erwartet eine teilweise erhebliche Bandbreite auf. Dies dürfte neben den verfahrenstechnischen Unterschieden auch darin begründet sein, dass sich die derzeit vorliegenden Verfahren noch in der Entwicklungsphase befinden. Alle Modelle weisen zwar noch Unsicherheiten auf, ihre Ergebnisse zeigen jedoch in die selbe Richtung.

Um auf der Basis der derzeit vorliegenden Ergebnisse erste Konsequenzen für die Wasserwirtschaft der Länder Baden-Württemberg und Bayern ableiten zu können, wurde eine Wertung der Ergebnisse der verschiedenen Modelle durchgeführt [1, 4], die hauptsächlich klimatologische und hydrologische Bewertungskriterien enthält.

Die Bewertung an Hand dieser Kriterien ergab folgendes:

- Die Lufttemperaturen und die Niederschläge für den Ist-Zustand werden vom MR-Modell vergleichsweise gut wiedergegeben.
- Beim PIK-Modell ist aufgrund fehlender Simulation des Ist-Klimas eine Beurteilung der Modellgüte nur indirekt durch den Vergleich mit dem Zukunftsszenario und durch eine mündliche Aussage der Modellentwickler zur mittleren Abweichung möglich. Die Änderungen im Zukunftsszenario sind beim PIK-Modell bis auf den aufgeprägten Temperaturtrend gering. Die Abweichungen der Ist-Simulation zu den gemessenen Daten sollen nach Aussage der Modellentwickler nur einige Prozente betragen.
- Die Ergebnisse des MPI-Modells weisen für den Ist-Zustand (Kontrolllauf) zu große Abweichungen auf. Diese Abweichungen stammen allerdings aus Eingangsdaten des GCM-Modells und sind nicht auf Modelleigenschaften des Regionalisierungsmodells zurückzuführen.

- Der Fehlereinfluss des GCM auf die Ergebnisse ist beim PIK-Modell am geringsten. Verfahrensbedingt unterscheiden sich allerdings auch die Ergebnisse, bezogen auf das Zukunftsszenario, nur relativ wenig vom Ist-Zustand.
- Beim PIK-Modell können Temperatur- und Niederschlagsmaxima in der Zukunft verfahrensbedingt nur die höchsten Werte der Ist-Zeit erreichen. Daher werden in diesem Aspekt das MR- und das MPI-Modell besser bewertet.
- Niederschläge an mehreren aufeinander folgenden Tagen (z.B. Dauerstufe 10 Tage), die für das Abflussverhalten bei Hochwasser von entscheidender Bedeutung sind, werden vom PIK-Modell unzureichend modelliert. Daher sind die Ergebnisse des PIK-Modells für die Beurteilung des zukünftigen Hochwassergeschehens nicht geeignet.
- Die räumliche Auflösung der Ergebnisdaten und die zeitliche Diskretisierung sind beim MPI-Modell prinzipiell am größten. Dagegen bestehen Schwächen in der Darstellung der Topographie und in der Lagegenauigkeit mit den modellintern-meteorologischen Konsequenzen (z.B. fehlerhafte Zuordnung des Niederschlags westlich oder östlich des Schwarzwald-Hauptkammes). Dies führt derzeit zu Unsicherheiten, die den prinzipiellen Vorteil der höheren räumlich-zeitlichen Auflösung aufheben.

Zusammenfassend hat die Bewertung folgendes ergeben [1]:

- Derzeit erscheinen die Ergebnisse der Klimaszenarienrechnungen nach dem MR-Modell, bei dem statistische Verfahren mit einer dynamischen Wetterlagenklassifikation verknüpft sind, für das Zukunftsszenario am wahrscheinlichsten, da sie tendenziell mit den aus den Langzeituntersuchungen abgeleiteten Ergebnissen übereinstimmen. Auch treten beim MR-Modell nur gerin-

- ge Differenzen zwischen simuliertem Ist-Zustand und den Messdaten der mittleren Lufttemperatur und Niederschlagshöhe auf. Weiterentwicklungen des Verfahrens sind wünschenswert.
- Mittelfristig wird die dynamische regionale Modellierung (u.a. REMO) am besten geeignet sein, um die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt genügend genau quantifizieren zu können. Allerdings werden für REMO noch intensive Entwicklungen hinsichtlich der Anpassungsgüte (Validierung) ebenso wie für die globale Modellierung (Kontrolllauf) notwendig sein.
 - Die Ergebnisse des PIK-Modells geben auf Grund der verfahrensbedingten Einschränkungen die untere Grenze möglicher regionaler Auswirkungen der Klimaänderung wieder; die Ergebnisse für Süddeutschland zeigen nur geringe Unterschiede zum Jetztzeit-Klima.
- Auf Grund dieser Bewertung wurden im Rahmen von KLIWA derzeit mit Priorität die Ergebnisse des MR-Modells den weiteren Untersuchungen zugrundegelegt. Für die Abschätzung der Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt werden deshalb im folgenden Kapitel 5 die Ergebnisse des MR-Modells verwendet.



5 Darstellung der Ergebnisse

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 4 beruhen alle im folgenden dargestellten Werte auf den Ergebnissen des MR-Modells. Wesentliche Zielsetzung ist dabei die Schaffung eines Überblicks aus den bisher vorliegenden Untersuchungen für das Zukunftsszenario (2021 bis 2050) in Relation zum Ist-Zustand (1971 bis 2000).

Es werden unterschiedliche Arten von Daten vorgestellt und zwar:

- meteorologische Daten (Kapitel 5.1),
- Abflüsse ermittelt aus Wasserhaushaltsmodellen (Kapitel 5.2) sowie
- Bemessungsdaten (Klimaänderungsfaktoren in Kapitel 5.3).

Dabei beruhen die

- Darstellungen zu Niederschlagssummen auf den Daten für 537 Stationen (davon 160 in Baden-Württemberg, 331 in Bayern und 46 Stationen außerhalb; vgl. Abb. 3-5) und
- Darstellungen zu anderen Klimagrößen auf Daten von 67 Klimastationen (davon 23 in Baden-Württemberg, 31 in Bayern und 13 Stationen außerhalb; vgl. Abb. 3-2).

Die folgenden Kartendarstellungen für Baden-Württemberg und Bayern für diese Daten basieren auf einem in [22] beschriebenen Interpolationsverfahren, das im Wesentlichen die Abhängigkeit klimatologischer Parameter von der Geländehöhe berücksichtigt, eine entfernungsgewichtete Interpolation der auf Meeresspiegelhöhe reduzierten Parameter durchführt und die Interpolationsergebnisse mit Hilfe eines Geländemodells und der Regressionsgleichung der Höhenabhängigkeit wieder auf die vorliegende Geländehöhe überführt.

Somit werden die Abbildungen in Kapitel 3, mit denen ein Überblick zwischen den verschiedenen Klimaszenarien vermittelt wur-

de, durch die Darstellungen in diesem Kapitel ergänzt. Alle verwendeten Daten und Auswertungen haben Tageswerte als Grundlage.

5.1 Hydrometeorologische Ergebnisse

5.1.1 Spannweite der Lufttemperaturen und der Niederschläge

Um den Wertebereich der simulierten Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten aufzuzeigen, wurden die Spannweiten dieser für den Wasserhaushalt wichtigen Größen (Tageswerte) ermittelt:

- für die hydrologischen Halbjahre
- für die Ist-Zeit (1971-2000) und für die Zukunft (2021-2050).

Für die Zukunft waren Grundlage die Tageswerte der Dekaden 2021-2050 aus 600 Jahren (10 Realisationen x 3 Dekaden x 20 Werte pro Dekade). Sie wurden den Tageswerten der Ist-Simulation der Jahre 1971-2000 gegenübergestellt. Dabei sind stellvertretend für alle ca. 70 Standorte in Baden-Württemberg und Bayern, an denen Lufttemperaturen und Niederschläge vorliegen - die 23 Standorte der Klimastationen in Baden-Württemberg untersucht worden.

Die Untersuchung hatte zum Ziel, die Spannweiten der Ist-Zeit mit denen der Zukunft zu vergleichen. In den Abb. 5-1 für die Lufttemperatur und in Abb. 5-2 für die Niederschlagssumme sind jeweils der kleinste und der größte Tageswert und das Mittel für die Halbjahre dargestellt. Die Differenz aus Minimum und Maximum ergibt die Spannweite. Die Auswertung ergab folgendes:

Lufttemperaturen

Die Lufttemperaturen im **Sommer** nehmen im Vergleich zu der Ist-Zeit im Mittel über alle Stationen um 1,4°C zu, sowohl die Mittelwerte als auch die Minima; die Maxima sind an vielen Stationen um ca. 2°C höher.

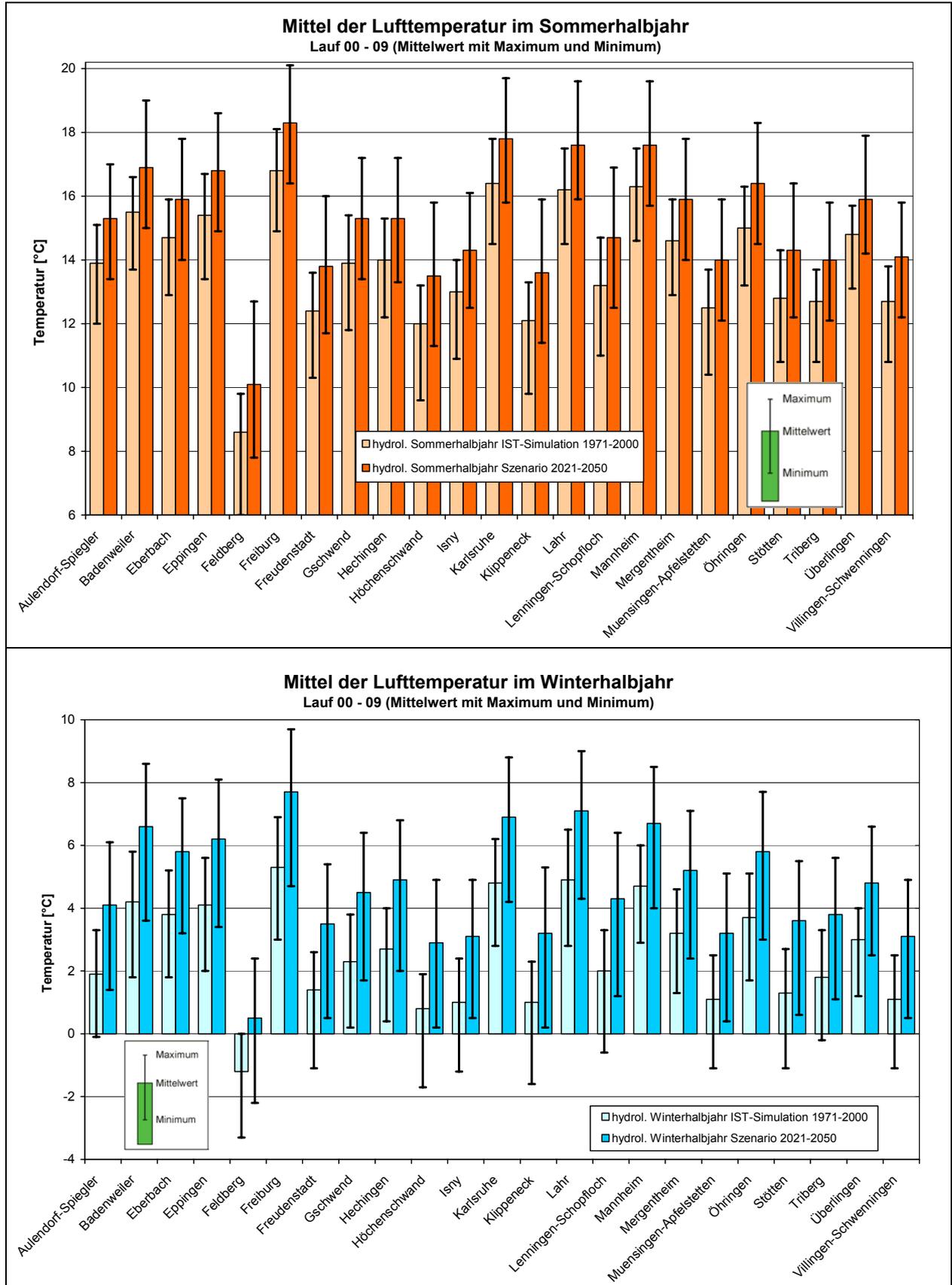


Abb. 5-1: Spannweiten der **Lufttemperatur** in der Ist-Zeit (1971-2000) und in der Zukunft (2021-2050)

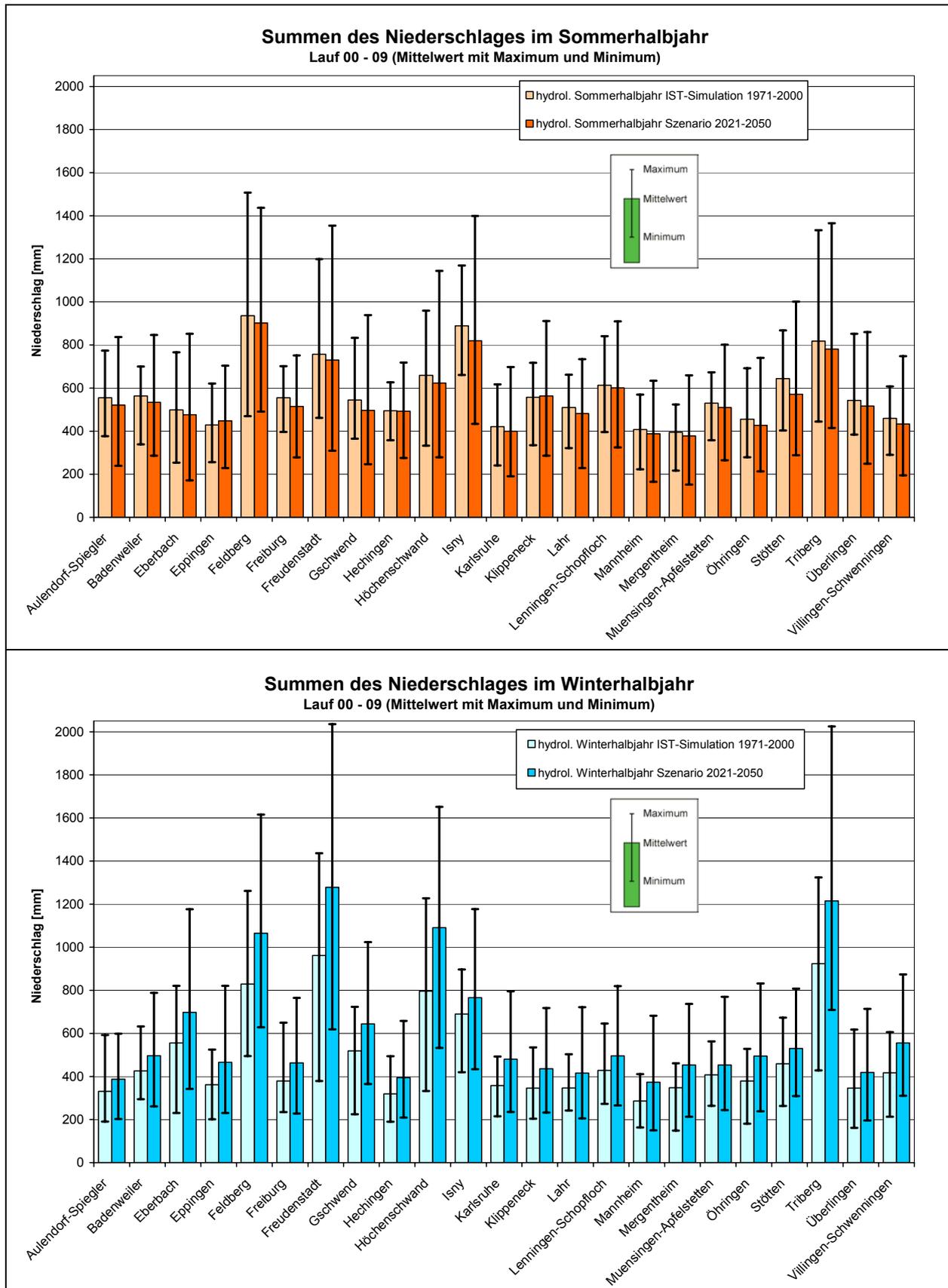


Abb. 5-2: Spannweiten der **Niederschlagssumme** in der Ist-Zeit (1971-2000) und in der Zukunft (2021-2050)

Die Spannweite beträgt im Mittel in der Ist-Zeit 3,2°C, im Szenario 3,9°C.

Die Lufttemperaturen im **Winter** nehmen im Vergleich zu der Ist-Zeit an allen Stationen um 2,1°C zu, sowohl die Mittelwerte als auch die Maxima; die Minima sind an vielen Stationen um ca. 1,5°C höher. Während in der Ist-Zeit noch an 11 Stationen (ca. 50%) die Minima der Tagesmittel noch unter 0°C waren, tritt dies im Szenario-Zeitraum nur noch an der Station Feldberg auf. Die Spannweite beträgt im Mittel in der Ist-Zeit 3,6°C, im Szenario 4,7°C.

Niederschläge

Die Halbjahressummen der Niederschläge im **Sommer** nehmen im Vergleich zu der Ist-Zeit an nahezu allen Niederschlagsstationen geringfügig ab, im Mittel um ca. 5%. Die Spannweite zwischen Minimum und Maximum wird im Zukunfts-Szenario - mit Ausnahme der Station Feldberg - größer. Die Spannweite beträgt im Mittel in der Ist-Zeit ca. 460 mm, im Szenario 650 mm.

Die Halbjahressummen der Niederschläge im **Winter** nehmen im Vergleich zu der Ist-Zeit an allen Niederschlagsstationen zu, im Mittel um ca. 26 %. Die Spannweite zwischen Minimum und Maximum wird ebenfalls größer. Insbesondere das Maximum ist im Szenario an den im Schwarzwald gelegenen Stationen Feldberg, Freudenstadt, Höchenschwand und Triberg deutlich höher als in der Ist-Zeit: in der Ist-Zeit schwanken die Maxima zwischen ca. 1200 und 1400 mm, im Szenario zwischen 1600 und über 2000 mm. Bei den übrigen Stationen bleibt das Minimum nahezu unverändert, das Maximum jedoch steigt, mit Ausnahme der Station Aulendorf, deutlich an. Die Spannweite beträgt im Mittel in der Ist-Zeit ca. 460 mm, im Szenario ca. 670 mm.

Fazit:

Die Spannweiten bei Lufttemperatur und Niederschlag sind im Szenario sowohl im Sommer- als auch im Winter-Halbjahr größer als in der Ist-Zeit. Die Zunahmen sind dabei im Winter jeweils deutlich höher als im Sommer.

5.1.2 Veränderung der Lufttemperatur

Im Folgenden sind für das Zukunftsszenario die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur (Abb. 5-3) und die entsprechenden Differenzen der Lufttemperaturen zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand für Mittelwerte im Jahr für Baden-Württemberg und Bayern (Abb. 5-4) dargestellt.

Die anschließenden Darstellungen enthalten für das Sommer- und Winterhalbjahr die entsprechenden Mittelwerte (Abb. 5-5 und 5-6) und die Differenzen der Lufttemperaturen zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand (Abb. 5-7 und 5-8).

Die Temperaturzunahme im Jahresmittel beträgt dabei 1,7°C (vgl. Kap. 3.3). Dabei ergeben sich für das hydrologische Winterhalbjahr Temperaturzunahmen von ca. 2°C. Dies kann von Bedeutung sein, da die Veränderung der Wintertemperaturen großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für das zukünftig zu erwartende Abflussregime sein könnte.

Die Abbildungen 5-9 und 5-10 enthalten für das Zukunftsszenario und den Ist-Zustand Angaben zu **Sommertagen und Heißen Tagen**. Sommertage sind Tage mit Maximaltemperaturen größer gleich 25°C, Heiße Tage sind solche mit Maximaltemperaturen größer gleich 30°C.

Die durchschnittliche Anzahl von Sommertagen ist im Zukunftsszenario gegenüber dem Ist-Szenario an allen Klimastationen höher (im Mittel um ca. 17 Tage/Jahr). Die maximale Andauer von Perioden mit Sommertagen nimmt für einzelne Klimastationen überwiegend zu, an wenigen Klimastation treten auch Abnahmen auf. Im Mittel erhöht sich die Anzahl der Sommertage von 16,4 auf 20,7 Tage pro Jahr.

Die durchschnittliche Anzahl Heißer Tage verdoppelt sich im Zukunftsszenario (bis auf absolute Höhenlagen ohne Heiße Tage) im Vergleich zum Ist-Zustand (im Mittel von 5,8 auf 11,2 Heiße Tage pro Jahr). Die maximale Andauer von Perioden mit Heißen Tagen ändert sich bei den meisten Statio-

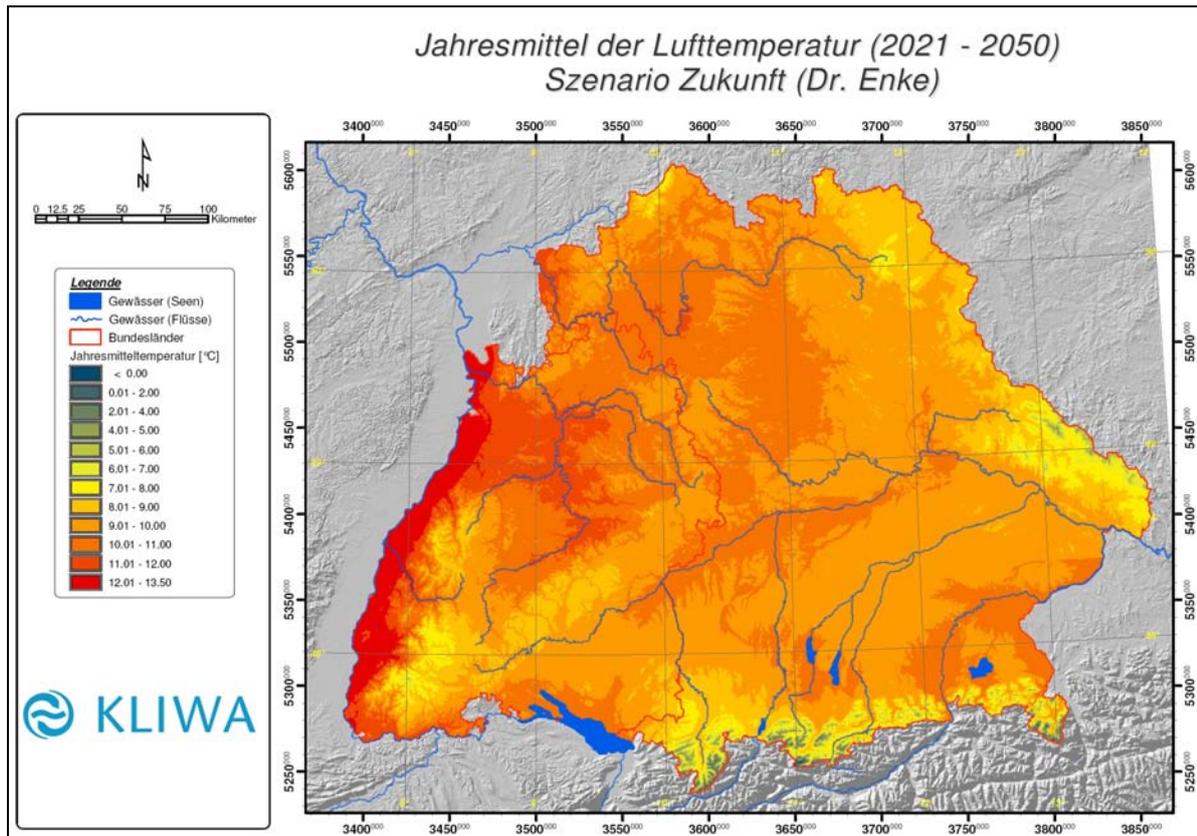


Abb. 5-3: **Jahresmittel** der Lufttemperatur für das Zukunftsszenario

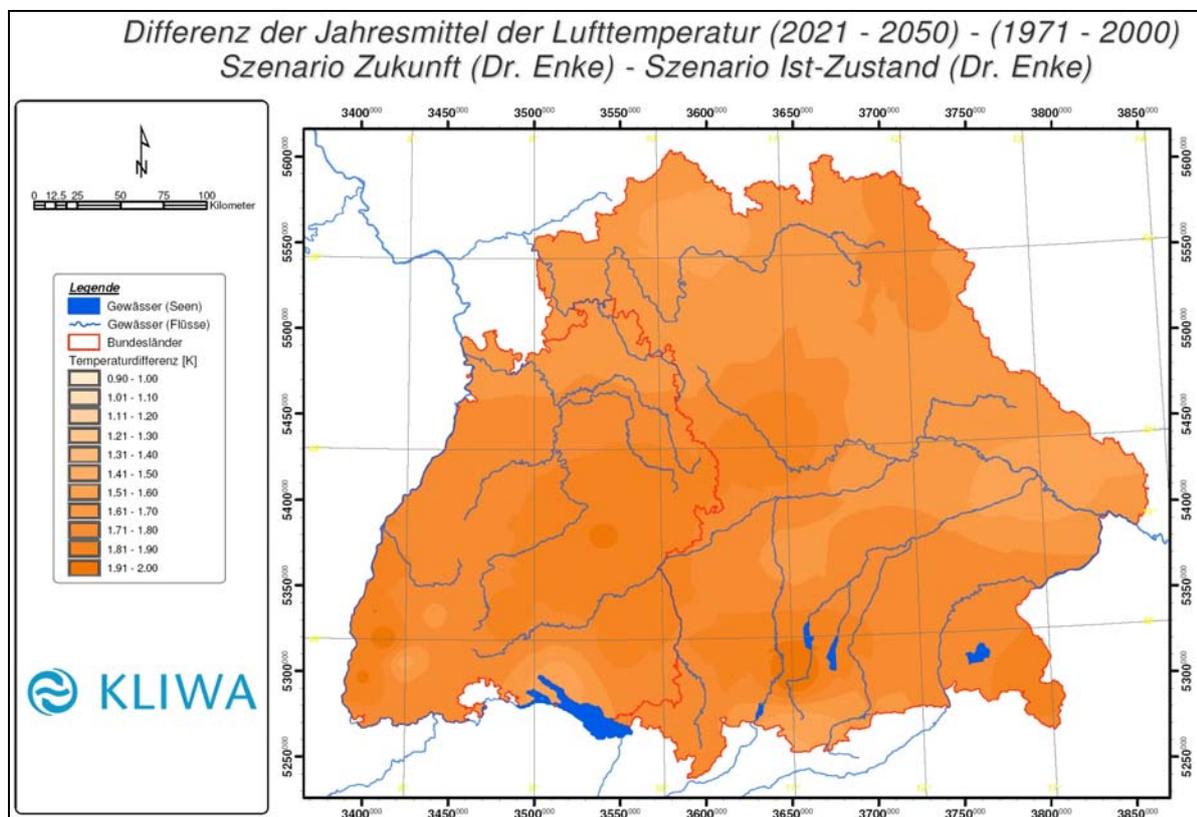
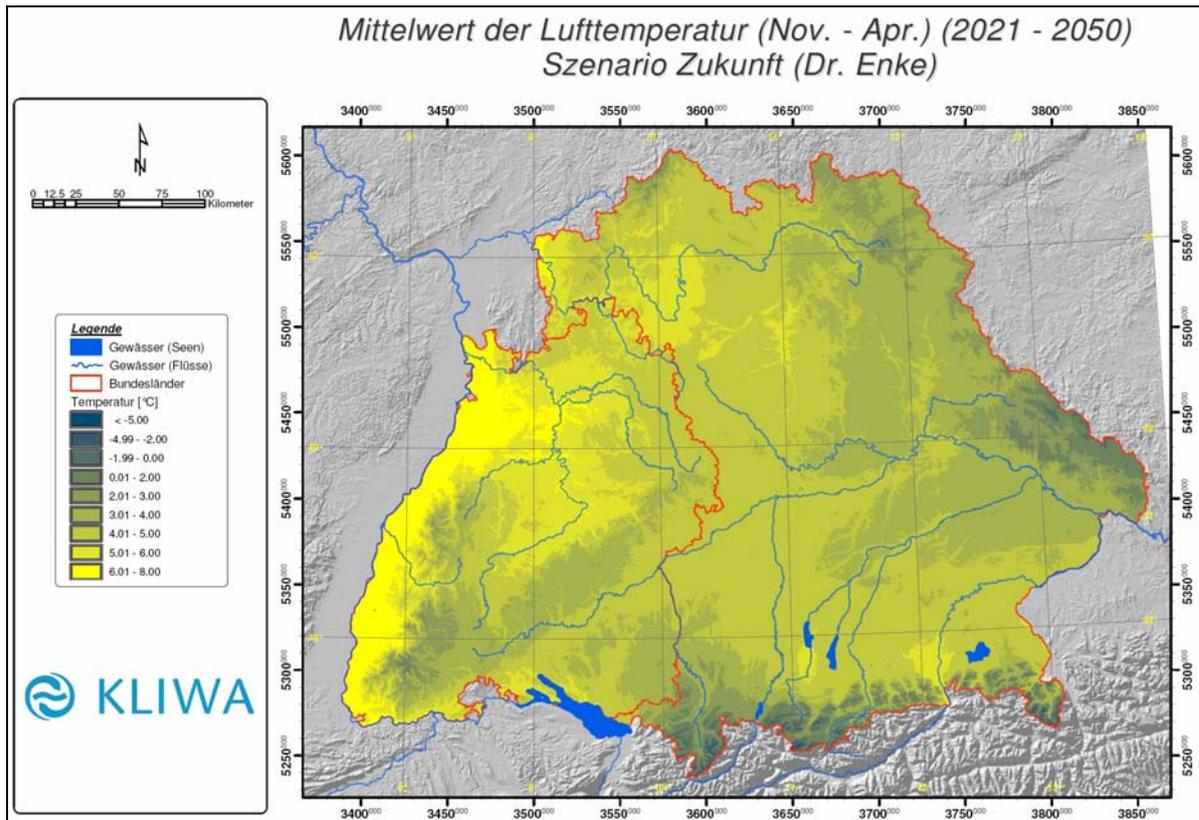
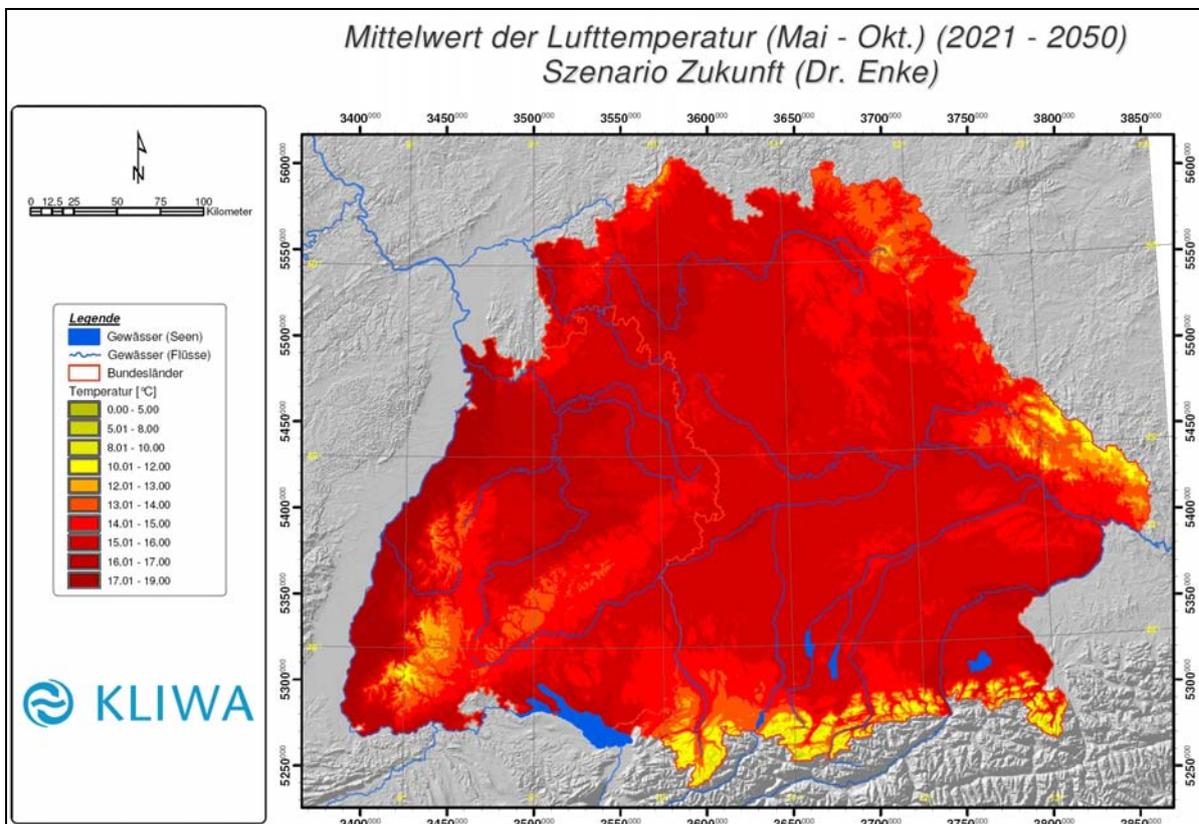


Abb. 5-4: Differenz **Jahresmittel** der Lufttemperatur zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

Abb. 5-5: Mittelwert der Lufttemperatur im **Winter** für das ZukunftsszenarioAbb. 5-6: Mittelwert der Lufttemperatur im **Sommer** für das Zukunftsszenario

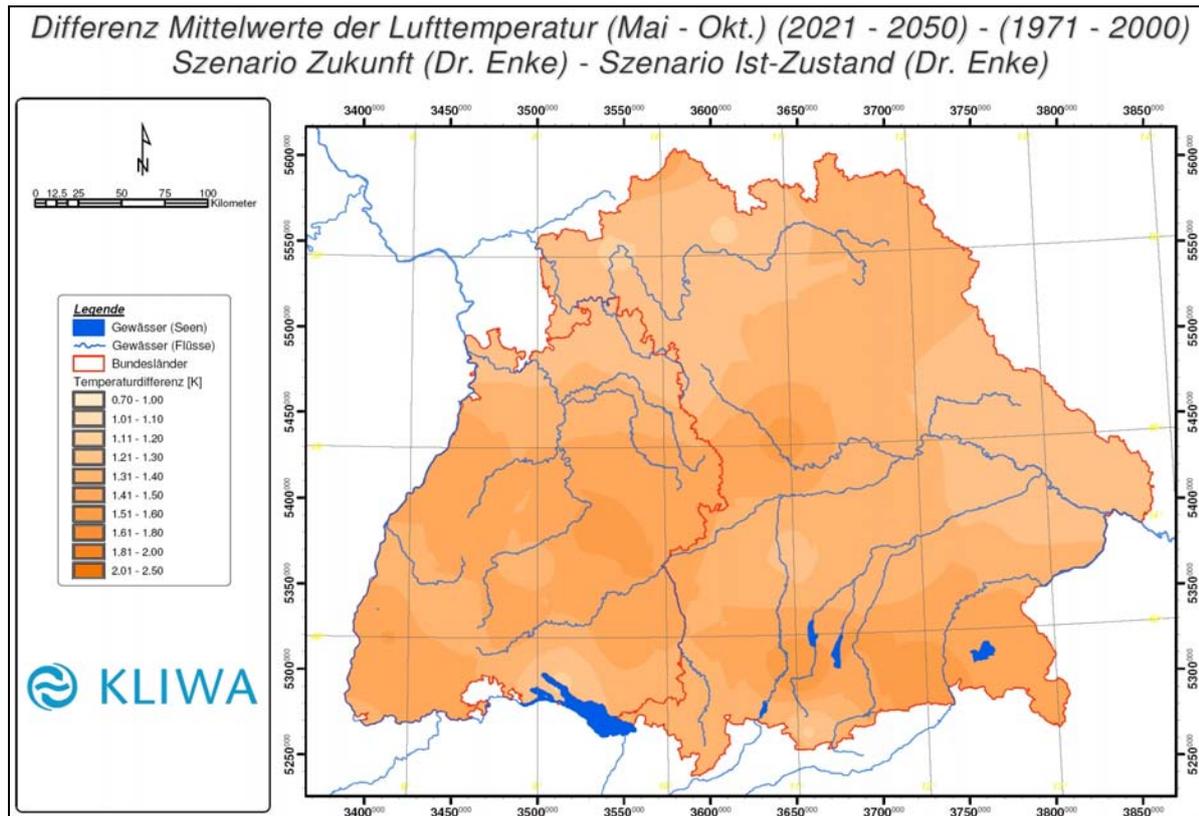


Abb. 5-7: Differenz Mittelwert der Lufttemperatur im **Sommer** zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

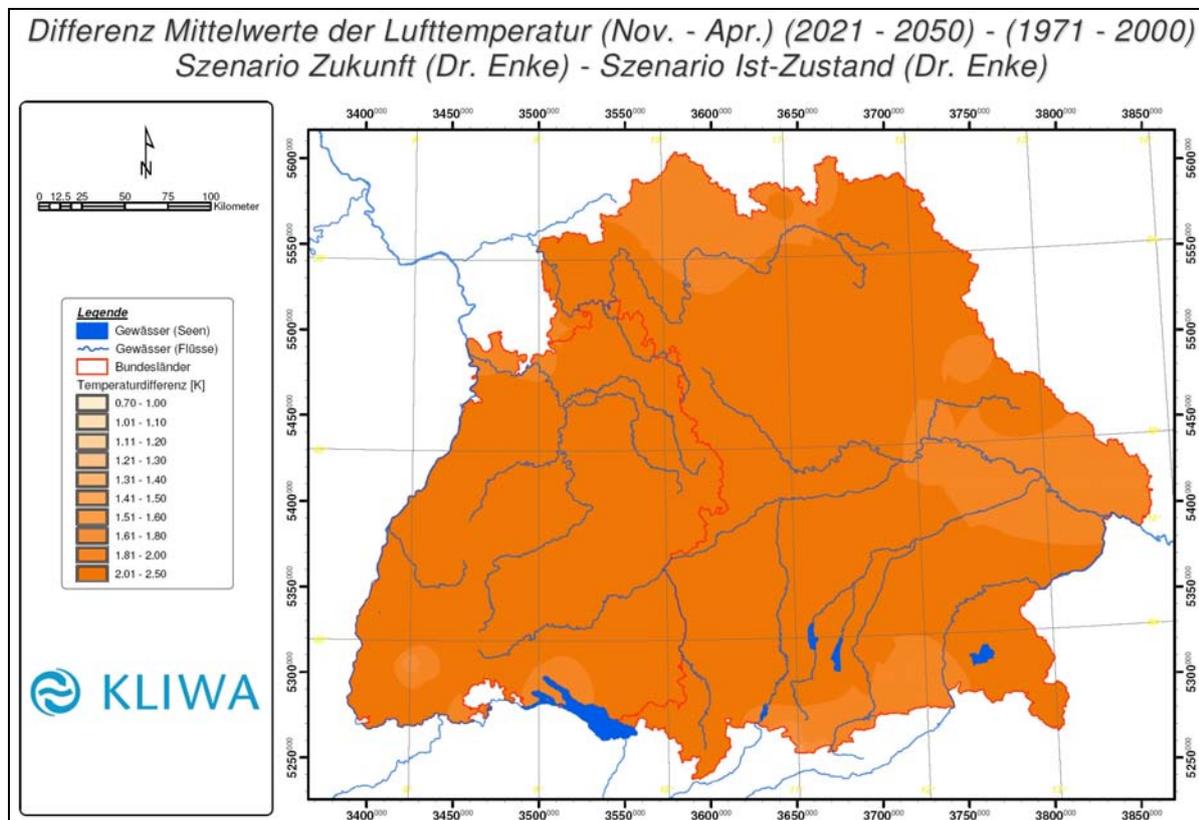


Abb. 5-8: Differenz Mittelwert der Lufttemperatur im **Winter** zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

Sommerhalbjahr ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$)

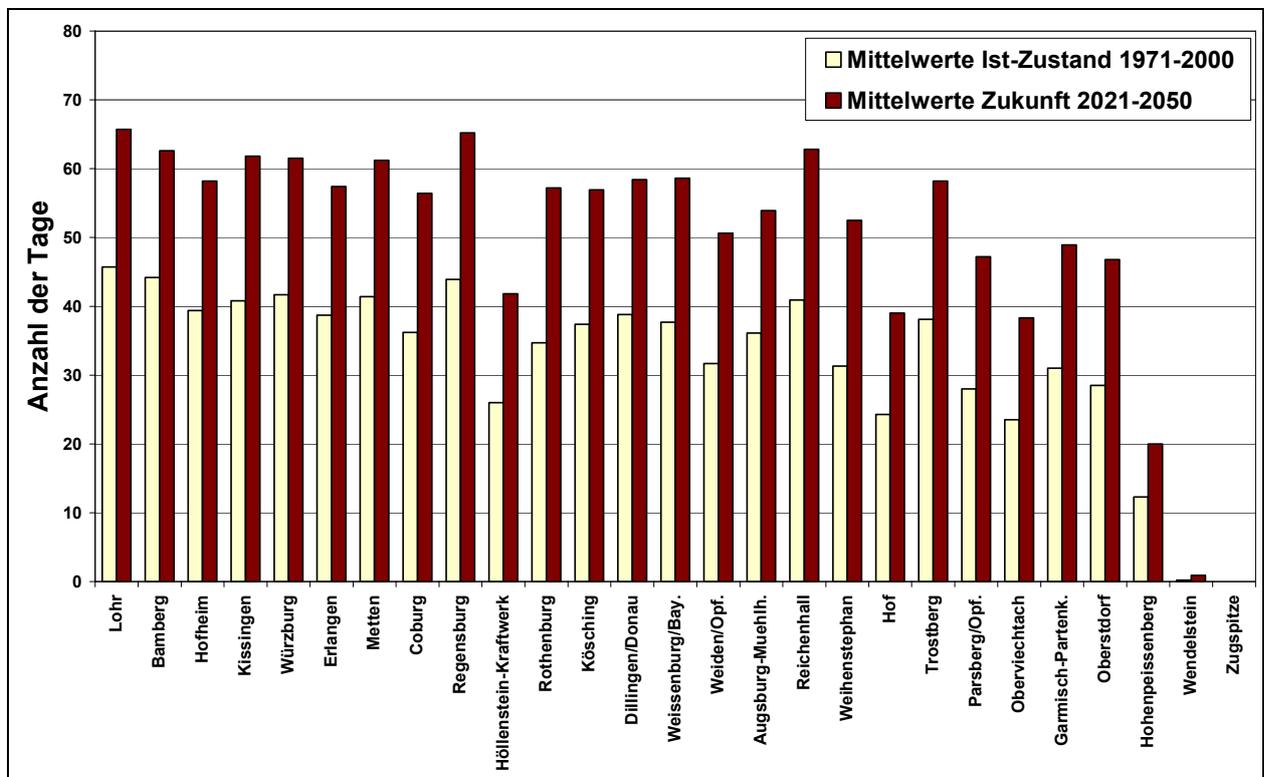
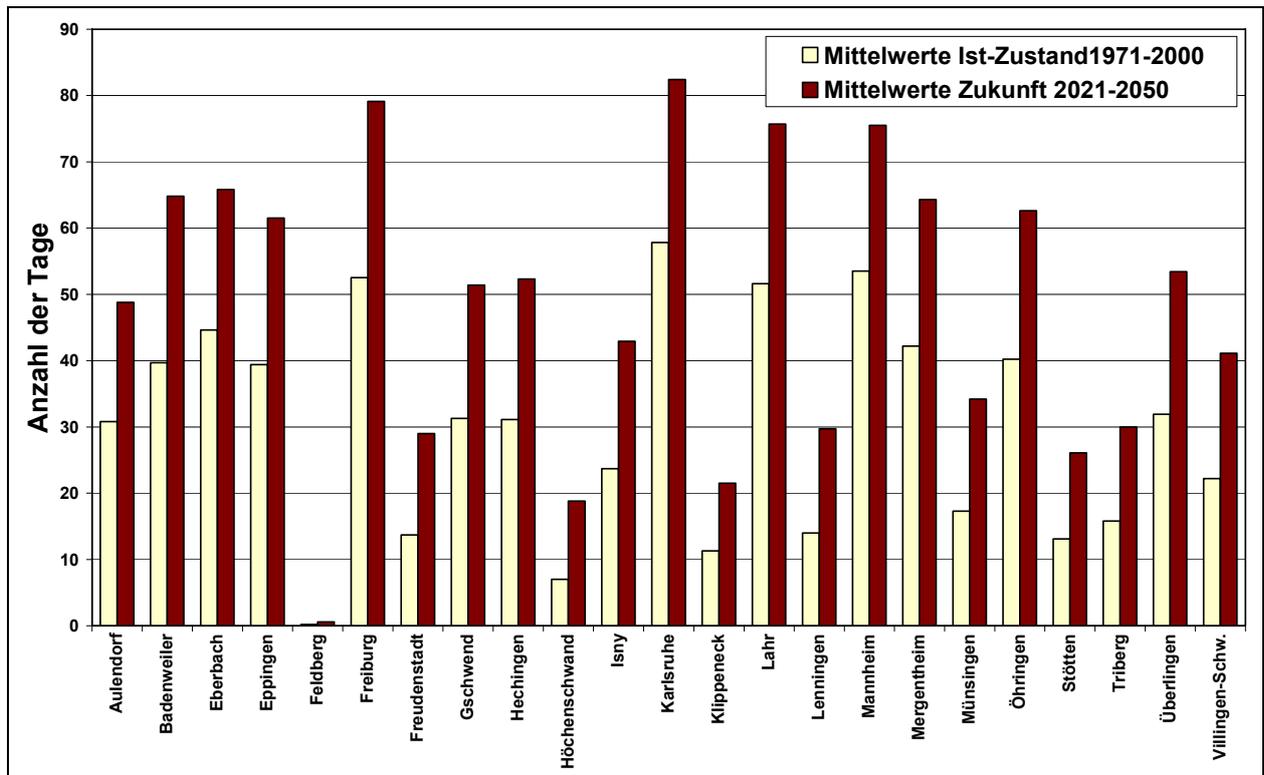


Abb. 5-9: Anzahl der bisherigen und künftigen Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Baden-Württemberg (oben) und Bayern (unten)



Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$)

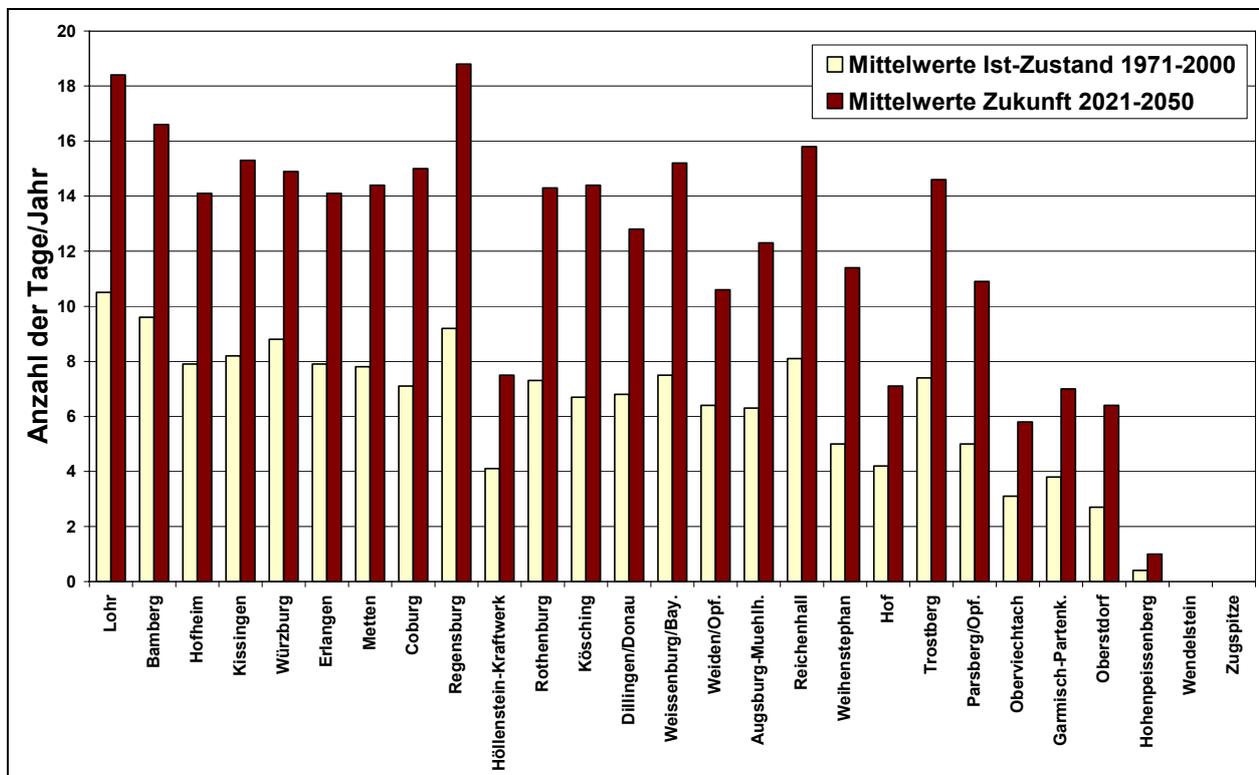
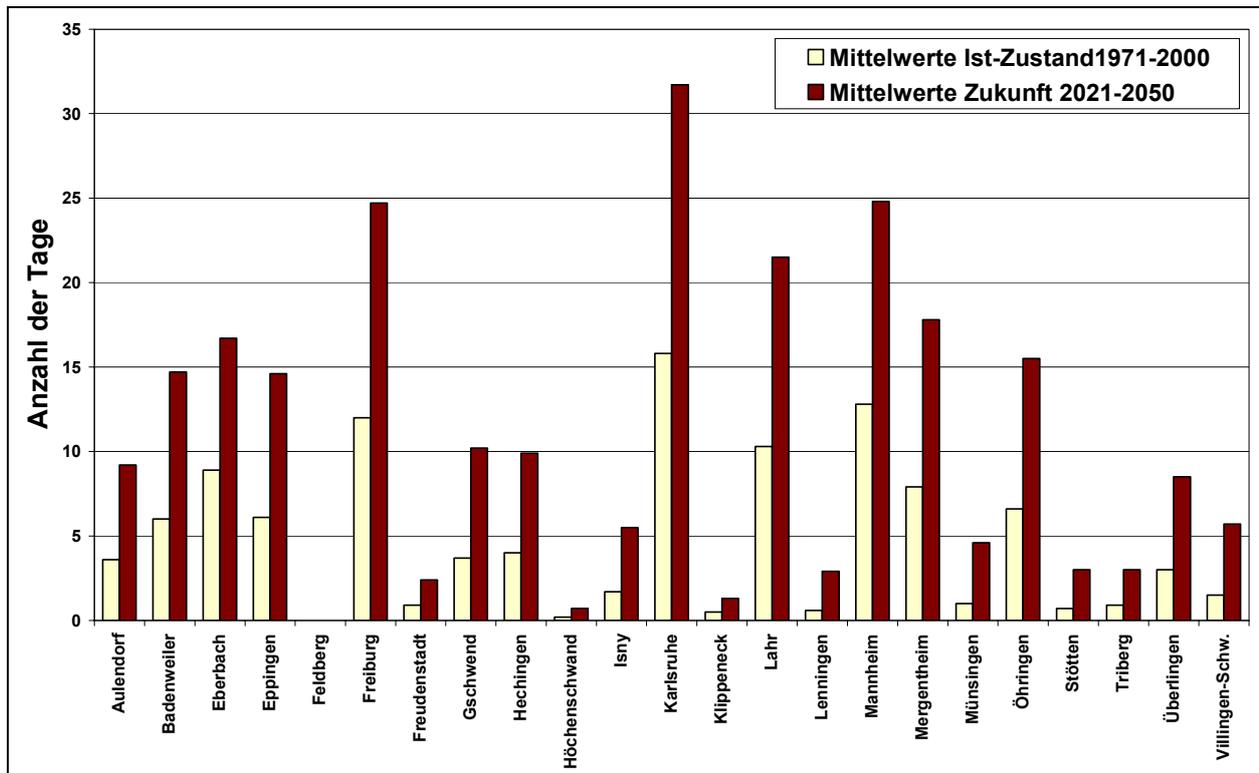


Abb. 5-10: Anzahl der bisherigen und künftigen heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Baden-Württemberg (oben) und Bayern (unten)

nen nicht bzw. nimmt einen Tag zu.

Am Beispiel der Station Karlsruhe kann man erkennen, dass bei einer Zunahme der mittleren maximalen Lufttemperatur um nur 2,3°C ungefähr eine Verdoppelung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Temperaturen von mehr als 30°C zu erwarten ist (Abb. 5-11).

Die Abbildungen 5-12 und 5-13 enthalten für das Zukunftsszenario und den Ist-Zustand Informationen zu **Eis- und Frosttagen**. Eistage sind Tage mit Maximaltemperaturen kleiner als 0°C, Frosttage sind Tage mit Minimaltemperaturen kleiner als 0°C.

Die durchschnittliche Anzahl von Frosttagen ist im Zukunftsszenario gegenüber dem Ist-

Zustand an allen Klimastationen um ca. 20 bis 40 Tage/Jahr niedriger (im Mittel Abnahme von 109,6 auf 79,1 Frosttage pro Jahr). Die maximale Andauer von Perioden mit Frosttagen an den meisten Klimastationen ist kürzer (im Mittel Abnahme der maximalen Andauer von 68,8 auf 45,1 Frosttage pro Jahr).

Die durchschnittliche Anzahl von Eistagen ist beim Zukunftsszenario an allen Stationen deutlich geringer als beim Ist-Zustand, im Mittel halbiert sich die Anzahl der Eistage (von 35,6 auf 17 Eistage pro Jahr). Die maximale Andauer von Perioden mit Eistagen ist bei der Mehrzahl der Stationen kürzer (im Mittel Abnahme der maximalen Andauer von 27,5 auf 24,5 Eistage pro Jahr).

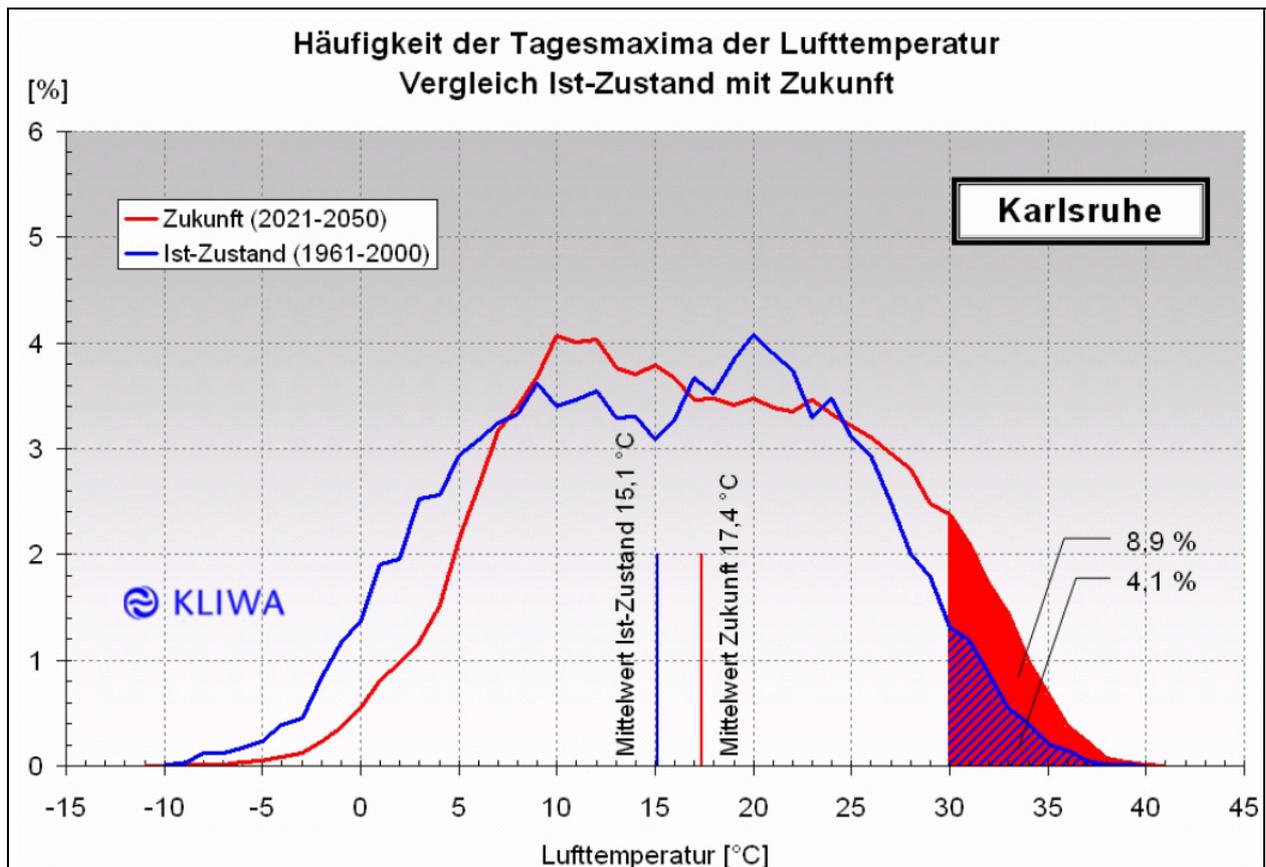


Abb. 5-11: Häufigkeit der Tagesmaxima der Lufttemperatur an der Klimastation Karlsruhe – Vergleich zwischen Ist-Zustand und Zukunftsszenario



Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$)

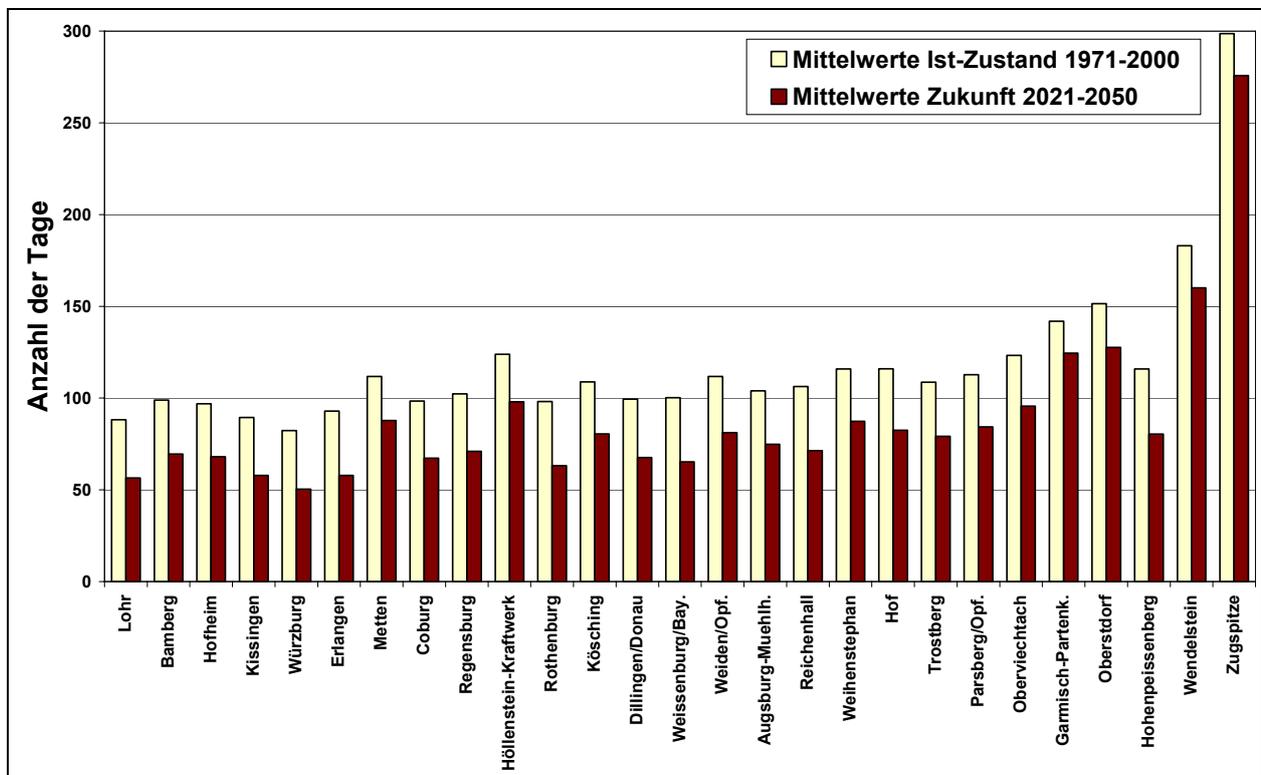
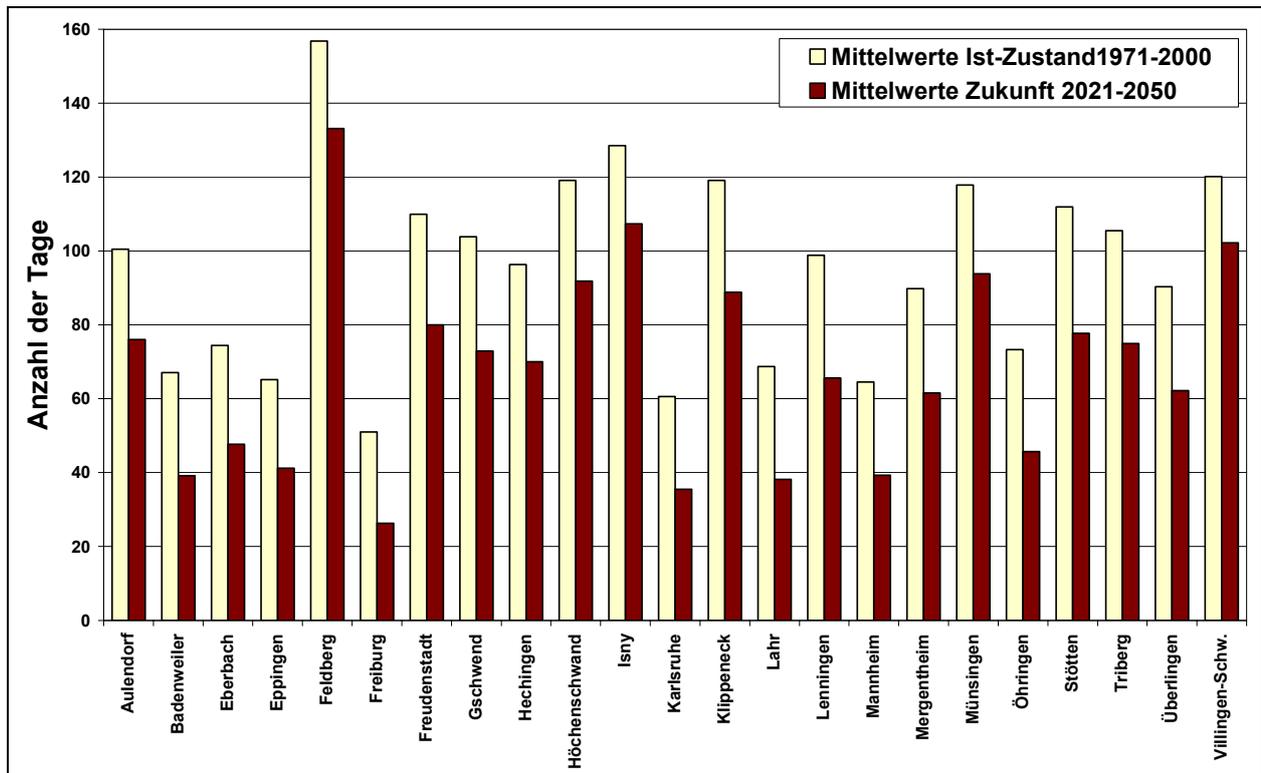


Abb. 5-12: Anzahl der bisherigen und künftigen Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Baden-Württemberg (oben) und Bayern (unten)

Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$)

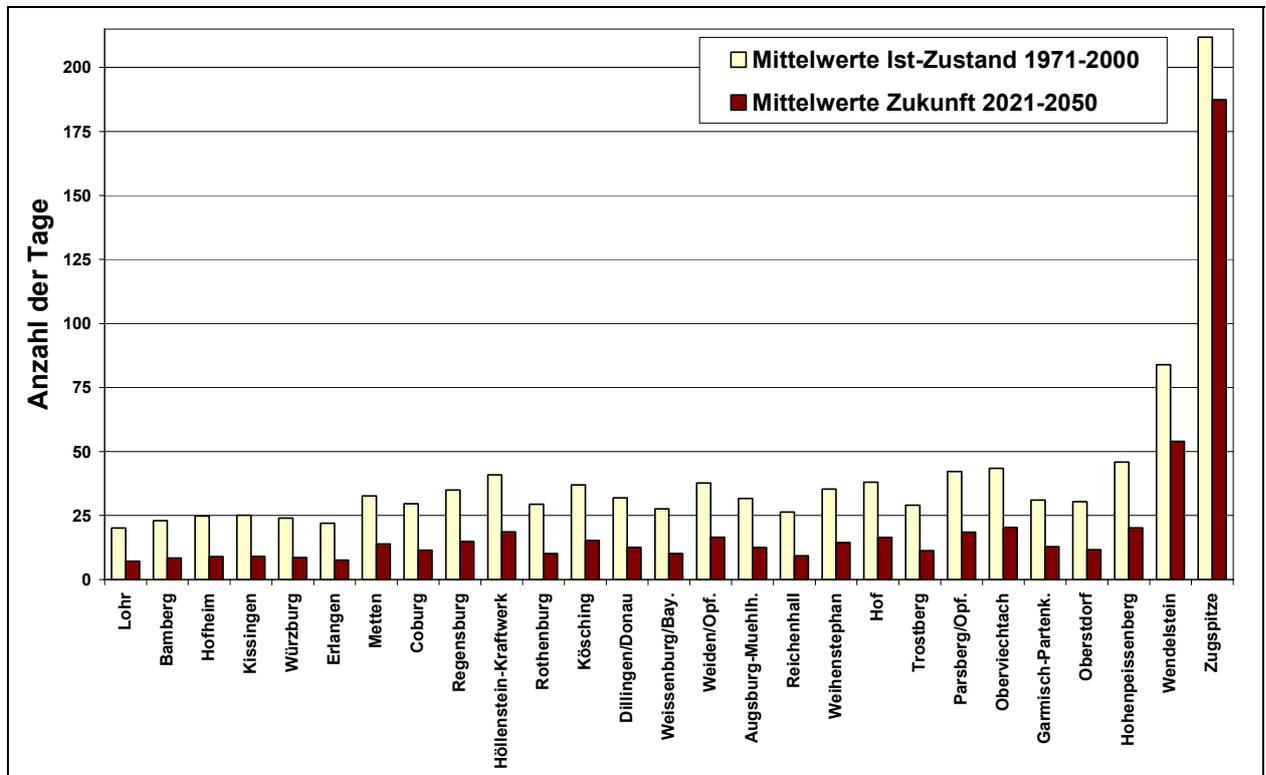
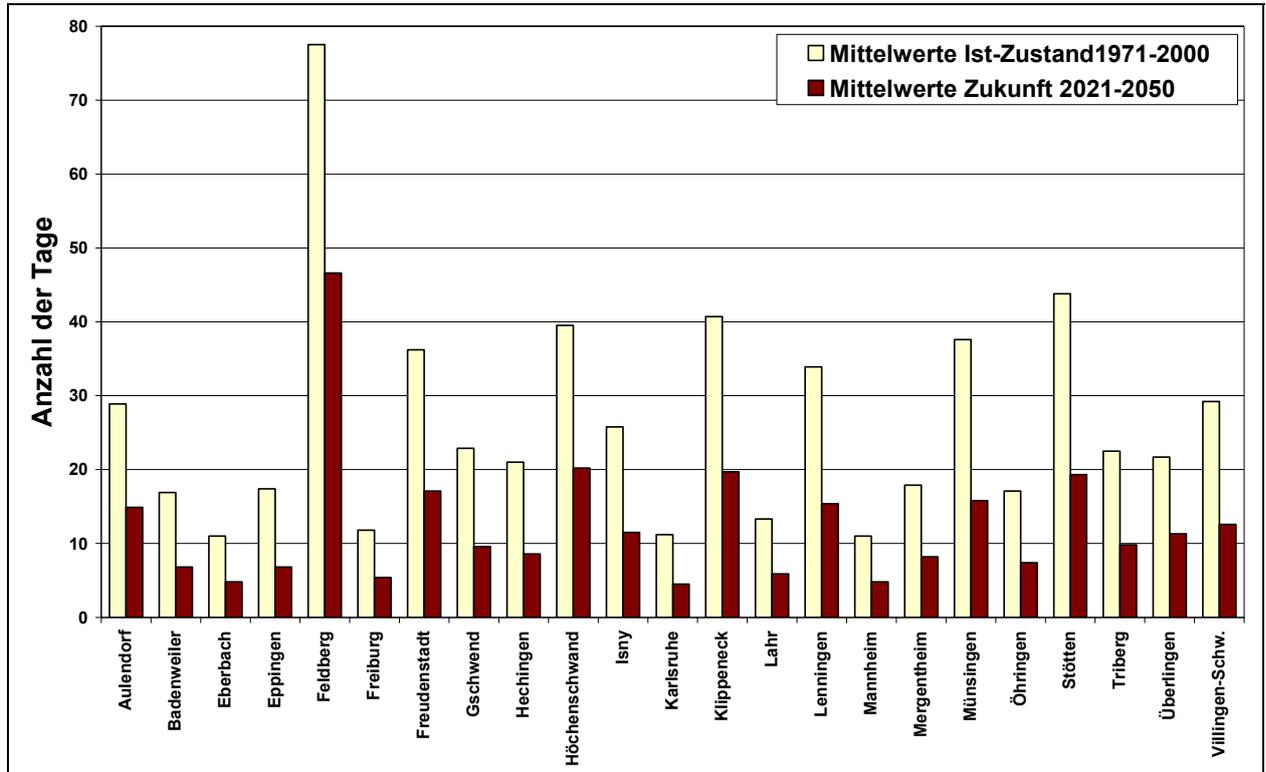


Abb. 5-13: Anzahl der bisherigen und künftigen Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Baden-Württemberg (oben) und Bayern (unten)



5.1.3 Veränderung der Niederschläge

Im Folgenden sind für das Zukunftsszenario die Mittelwerte der Niederschlagssummen des Sommer- und Winterhalbjahres die (Abb. 5-15 und 5-16) und die relativen Differenzen zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand (Abb. 5-17 und 5-18) wiedergegeben. Trotz der räumlichen Unschärfe sind regionale Unterschiede beim Niederschlag erkennbar und daher Aussagen dazu zulässig.

Im hydrologischen Sommerhalbjahr sind nur geringere Unterschiede in der räumlichen Verteilung festzustellen, es treten im Sommer fast durchweg sogar Abnahmen des Niederschlags auf.

Dagegen wird für die Zunahmen der jährlichen Niederschlagssummen ein Bereich relativ hoher Änderungen auf einem südwestlich-nordöstlichen Halbboogen (Schwarzwald-Spessart-Frankenwald) deutlich. Im

hydrologischen Winterhalbjahr zeigen sich größere Unterschiede der prozentualen Änderungen im gleichen Bereich und darüber hinaus nach Bayern in etwa entlang der Donau.

Auch die Anzahl der Tage mit hohen Niederschlägen (größer oder gleich 25 mm) wird künftig im Winter steigen. Beispielsweise zeigen die Ergebnisse an der Niederschlagsstation Freudenstadt (Abb. 5-14), dass in den Monaten Dezember bis Februar die Anzahl der Tage mit $N \geq 25$ mm im Mittel um knapp das Doppelte zunimmt, während sie in den Sommermonaten Juli bis August abnimmt.

Diese Tendenz zur innerjährlichen Verschiebung der Niederschläge zwischen Sommer- und Winterhalbjahr wurde für die zurückliegenden Jahrzehnte bereits in einer statistischen Untersuchung zum Langzeitverhalten der Gebietsniederschläge festgestellt.

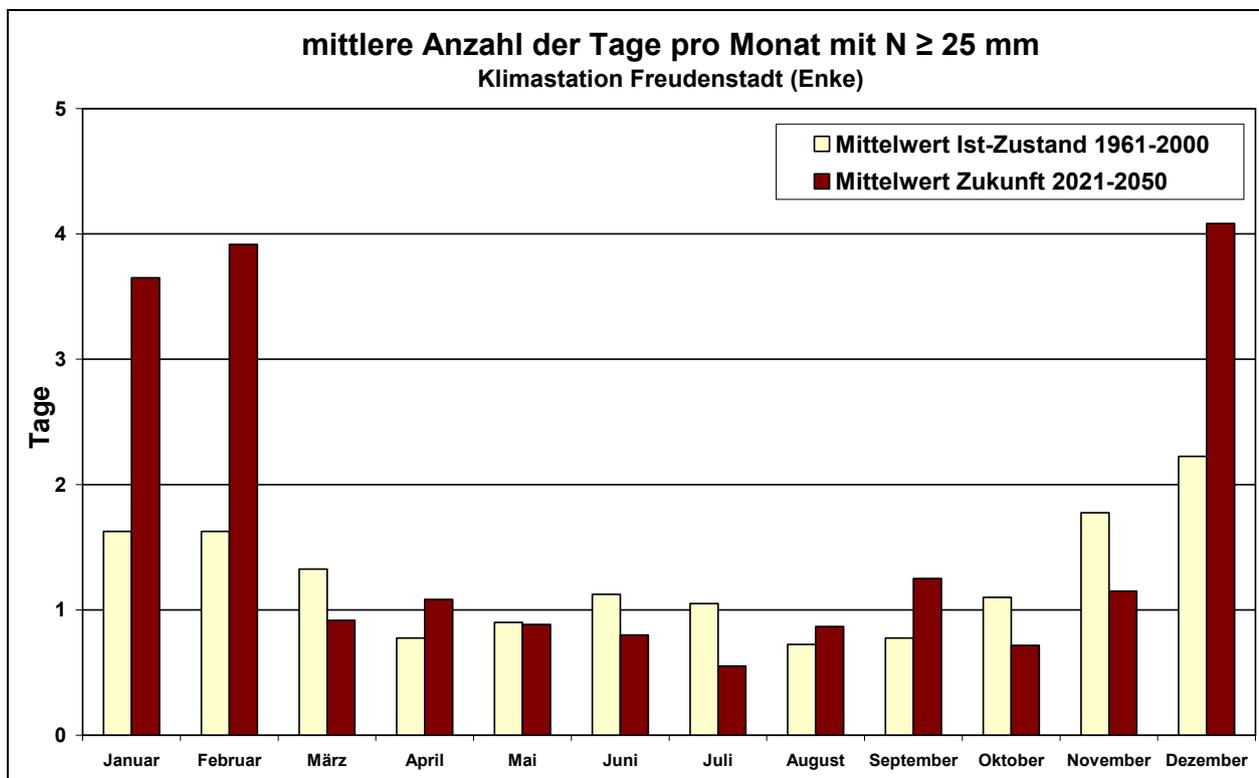
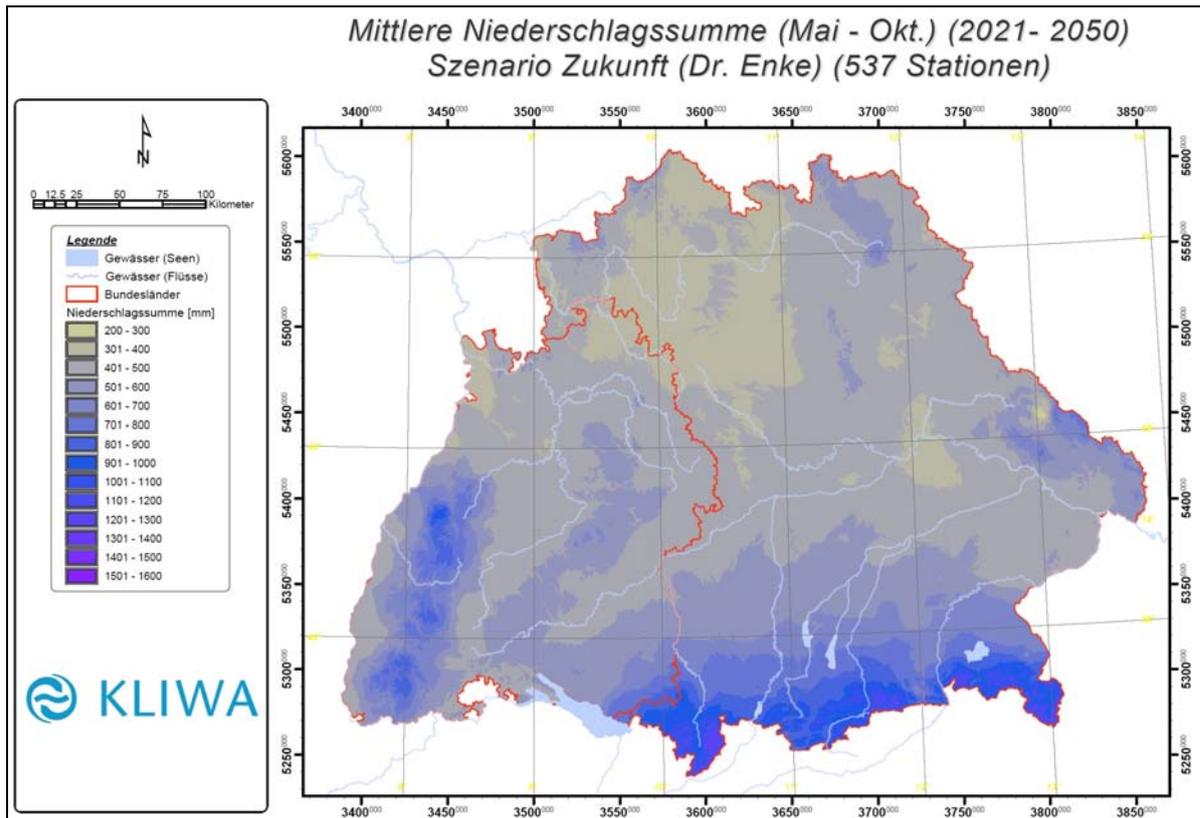
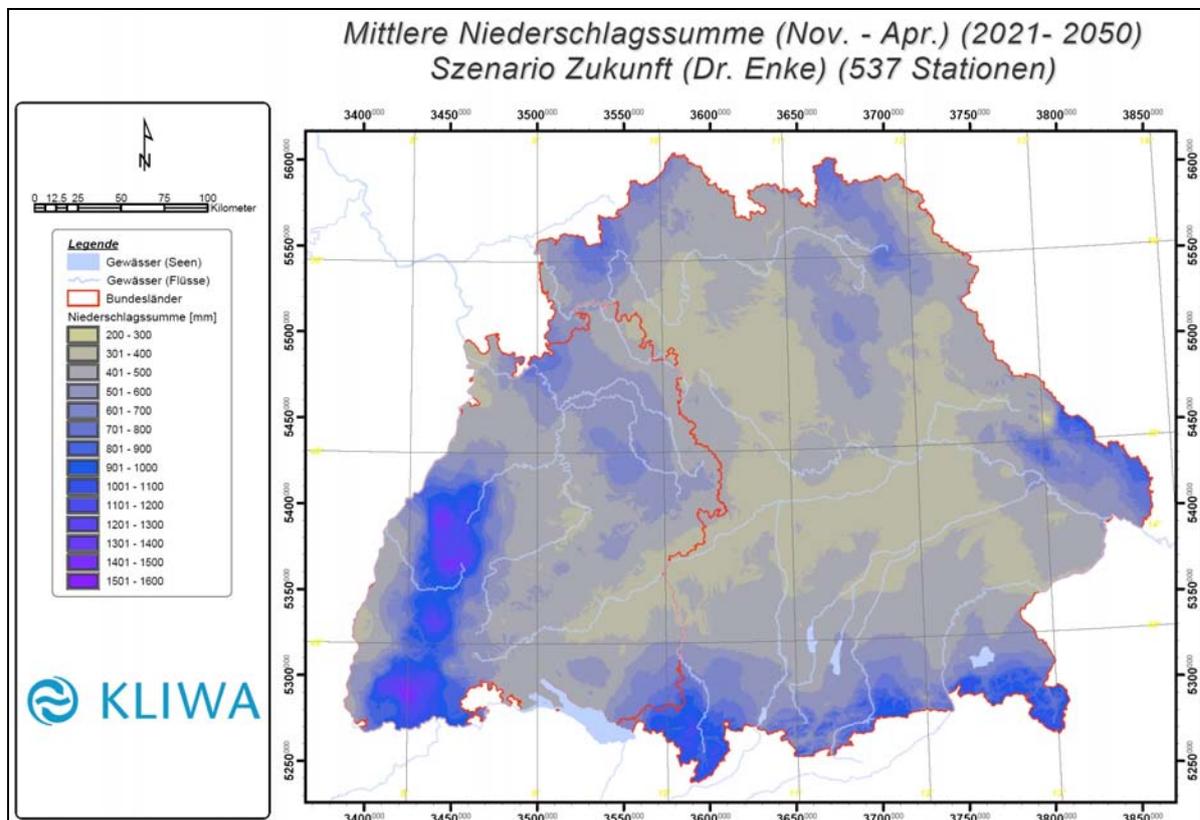


Abb. 5-14: Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 25 mm, Station Freudenstadt

Abb. 5-15: Mittelwert der Niederschläge im **Sommer** für das ZukunftsszenarioAbb. 5-16: Mittelwert der Niederschläge im **Winter** für das Zukunftsszenario

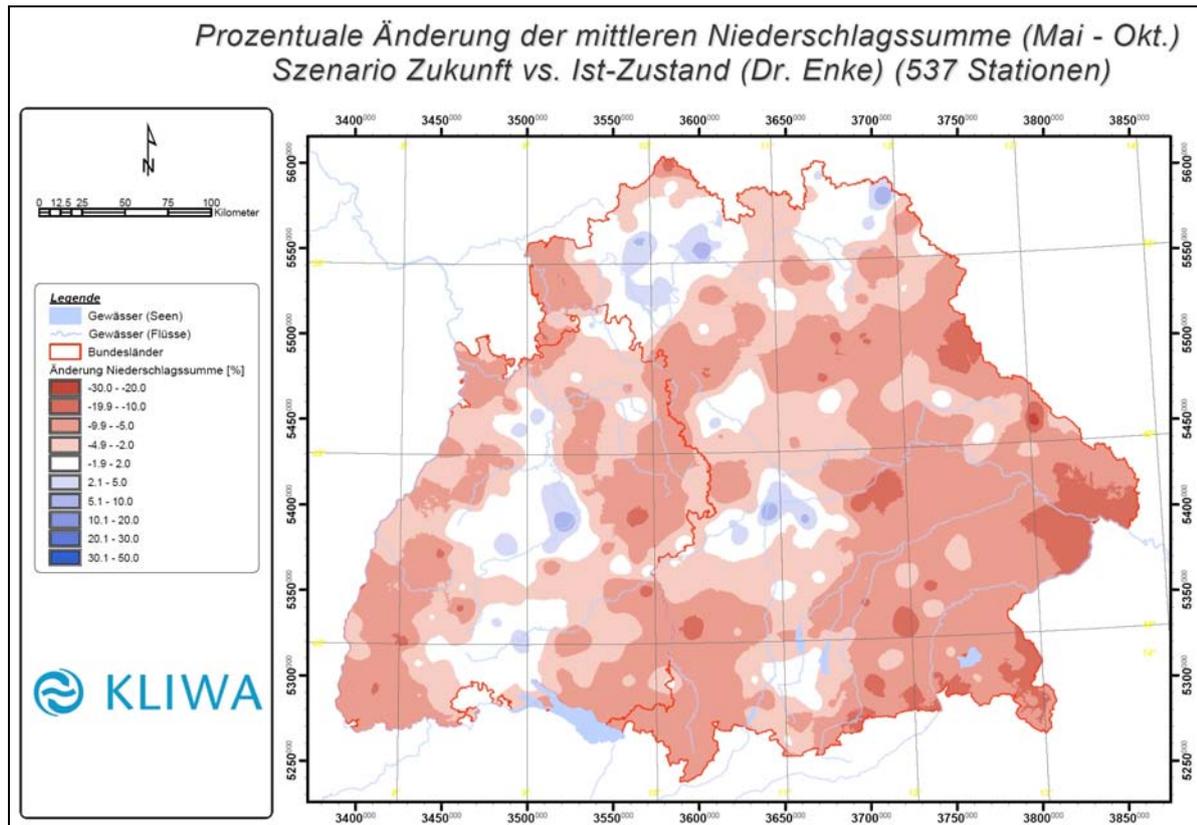


Abb. 5-17: Relative Änderung der Mittelwerte der Niederschläge im **Sommer** zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

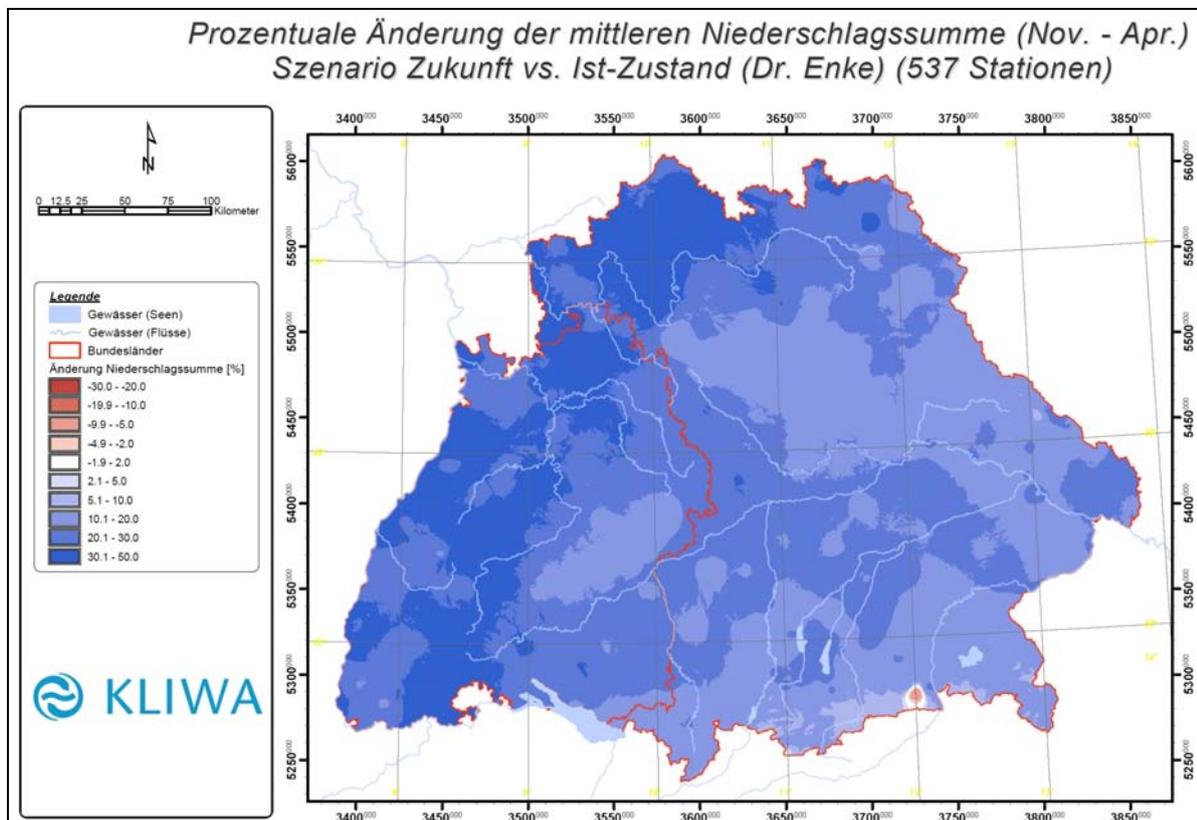


Abb. 5-18: Relative Änderung der Mittelwerte der Niederschläge im **Winter** zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

5.1.4 Veränderung von extremen Trocken- und Nassperioden

Änderungen im Verhalten extremer Niederschläge können sich auch auf die Andauer von Niederschlagsereignissen auswirken. Es wurde daher an den 491 Niederschlagsstationen der Länder Baden-Württemberg und Bayern neben der Dauer von extremen Trocken- und Nassperioden auch die Anzahl von Trockentagen und Tagen mit Niederschlag ≥ 25 mm für die hydrologischen Halbjahre ausgewertet.

5.1.4.1. Trockentage

Hydrologische Trockentage sind Tage mit einer Niederschlagssumme ≤ 1 mm. Die mittlere Anzahl an den Niederschlagsstationen im Bereich der Länder BW und

BY beträgt derzeit im **Sommer** 111 Tage und künftig 117 Tage. Im Mittel aus allen Stationen nimmt im Szenario die Anzahl der Trockentage um ca. 5% zu. Die Veränderungen an den einzelnen Stationen sind aus Abb. 5-19 ersichtlich. Ein regional geprägtes Muster der Zunahme ist nicht zu erkennen; bei einem großen Teil der Stationen beträgt die mittlere Zunahme ca. 4, bei dem anderen größeren Teil ca. 7 Tage. Die Spannweite der Trockentage im Sommer wird von 60 Tagen in der Ist-Zeit (1971-2000) auf künftig (2021-2050) 58 Tage sinken.

Die mittlere Anzahl der Trockentage beträgt derzeit im **Winter** 114 Tage, künftig 107 Tage. Im Durchschnitt nimmt die mittlere Anzahl der Trockentage (Mittel über alle Stationen) um ca. 6% ab. Auch im Winter ist kein regional geprägtes Muster erkennbar;

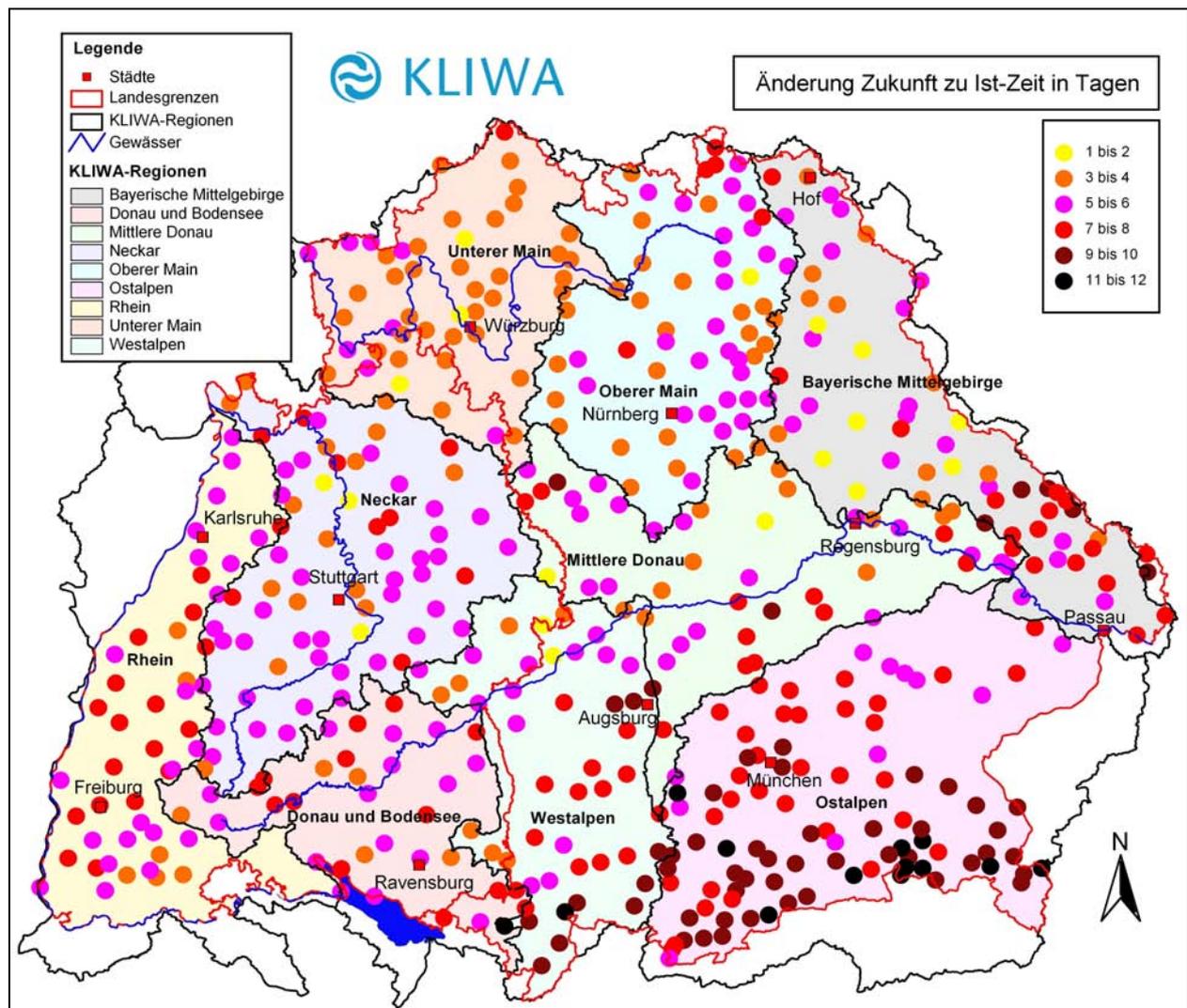


Abb. 5-19: Veränderung der mittleren Anzahl von Trockentagen im Sommerhalbjahr



bei vielen Stationen beträgt die mittlere Abnahme ca. 7, bei wenigen Stationen ca. 11 Tage. Die Spannweite ändert sich nicht; sie beträgt im Winter 69 Tage.

5.1.4.2. Extreme Trockenperioden

Extreme Trockenperioden sind Perioden, an denen die Niederschlagssumme an 11 aufeinander folgenden Tagen ≤ 1 mm ist. Das mittlere Verhalten an allen Stationen im Bereich von BW und BY ist in Abb. 5-20 dargestellt. Danach nehmen im **Sommer** die Dauern im Szenario geringfügig zu, wie an den Kurvenverlauf über den ganzen Bereich zu erkennen ist. Im **Winter** dagegen nehmen die Dauern geringfügig ab (z.B. bei 30% der Werte um 1 Tag von ca. 16.5 auf 15.5 Tage).

5.1.4.3. Tage mit hohen Niederschlägen

Hohe flächenhafte Tagesniederschläge mit $N \geq 25$ mm können Hochwasser zur Folge haben. Daher wurde die Änderung der Häufigkeit ihres Auftretens in Baden-Württemberg und Bayern untersucht. Da-

nach gibt es an den meisten Stationen in Baden-Württemberg und in Bayern im **Sommer** kaum Veränderungen. An rd. 15% der Stationen (Einzugsgebiet des Bodensees und im Schwarzwald sowie in Bayern im voralpinen und alpinen Bereich sowie im Bayerischen Wald) nimmt die mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 25 mm sogar geringfügig ab.

Im **Winter** gibt es an fast allen Stationen Süddeutschlands Zunahmen (Abb. 5-21), nur vier Stationen in Bayern zeigen einen leichten Rückgang (alpine Gipfelstationen: Zugspitze, Wendelstein sowie zwei Stationen im Bereich der mittleren Donau). Die deutlichsten Zunahmen gibt es im Schwarzwald an höher gelegenen Stationen (z.B. in den Stationen Freudenstadt, Höchenschwand, Bad Rippoldsau), hier steigt die Anzahl um bis zu 6 Tage an (von 8 auf 14 Tage); in Bayern sind im Bayerischen Wald und südöstlich des Chiemsees Gebiete mit mittleren Zunahmen zu sehen, ansonsten sind die Änderungen flächendeckend eher gering (1 bis 2 Tage).

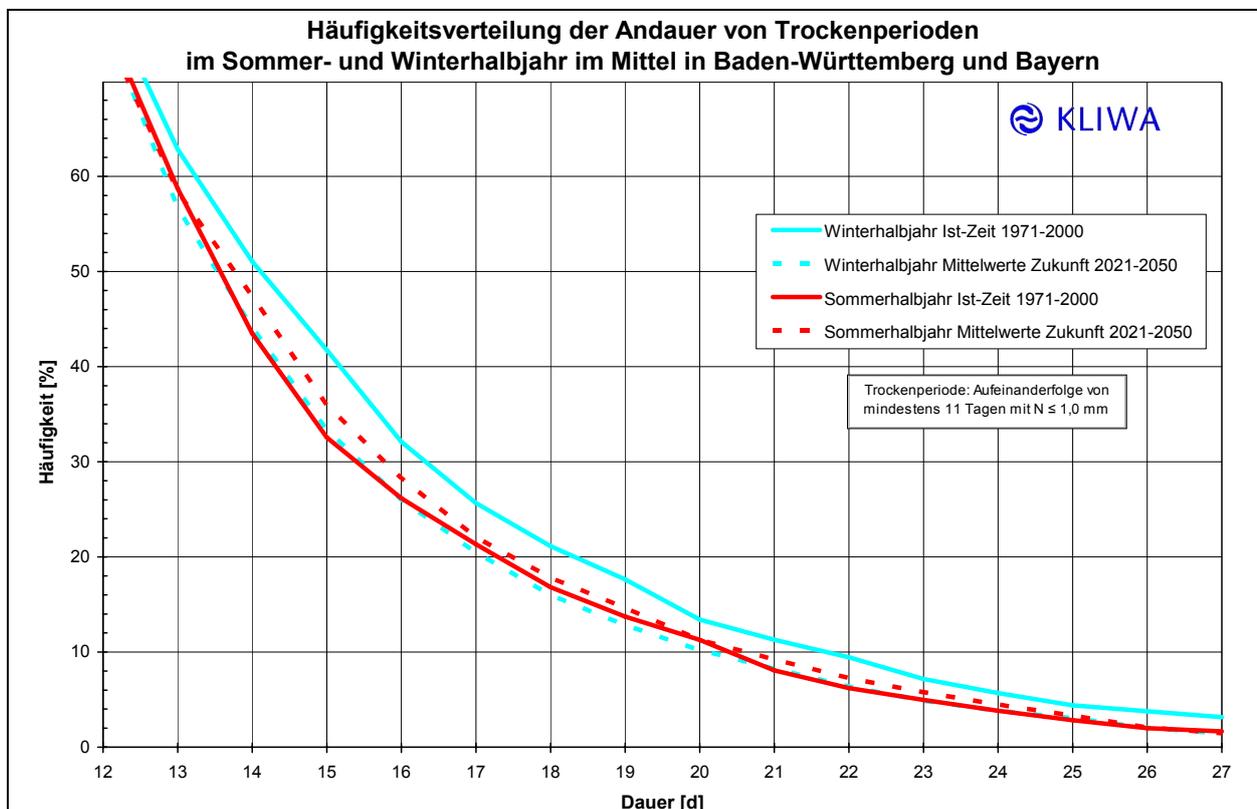


Abb. 5-20: Mittlere Dauer der extremen Trockenperioden im Sommer- und Winterhalbjahr

5.1.4.4. Extreme Nassperioden

Extreme Nassperioden sind Perioden, an denen die Niederschlagssumme an 8 aufeinander folgenden Tagen > 1 mm ist, wobei ein einzelner Trockentag die Nassperiode nicht unterbricht. Das mittlere Verhalten an allen Stationen im Bereich von Baden-Württemberg und Bayern zeigt, dass sich sowohl im **Sommer** als auch im **Winter** keine nennenswerten Änderungen ergeben (Abb. 5-22).

5.1.5 Frostzeiten und Schneeschmelze

Im folgenden sind für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario Informationen über Frostzeiten und Schneeschmelze sowie zum Ende der Schneeschmelze im Frühjahr dargestellt.

In Abb. 5-23 ist der letzte Tag mit Spätfrost

(im Frühling) und der erste Tag mit Frühfrost (im Herbst) sowie die Zeitdauer zwischen Spätfrost und Frühfrost in Abhängigkeit von der topographischen Höhe der Messstelle dargestellt. Spätfroste können je nach Zeitpunkt in der Landwirtschaft große Schäden verursachen. Je nach Stand der Vegetationsentwicklung sind die Pflanzen unterschiedlich empfindlich. Frühfroste (im Herbst) können das Erntegut schädigen. Aus Abb. 5-23 ist zu erkennen, dass im Zukunftsszenario im Mittel der erste Frühfrost im Herbst etwa um 10 Tage später und der letzte Spätfrost im Frühjahr um etwa 10 Tage früher eintritt.

Die Darstellung des letzten Tages der Schneeschmelze im Frühjahr (Abb. 5-24) beruht auf einer Abschätzung, bei der die Schneeakkumulation und -schmelze über ein einfaches Temperatur-Index-Verfahren

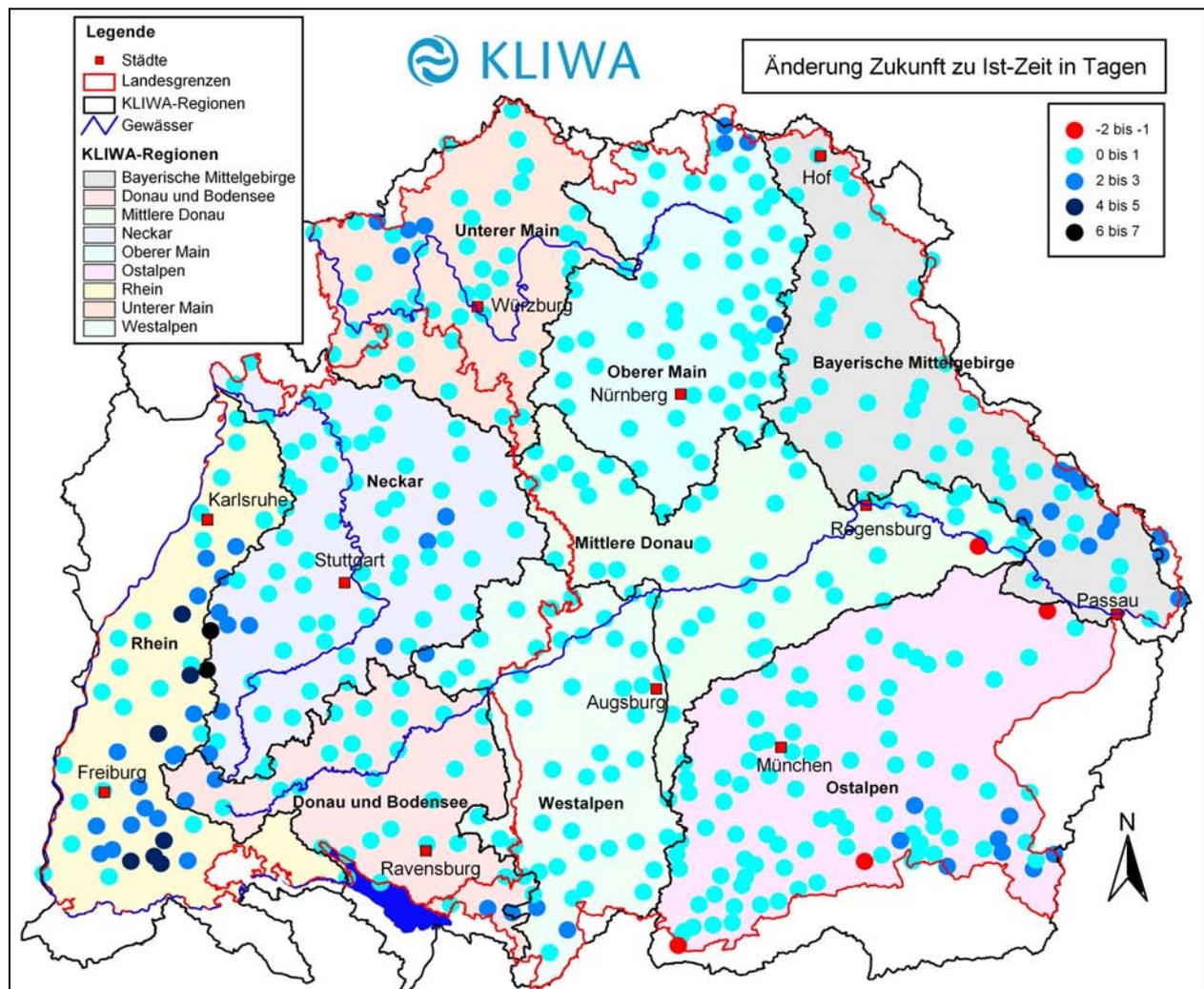


Abb. 5-21: Veränderung der mittleren Anzahl von Tagen mit $N \geq 25$ mm im Winterhalbjahr

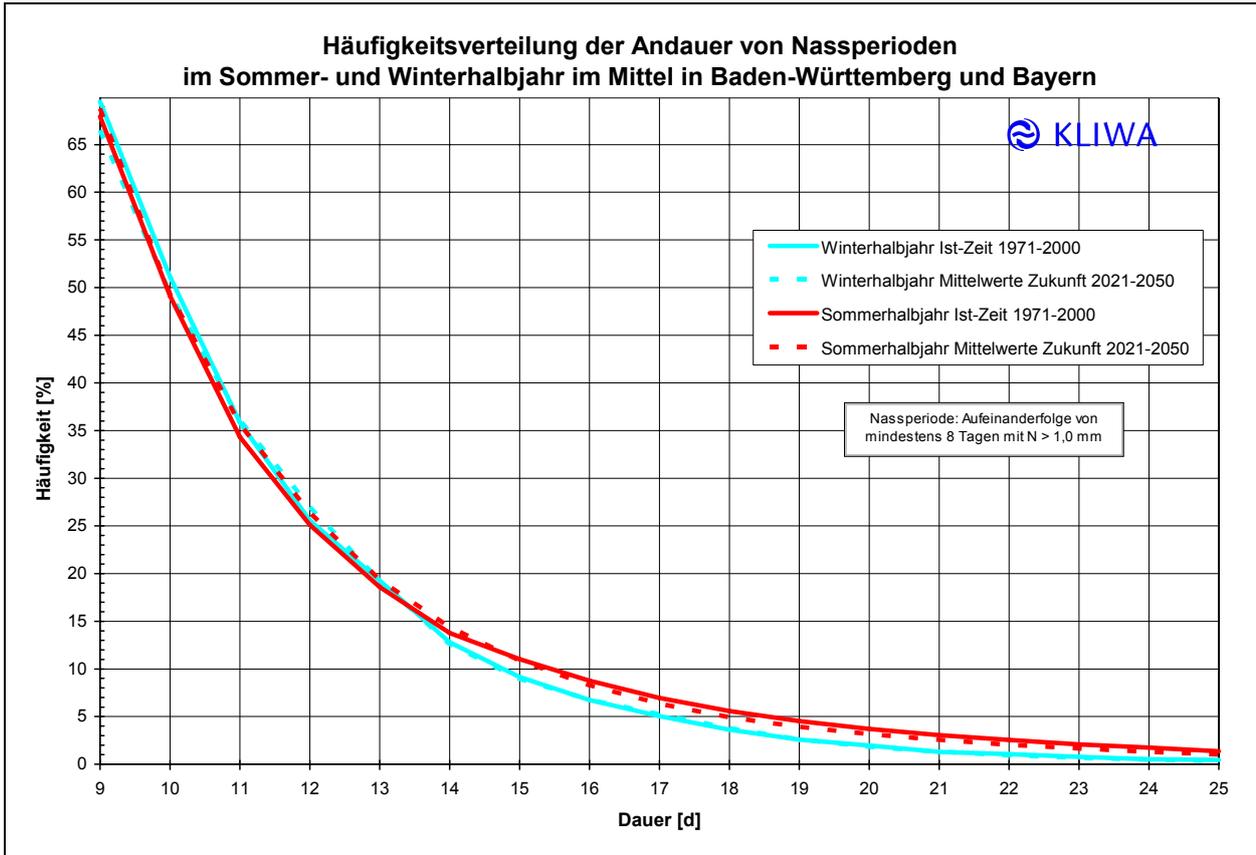


Abb. 5-22: Mittlere Dauer der extremen Nassperioden im Sommer- und Winterhalbjahr

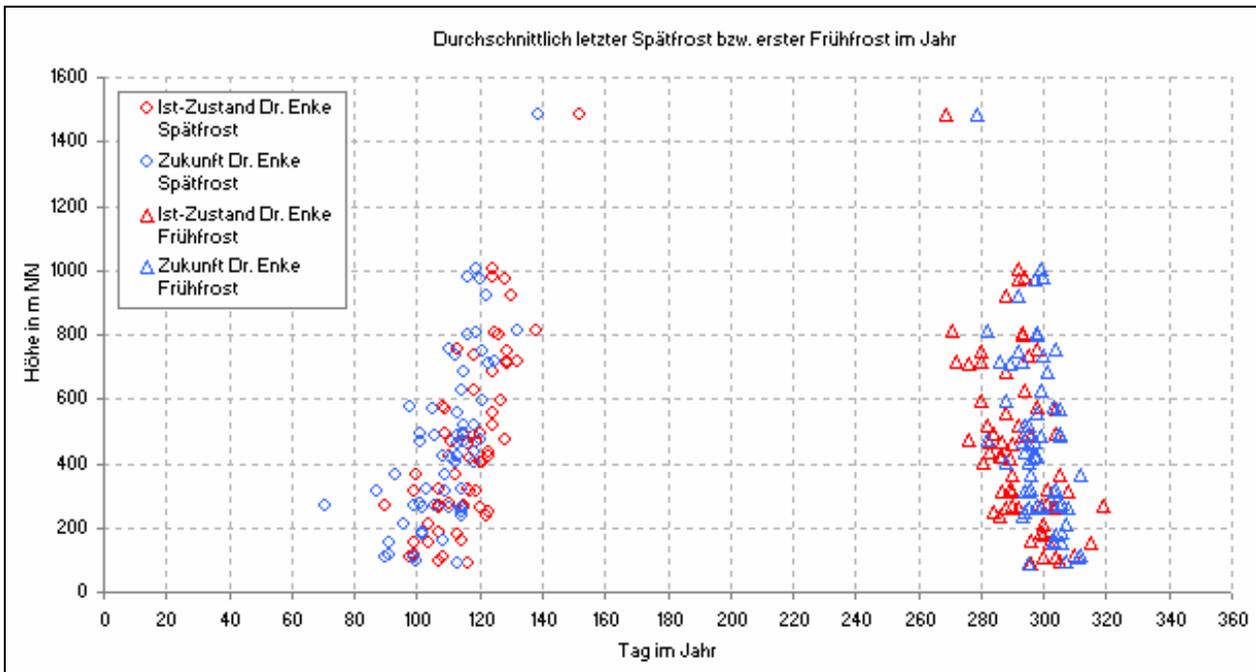


Abb. 5-23: Durchschnittlich letzter Spätfröst bzw. erster Frühfröst im Jahr

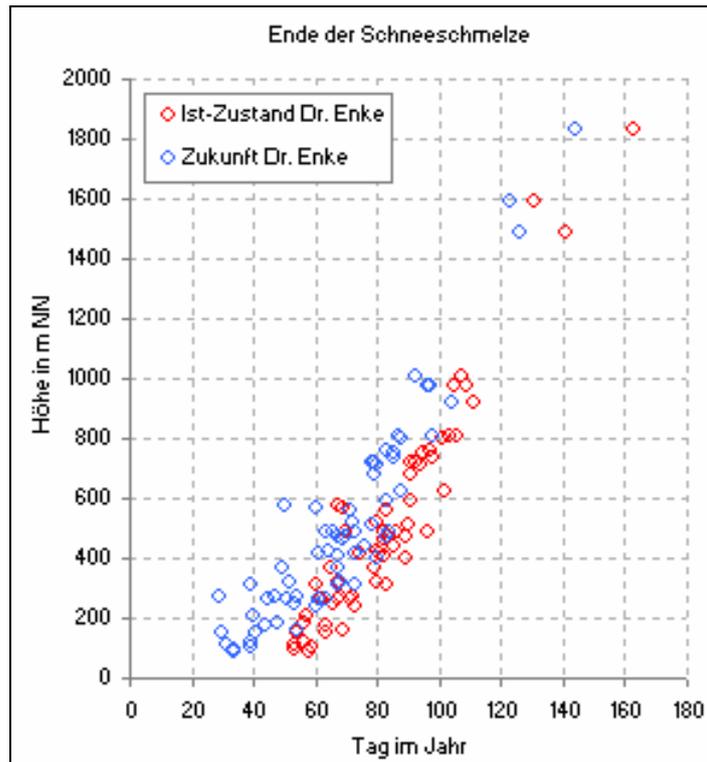


Abb. 5-24: Ende der Schneeschmelze

ermittelt wurden. Die Schneeschmelze im Zukunftsszenario endet deutlich früher und zwar zwischen ca. 20 Tagen in tieferen Lagen bis etwa 10 Tagen in höheren Lagen.

Die flächendeckend starke Zunahme der Lufttemperatur im Winterhalbjahr im Zukunftsszenario erhöht den Anteil flüssiger Niederschläge und die Anzahl der Schneeschmelzperioden während des Winters, wodurch letztlich ein früheres Ende der Schneeperiode simuliert wird.

5.2 Hydrologische Ergebnisse

5.2.1 Modellierung der Abflüsse mit Wasserhaushaltsmodellen

Mit Wasserhaushaltsmodellen (WHM) können die wesentlichen Komponenten des Wasserhaushalts Verdunstung, Grundwasserneubildung und Abfluss in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung berechnet werden. Entsprechende Prozesse werden in

regionalen und globalen Klimamodellen zwar z.T. auch modelliert, aber in einer erheblich gröberen Auflösung und mit sehr vereinfachenden Annahmen. Somit ist es notwendig, die Modellkette vom globalen Klimamodell zu den regionalen Klimamodellen durch Wasserhaushaltsmodelle zu ergänzen, um belastbare Aussagen zum Verhalten des regionalen Wasserhaushaltes zu erhalten.

Daher wurden im KLIWA-Projekt Simulationsrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen durchgeführt, um die Änderung des Wasserhaushalts in Folge der Klimaänderung zu ermitteln. In Baden-Württemberg wird das Wasserhaushaltsmodell LARSIM⁸ [2], in Bayern das Modellsystem ASGi-WaSim⁹ [21] eingesetzt. Die hydrologischen Teilprozesse werden damit in der Fläche in einer rasterbezogenen Auflösung von (in der Regel) 1 x 1 km² modelliert.

Beide verwendeten Wasserhaushaltsmodel-

⁸ Large Area Runoff Simulation Model

⁹ Kontinuierliche Abfluss- und Stofftransportmodellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen



le konnten eine hohe Simulationsqualität nachweisen [10]. Dies zeigt, dass in der Modellkette „Globales Klimamodell → Regionales Klimamodell → Wasserhaushaltsmodell“ die durch die Wasserhaushaltsmodelle hinzu kommende Unschärfe im Vergleich zu der Unschärfe der Klimamodelle gering ist.

Bei der Verwendung der WHM für die Untersuchung der Auswirkungen des Zukunftsszenarios wird davon ausgegangen, dass die bei der Aufstellung des Modells festgelegten Parameter unverändert für die Zukunft übernommen werden können. Zudem wird vereinfachend angenommen, dass die zukünftige Landnutzungsverteilung mit der heutigen übereinstimmt, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abzuschätzen ist, welche klimatisch oder anthropogen bedingte Landnutzungsänderung in der Zukunft eintritt. Vorliegende Untersuchungen mit WHM ergaben jedoch, dass der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Abflüsse bei Hochwasser in größeren Einzugsgebieten, insbesondere im Winterhalbjahr, eher gering ist [3, 15].

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4 werden zur Ermittlung der zukünftig wahrscheinlichen Änderungen der Wasserhaushaltsgrößen als Eingangsdaten in die WHM die Klimaszenarien des MR-Modells verwendet, jeweils für den Ist-Zustand und für das Zukunftsszenario.

Aus dem MR-Modell liegen für den Ist-Zustand Daten für die Zeitreihe 1971 bis 2000 vor. Für das Zukunftsszenario 2021 bis 2050 stehen Daten aus 600 Jahren zur Verfügung (10 Realisationen für je drei Dekaden, wobei der Datensatz jeder Dekade 2x10 Jahre besitzt), die der Periode des Zukunftsszenarios zuzuordnen sind. Es wurden die WHM-Simulationen mit allen Realisationen berechnet. Dabei wurden für die Niederschläge die Daten an den 491 Niederschlagsstationen und für die Klimadaten die Daten an den ca. 70 Klimastationen verwendet.

Um die Niederschlags- und Klimawerte der stationsbezogenen Daten auf die hohe räumliche Auflösung der Wasserhaushalts-

modelle zu interpolieren, wurde ein modifiziertes Inverses-Distanz-Verfahren angewandt, für einzelne klimatologische Parameter auch unter Berücksichtigung einer Höhenregression.

Da die Klimamodelle keine zeitgenauen Prognosen für einen bestimmten Tag liefern, sind auch für den Abfluss keine zeitgenauen Prognosen für einzelne Ereignisse möglich. Somit sind die Klimagrößen und die wasserwirtschaftlichen Größen bei einer Analyse der Ergebnisse im statistischen Sinne zu betrachten. Daher werden die gemessenen und simulierten Abflüsse der WHM statistisch ausgewertet.

Für die Auswertung der Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle im statistischen Sinn wurden mittlere jährliche Werte, mittlere monatliche Werte sowie Dauerlinien und Rangfolgen berechnet. Exemplarisch daraus werden die mittleren Monatswerte der Abflüsse über das Jahr ermittelt (Regimekurven). Daraus lässt sich die Veränderung des mittleren Abflussverhaltens über die Jahreszeiten hinweg verdeutlichen. Für die Regimekurven wurden zum einen alle Abflüsse jeweils eines Monats gemittelt (MoMQ). Zum anderen wurden die jeweils niedrigsten und höchsten Abflusswerte eines Monats bestimmt und diese jeweils pro Monat gemittelt (MoMnQ, MoMHQ).

Die Ergebnisse der WHM-Simulationen für die Änderung der MoMnQ, MoMQ und MoMHQ zwischen simuliertem Ist-Zustand und gemessenen Abflusswerten, die hier nicht dargestellt werden, hatten gezeigt, dass durch die kombinierte Klima- und Wasserhaushaltssimulation die gemessenen Regimekurven gut modelliert werden können [10].

Im Weiteren werden die Ergebnisse der WHM-Simulationen für die Änderung der MoMnQ, MoMQ und MoMHQ zwischen simuliertem Ist-Zustand und Zukunftsszenario erläutert. Daraus können die relativen Veränderungen durch die Klimaänderung ermittelt werden.

Dabei werden aus den Simulationsergebnissen für die 110 Pegel in Baden-

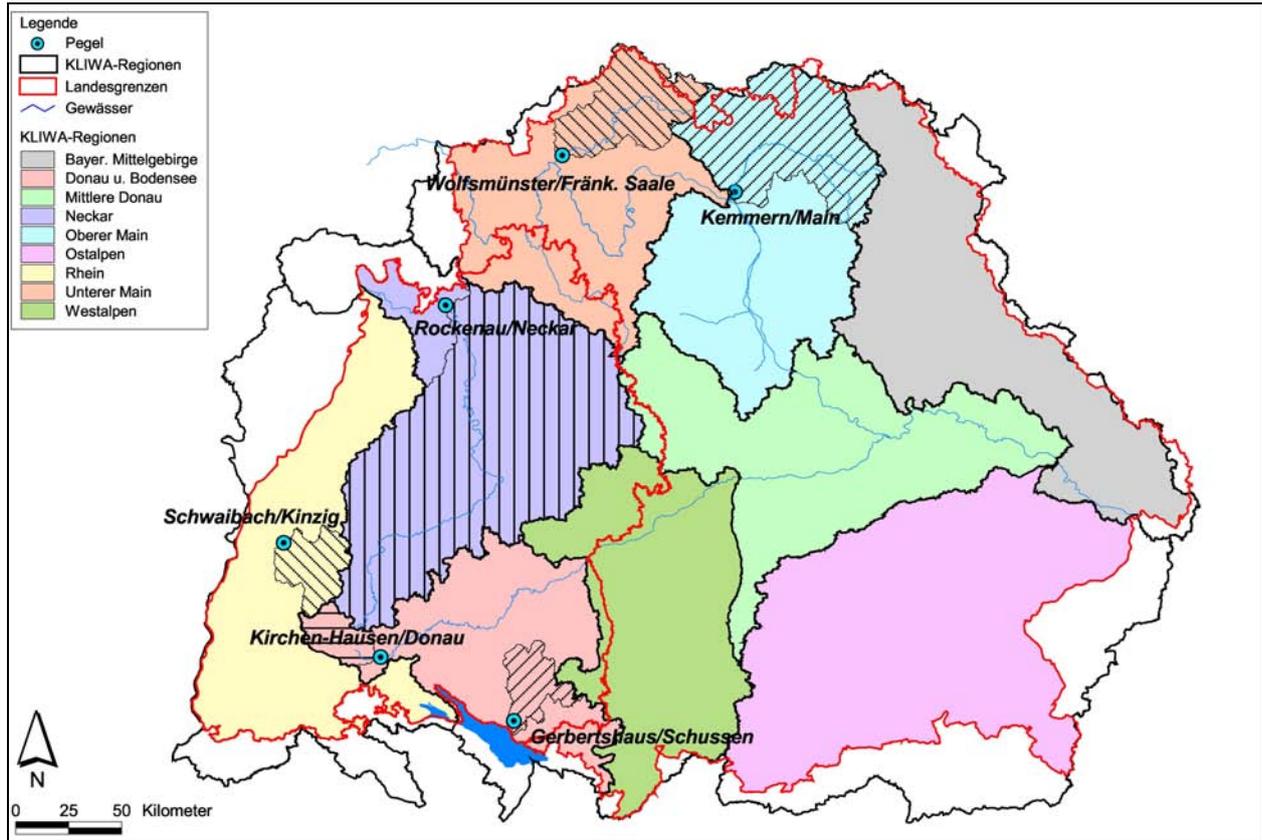


Abb. 5-25: Lage der exemplarisch ausgewählten Pegel und deren Einzugsgebiete innerhalb der 9 KLIWA-Regionen

Württemberg die Ergebnisse von vier Pegeln aus unterschiedlichen Naturräumen (Abb. 5-25) dargestellt, um die regionalen Unterschiede innerhalb Baden-Württembergs zu verdeutlichen. Der Pegel Rockenau/Neckar steht stellvertretend für den Bereich des Mittleren und Unteren Neckar-Einzugsgebiets, der Pegel Kirchen-Häusen/Donau für das obere Donau-Einzugsgebiet (Ostabdachung des Schwarzwalds), der Pegel Schwaibach/Kinzig für den südlichen Schwarzwald und der Pegel Gerbertshaus/Schussen für das Bodensee-Einzugsgebiet (bzw. Oberschwaben).

In Bayern konzentrierte sich die WHM-Modellierung bisher auf das Gebiet nördlich der Donau. Für das Maingebiet liegen Simulationsergebnisse für 50 Pegel vor. Exemplarisch werden hier die Ergebnisse für die Pegel Wolfsmünster (Fränkische Saale) sowie Kemmern (Oberes Main-Gebiet) vorgestellt.

5.2.2 Änderungen der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ)

Die monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ-Werte) zeigen an allen hier exemplarisch ausgewählten Pegeln eine Erhöhung der mittleren MoMNQ-Werte über das Jahr (Tab. 5-1, Abb. 5-26 und 5-27). Diese beträgt an den zwei Pegeln im Einzugsgebiet des Neckars und der Oberen Donau über 20%. An den Pegeln Wolfsmünster und Kemmern ist ebenfalls eine deutliche Zunahme der mittleren MoMNQ-Werte ersichtlich. Am Pegel Gerbertshaus und am Pegel Schwaibach sind die relativen Zunahmen deutlich geringer, betragen aber immer noch 4,5% bzw. 7,5%.

Die Erhöhung der mittleren jährlichen Niedrigwasserabflüsse beruht aber vor allem auf der starken Zunahme der Niedrigwasserabflüsse im Winterhalbjahr. Dort werden insbesondere an den Pegeln Rockenau, Kir-



chen-Hausen, Wolfsmünster und Kemmern deutlich höhere Werte für alle Monate des Winterhalbjahrs im Zukunftsszenario simuliert. Aber auch die MoMNQ-Werte der Pegel Schwaibach und Gerbertshaus nehmen zu.

Die Niedrigwasserabflüsse geben Aufschluss über den langsam abfließenden Anteil des Abflusses (Basisabfluss) und können somit als Indiz für die Grundwasserneubildung verstanden werden. Für die gerade im Winterhalbjahr stattfindende Grundwasserneubildung kann daher bereits auf Grundlage der höheren MoMNQ-Werte im Winterhalbjahr des Zukunftsszenarios vermutet werden, dass sich die zukünftige Situation nicht verschlechtern wird.

Grund für die höheren mittleren Niedrigwasserabflüsse sind die höheren Niederschläge, die vom MR-Modell für das Zukunftsszenario prognostiziert werden. Die höheren Niederschläge im Zukunftsszenario wirken sich somit nicht nur auf eine Erhöhung der Niederschlagsmengen von großen Einzelereignissen aus, denn dann wären die Auswirkungen auf die Niedrigwasser-Kenngrößen nur durch erhöhte Speicherfüllungen zu erklären, sondern auch die Häufigkeit von Niederschlägen nimmt zu (vgl. Kap. 5.3). Hinzu kommt die vermutlich häufigere zwischenzeitliche Schneeschmelze.

Dagegen ergeben sich bei der Niedrigwassersituation im Sommerhalbjahr des Zu-

kunftsszenarios an fast allen Pegeln deutlich niedrigere MoMNQ-Werte als im Ist-Zustand. Ausnahmen bilden die Pegel Rockenau, der diesbezüglich exemplarisch für das Neckar-Einzugsgebiet steht, und der Pegel Wolfsmünster (stellvertretend für das Gebiet der Fränkischen Saale). In diesen Bereichen scheint sich keine Verschärfung der Niedrigwassersituation zu ergeben.

An anderen Pegeln ist in allen Monaten des Sommer-Halbjahrs mit niedrigeren MoMNQ-Werten für das Zukunftsszenario zu rechnen. Die Verringerungen der Abflüsse betragen am Pegel Schwaibach in den kritischen Sommermonaten Juli und August, in denen die niedrigsten Abflüsse auftreten, über 20% (am Pegel Schwaibach treten auch nach bisherigen Beobachtungen für das ca. 1.000 km² große Einzugsgebiet minimale Niedrigwasserabflüsse von weniger als 1 m³/s auf).

Auf Grundlage dieser bisherigen Modellergebnisse scheint demnach eine zukünftige Verschärfung der Niedrigwasserproblematik v.a. in weiten Teilen Baden-Württembergs in den ohnehin abflussschwachen Sommermonaten wahrscheinlich. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass bei dieser Untersuchung nur der Zeitraum bis 2050 betrachtet wird, so dass durch vermutlich weiter ansteigende Temperaturen nach 2050 eine weitere Verringerung der sommerlichen Niedrigwasserwerte möglich ist.

Tab. 5-1: Monatliche mittlere Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ):
Relative Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

Pegel	Kalenderjahr	hydrol. Sommer (Mai – Okt.)	hydrol. Winter (Nov. – April)
Rockenau/Neckar	+ 21,6 %	+ 2,4 %	+ 33,6 %
Kirchen-Hausen/Donau	+ 21,7 %	- 6,0 %	+ 37,1 %
Schwaibach/Kinzig	+ 7,5 %	- 16,2 %	+ 21,2 %
Gerbertshaus/Schussen	+ 4,5 %	- 6,3 %	+ 12,8 %
Wolfsmünster/Fränk. Saale	+ 32,3 %	+ 12,2 %	+ 45,3 %
Kemmern/Main	+ 13,8 %	- 3,7%	+ 31,4 %

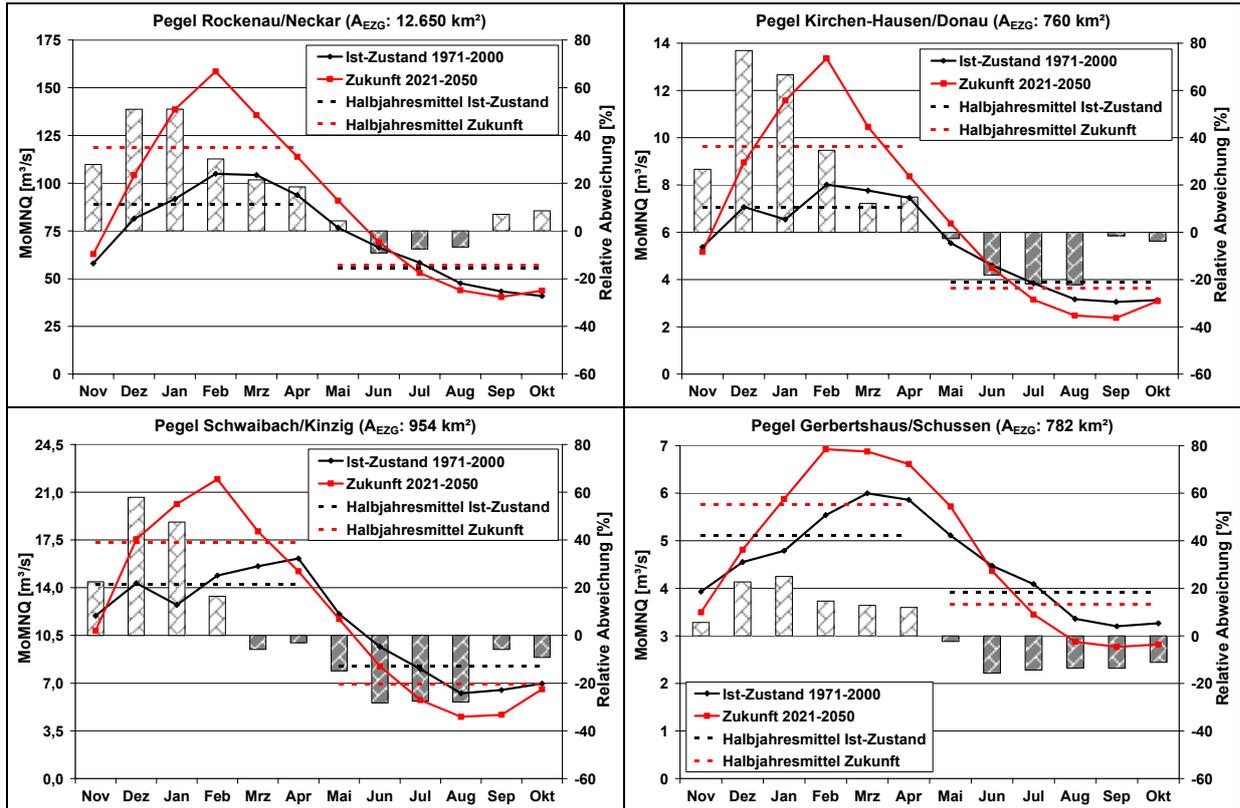


Abb. 5-26: Monatliche mittlere Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (Wasserhaushaltsmodell LARSIM)

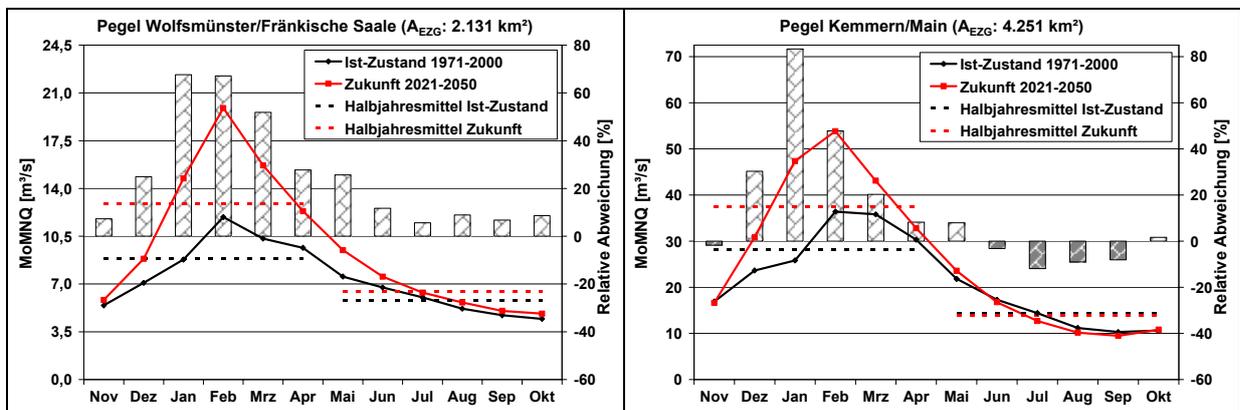


Abb. 5-27: Monatliche mittlere Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für zwei Pegel in Bayern (Wasserhaushaltsmodell ASGi)

5.2.3 Änderungen der monatlichen mittleren Abflüsse (MoMQ)

Bei den monatlichen mittleren Abflüssen (MoMQ) ergeben sich bezogen auf das Kalenderjahr für das Zukunftsszenario größere prozentuale Erhöhungen des Abflusses als

bei der Betrachtung der monatlichen Niedrigwasserabflüsse (Tab. 5-2, Abb. 5-28 und 5-29).

Auch hier sind wieder wie beim Niedrigwasser die Zunahmen der mittleren Abflüsse im Winter-Halbjahr im Zukunftsszenario ent-



scheidend. Vor allem in den Monaten Dezember bis Februar ergeben sich deutlich höhere mittlere Abflüsse im Zukunftsszenario als im Ist-Zustand. Auffällig sind die großen Zunahmen der mittleren Abflüsse in diesen Monaten vor allem am Pegel Kirchen-Hausen im Oberen Donaugebiet. We-

niger ausgeprägt und geringer sind die Zunahmen am Pegel Gerbertshaus. Am Pegel Gerbertshaus sind auch als einzigem Pegel im Sommer-Halbjahr fast durchgängig Verringerungen der mittleren Abflüsse im Zukunftsszenario zu erkennen. An den anderen Pegel ergeben sich Abnahmen vor al-

Tab. 5-2: Monatliche mittlere Abflüsse (MoMQ):
Relative Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

Pegel	Kalenderjahr	hydrol. Sommer (Mai – Okt.)	hydrol. Winter (Nov. – April)
Rockenau/Neckar	+ 24,7 %	+ 1,4 %	+ 36,9 %
Kirchen-Hausen/Donau	+ 27,0 %	- 2,0 %	+ 40,0 %
Schwaibach/Kinzig	+ 15,8 %	- 10,7 %	+ 29,2 %
Gerbertshaus/Schussen	+ 5,0 %	- 10,9 %	+ 17,2 %
Wolfsmünster/Fränk.Saale	+ 39,7 %	+ 17,8 %	+ 50,2 %
Kemmern/Main	+ 13,6 %	- 1,2 %	+ 28,3 %

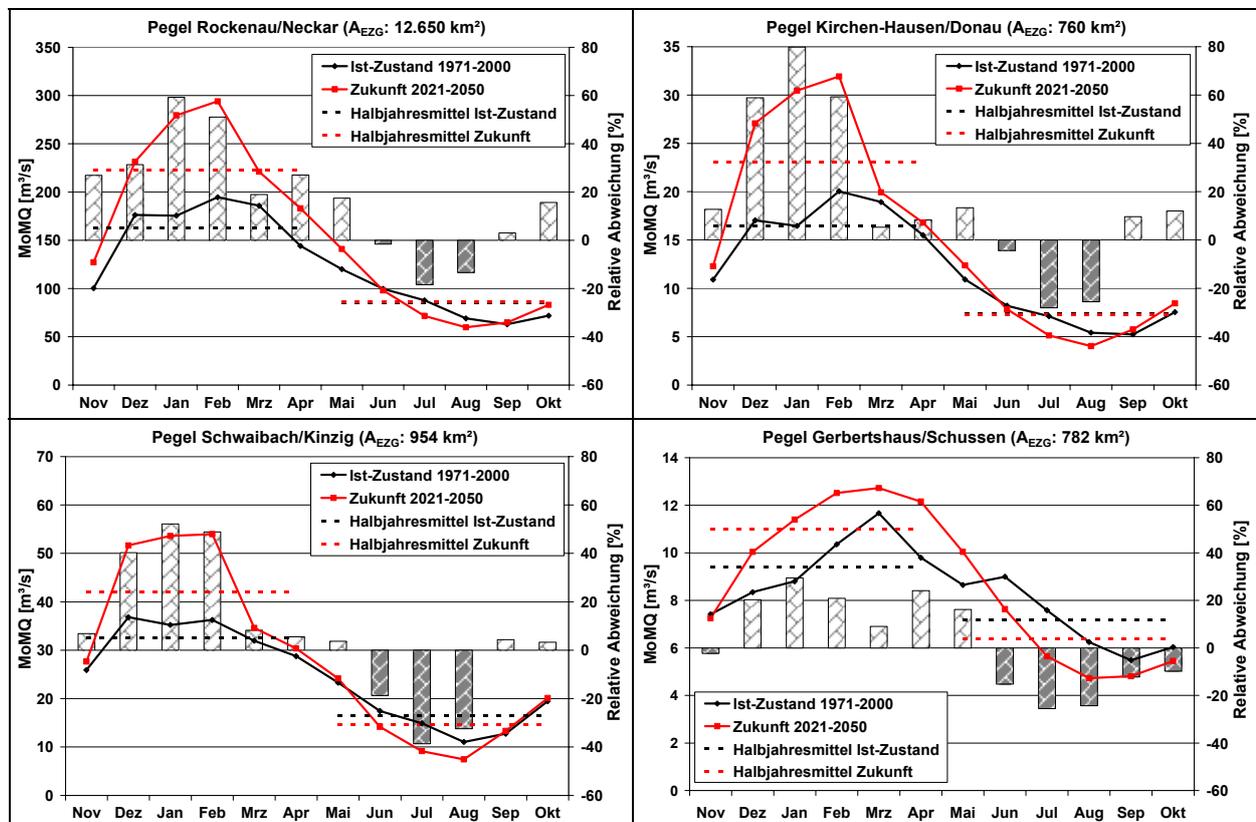


Abb. 5-28: Monatliche mittlere Abflüsse (MoMQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (Wasserhaushaltsmodell LARSIM)

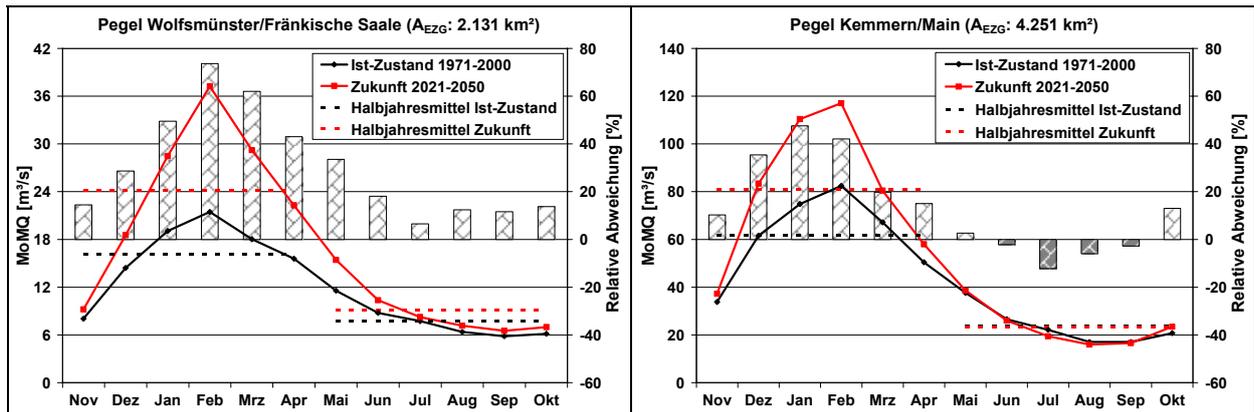


Abb. 5-29: Monatliche mittlere Abflüsse (MoMQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für zwei Pegel in Bayern (Wasserhaushaltsmodell ASGi)

lem im Juli und August, während in den anderen Sommermonaten wenig Änderungen auftreten. Deutliche relative Verringerungen des mittleren Abflusses ergeben sich noch am Pegel Schwaibach, während die Pegel Rockenau, Kirchen-Hausen und Kemmern kaum Veränderungen im Sommerhalbjahr zeigen. Eine Ausnahme bildet der Pegel Wolfsmünster mit einer geringen Zunahme im Sommerhalbjahr.

5.2.4 Änderungen der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse (MoMHQ)

Bei der Betrachtung der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse (MoMHQ) über das Jahr treten markante Erhöhungen im Zukunftsszenario vor allem an den Pegeln Kirchen-Hausen im Oberen Donaugebiet und Wolfsmünster an der Fränkischen Saale auf (Tab. 5-3, Abb. 5-30 und Abb. 5-31). Aber auch der Neckarpegel Rockenau zeigt eine deutliche Erhöhung der MoMHQ-Werte. Geringer, aber immer noch eindeutig sind die Zunahmen im Zukunftsszenario bei den Pegeln Schwaibach und Kemmern. Am Pegel Gerbertshaus dagegen ist nur eine relativ geringe Erhöhung zu verzeichnen.

Ganz deutlich sind die Erhöhungen der mittleren Hochwasserabflüsse wieder auf die angestiegenen Werte im Winterhalbjahr zurückzuführen. Die MoMHQ-Werte an den Pegeln Rockenau und Kirchen-Hausen aber auch beim Pegel Wolfsmünster steigern sich im Winter im Zukunftsszenario gegenüber dem Ist-Zustand um rund 40-50%. In

einzelnen Monaten des Winterhalbjahrs, besonders im Januar, werden sogar Zunahmen von über 60% erreicht.

Damit ist auf Grundlage dieser Daten von einer Verschärfung der Hochwassersituation vor allem im Oberen Donaugebiet sowie im Bereich der Fränkischen Saale auszugehen. Aber auch im Neckar-Einzugsgebiet zeigen die Simulationen eine sehr deutliche Erhöhung der mittleren Winterhochwasser im Zukunftsszenario.

Auch an der Kinzig (Pegel Schwaibach) werden in den drei Monaten Dezember bis Februar noch MoMHQ-Zunahmen von über 40% erreicht. Somit sind in den Regionen Obere Donau, Neckar und Südschwarzwald gerade in den Monaten, in denen die maximalen MoMHQ-Werte bereits im Ist-Zustand auftreten, auch die größten Zunahmen der Abflüsse im Zukunftsszenario festzustellen.

Die vom MR-Modell simulierte regionale Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr im Zukunftsszenario, die zudem wegen der Temperaturzunahme vermehrt als Regen fallen, wirkt sich somit direkt auf die Hochwassersituation in einzelnen Einzugsgebieten aus.

Am Pegel Kemmern ist die Zunahme der MoMHQ-Werte im Winterhalbjahr deutlich geringer. Dabei ist die Zunahme der MoMHQ-Werte etwas mehr ins Spät-Frühjahr verschoben. Auch am Pegel Gerbertshaus in Oberschwaben finden sich vergleichbar geringe Zunahmen der



MoMHQ-Werte im Winterhalbjahr, die ebenfalls später im Frühjahr auftreten. Auf Grundlage der Daten ist in diesen Gebieten im Zukunftsszenario auch mit einer Zunahme der Hochwasser zu rechnen, die aber geringer ausfällt als in anderen Einzugsgebieten.

Somit ergeben sich regionale Unterschiede in der simulierten Verschärfung der Hochwasserlage im Zukunftsszenario.

In den drei Sommermonaten Juni bis August zeigen sich Abnahmen der MoMHQ-Werte an allen vier Pegeln in Baden-

Tab.5-3: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ): Relative Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand

Pegel	Kalenderjahr	hydrol. Sommer (Mai – Okt.)	hydrol. Winter (Nov. – April)
Rockenau/Neckar	+ 28,7 %	+ 4,5 %	+ 38,8 %
Kirchen-Hausen/Donau	+ 33,3 %	+ 5,1 %	+ 44,0 %
Schwaibach/Kinzig	+ 21,1 %	- 7,0 %	+ 34,5 %
Gerbertshaus/Schussen	+ 5,0 %	- 10,3 %	+ 15,8 %
Wolfsmünster/Fränk.Saale	+ 38,6 %	+ 25,9 %	+ 43,2 %
Kemmern/Main	+ 11,6 %	+ 5,1 %	+ 18,1 %

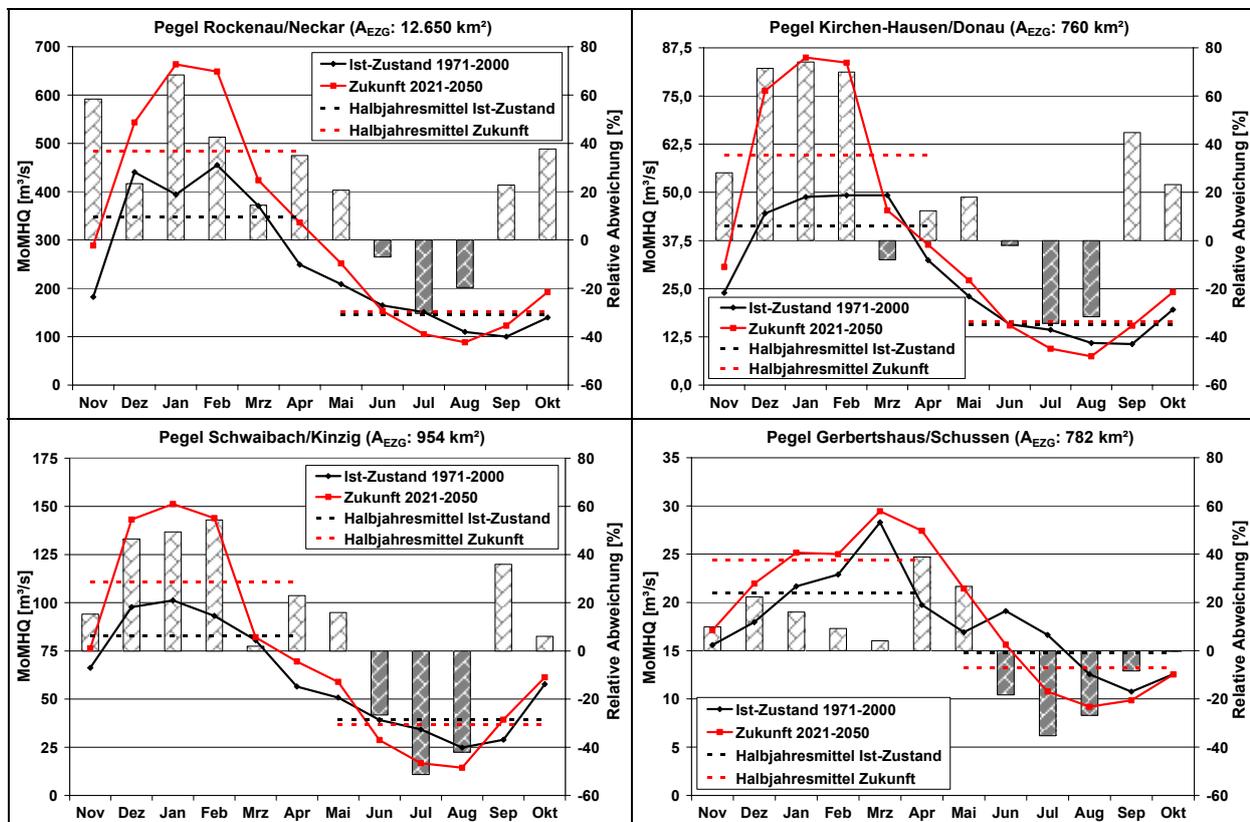


Abb. 5-30: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (Wasserhaushaltsmodell LARSIM)

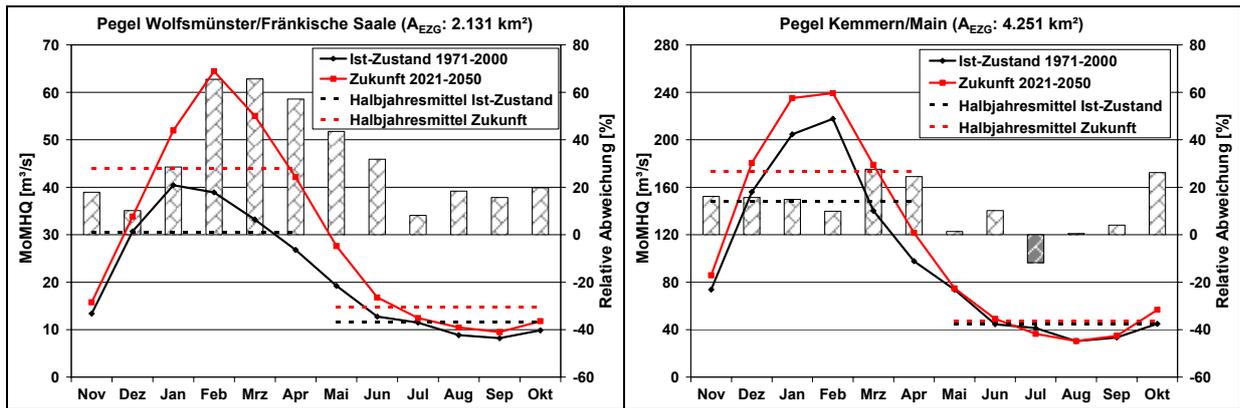


Abb. 5-31: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für zwei Pegel in Bayern (Wasserhaushaltsmodell ASGi)

Württemberg. Am Pegel Kemmern/Main werden nur im Juni abnehmende MoMHQ-Werte berechnet, beim Pegel Wolfsmünster nehmen die MoMHQ-Werte im Sommerhalbjahr gar nicht ab. Zunahmen der monatlichen Abflusshöchstwerte treten noch z.T. auch im September auf, die aber auf Grund der dann herrschenden relativ geringen Abflüsse keine schädigenden Auswirkungen haben.

5.3 Ableitung von Klimaänderungsfaktoren

5.3.1 Klimaänderungsfaktor Hochwasser

Auf Grund der Unsicherheiten in der Modellkette vom Klimamodell zum Wasserhaushaltsmodell wurden die Ergebnisse der hydrologischen Modellrechnungen zunächst in Hinblick auf das Änderungsverhalten des mittleren Abflusses interpretiert. Dazu gehören auch die Änderungen der jahreszeitlichen Verteilung der mittleren monatlichen Abflüsse (einschließlich der mittleren monatlichen niedrigsten und höchsten Werten (MoMNQ und MoMHQ)), wie in Kapitel 5.5 beschrieben.

Neben dem Änderungsverhalten des mittleren Abflusses stehen Aussagen zu den Extremwerten im Vordergrund, da diese hydrologischen Grenzwerte für die Wasserwirtschaft von großer Bedeutung sind. Dies betrifft sowohl die Niedrig- als auch die

Hochwasserabflüsse. Im Weiteren wird insbesondere auf die Hochwassersituation eingegangen. Weitergehende Untersuchungen zu den Niedrigwasserabflüssen sind derzeit in Bearbeitung.

Wie bereits die Ergebnisse der WHM-Simulationsrechnungen zeigten, ist zukünftig aufgrund der Klimaänderung in einzelnen Regionen Süddeutschlands von einer Erhöhung der Hochwasserabflüsse auszugehen. Auch die Untersuchungen zum Langzeitverhalten der gemessenen Hochwasserabflüsse haben gezeigt, dass Hochwasserereignisse in den letzten 30 Jahren häufiger auftraten. Somit weisen die Ergebnisse der Trendanalyse mit Messdaten und die Modellrechnungen mit den Klimaszenarien in die gleiche Richtung.

Unter dem Eindruck der Klimaveränderung und der damit einhergehenden Verschärfung der künftigen Hochwasserereignisse ist die Hochwasserschutzstrategie mit den drei Bausteinen "Hochwasser-Flächenmanagement", "Technischer Hochwasserschutz" und "Hochwasservorsorge" noch vordringlicher umzusetzen. Gerade für Planungsvorhaben zum technischen Hochwasserschutz sind Bemessungsgrößen für extreme Ereignisse zur Festlegung des Umfangs von Hochwasserschutzprojekten unter Berücksichtigung des Klimawandels erforderlich.

Die Auftretenswahrscheinlichkeiten hydrologischer Extremwerte (und damit die statistischen Grundlagen der Bemessungsabflüsse



se) können prinzipiell über eine Extremwertanalyse von Hochwasserkennwerten, angewendet auf die Abflussszenarien bestimmt werden. Bei der Interpretation der Berechnungen mit den Wasserhaushaltsmodellen ist jedoch zu beachten, dass die Aussagekraft der Ergebnisse, insbesondere in der Hochwasserstatistik, auf Grund der zeitlichen Auflösung der Daten mit einem Zeitschritt von einem Tag mit kleiner werdenden Einzugsgebieten abnimmt.

Wegen der noch bestehenden Unsicherheiten bei den Klimamodellen und den Modellannahmen (Wahl des Emissionsszenarios) beim globalen Klimamodell kann die Höhe der Zunahme der Hochwasserabflüsse derzeit nicht ausreichend sicher quantifiziert werden. Die Untersuchungsergebnisse aus den WHM geben jedoch Anlass, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu modifizieren und trotz der Unsicherheiten aufgrund des deutlichen Signals des Klimawandels einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen [25, 34].

Eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen würde in den meisten Fällen zu relativ moderaten Kostenerhöhungen führen, wenn beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen werden, wie an Hand von Fallbeispielen aus der Praxis nachgewiesen wurde [37]. Spätere Anpassungen sind meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Der Lastfall Klimaänderung soll deshalb zukünftig bei der Planung von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen mit untersucht werden. Dies erfolgt durch einen Zuschlag (Klimaänderungsfaktor) zum Bemessungswert.

Dieser Klimaänderungsfaktor f_T wurde in Bayern, gestützt auf die bisherigen Untersuchungsergebnisse, landesweit einheitlich für das HQ_{100} auf einen Wert von 15 % festgelegt [34]. Für Bayern wurde zunächst folgende Vorgehensweise für Abflüsse geringerer oder höherer Jährlichkeit eingeführt:

- Bei Jährlichkeiten bis zu HQ_{100} (Überschreitungswahrscheinlichkeit > 0.01) wird ein einheitlicher Klimaänderungsfaktor (15% Zuschlag) verwendet.
- Für das HQ_{200} ist der Klimaänderungsfaktor zu halbieren (7,5%).
- Bei höheren Jährlichkeiten (HQ_{500} und darüber, Überschreitungswahrscheinlichkeit < 0.002) - wie z.B. bei der Bemessung von Talsperren und Rückhaltbecken - ist ein Zuschlag nicht erforderlich.

Die Einführung dieser pauschalen Klimaänderungsfaktoren trägt dem Vorsorgegedanken Rechnung. Eine regionale Anpassung ist vorgesehen, wenn die Ergebnisse von Szenario-Simulationen dies nahe legen.

Um die Größe des Klimaänderungsfaktors in Baden-Württemberg abschätzen zu können, sind die mit den WHM simulierten Abflüsse auf der Basis der regionalen Klimaszenarien mit Methoden der Extremwertstatistik aufbereitet worden [16]. Auf dieser Grundlage wurden je nach Wiederkehrzeit (Jährlichkeit T_n) spezifische Klimaänderungsfaktoren regional festgelegt. Bereits die Untersuchungen zum MoMHQ in Kapitel 5.2.4 haben gezeigt, dass es innerhalb Baden-Württemberg regionale Unterschiede in den Auswirkungen der Klimaänderung gibt, so dass auch der Klimaänderungsfaktor gebietsspezifisch angepasst werden muss.

Für den Lastfall Klimaänderung können die aus der Hochwasserregionalisierung oder über hydrologische Modellberechnung vorliegenden Abflüsse direkt über Klimaänderungsfaktoren erhöht werden. Dabei gilt:

$$HQ_{T_n,K} = f_{T,K} \times HQ_{T_n}$$

HQ_{T_n} = Hochwasserabfluss der Jährlichkeit T_n
 $f_{T,K}$ = regionaler Klimaänderungsfaktor

Zusammengefasst über alle untersuchten Jährlichkeiten ergeben sich für Baden-Württemberg die in der Abbildung 5-32 dargestellten 5 Regionen mit den in Tabelle 5-4

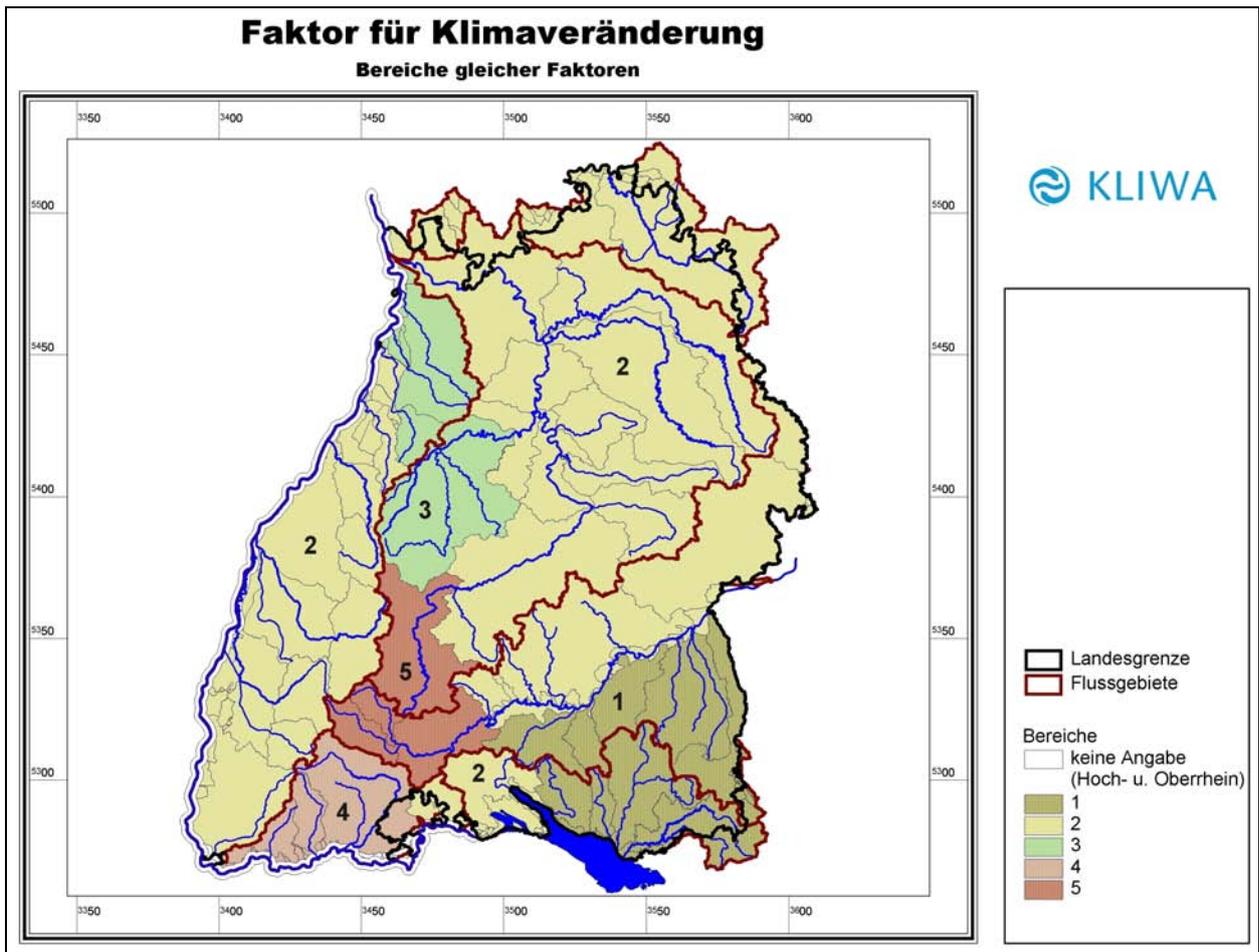


Abb. 5-32: Regional einheitliche Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$ in Baden-Württemberg [25]

Tab. 5-4: Regionale Klimaänderungsfaktoren für unterschiedliche Jährlichkeiten T in Baden-Württemberg [25]

T [Jahre]	Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$				
	1	2	3	4	5
2	1,25	1,50	1,75	1,50	1,75
5	1,24	1,45	1,65	1,45	1,67
10	1,23	1,40	1,55	1,43	1,60
20	1,21	1,33	1,42	1,40	1,50
50	1,18	1,23	1,25	1,31	1,35
100	1,15	1,15	1,15	1,25	1,25
200	1,12	1,08	1,07	1,18	1,15
500	1,06	1,03	1,00	1,08	1,05
1000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Bemerkung: Für Jährlichkeiten $T > 1000$ a ist der Faktor gleich 1,0



aufgelisteten jeweils unterschiedlichen Klimaänderungsfaktoren [25].

Analog zu den Ergebnissen in Kapitel 5.2 treten im Bereich der Oberen Donau die größten Klimaänderungsfaktoren auf. Diese gelten auch für das Obere Neckar-Gebiet. Etwas geringere Werte sind daran im Anschluss südlich (Hochrheingebiet) bzw. nördlich (Nagold-Enz-Gebiet und Kraichgau) zu finden. Im Bereich des Mittleren und Unteren Neckar-Einzugsgebiets und des Schwarzwalds sind die Faktoren zwar geringer, aber immer noch deutlich erhöht (vor allem bei kleinen und mittleren Jährlichkeiten). Die geringsten Änderungen sind im Bereich Oberschwaben/Bodensee-Einzugsgebiet zu erwarten.

Durch räumliche Zuordnung zu einer der 5 Regionen stehen damit Klimaänderungsfaktoren für beliebige Gebiete Baden-Württembergs zur Verfügung. Die Faktoren zeigen, dass die Klimaänderung zu einer erheblichen Zunahme kleinerer und mittlerer Hochwasser führt. Auch bei den für Fragen des Hochwasserschutzes im wesentlichen maßgebenden Jährlichkeiten (50-jährlich, 100-jährlich) liegt eine deutliche Erhöhung des Hochwasserabflusses vor. Bei den für Fragen der Anlagensicherheit (Hochwasserrückhaltebecken, Talsperren) zu untersuchenden Jährlichkeiten HQ₁₀₀₀ bis HQ₁₀₀₀₀ sind keine Erhöhungen zu erwarten.

Die in Baden-Württemberg initiierte Regelung zielt darauf ab, bei Neuplanungen nur dann die Klimaänderungsfaktoren sofort zu berücksichtigen, wenn Anlagenteile später nur unter beträchtlichen Zusatzkosten verändert bzw. angepasst werden können.

In Bayern soll bei Planungen für neue Hochwasserschutzmaßnahmen bei der Festlegung der hydrologischen Bemessungsgrößen in der Regel die zu erwartenden Klimaänderungen durch den pauschalen Klimaänderungsfaktor berücksichtigt werden. In begründeten Einzelfällen kann allerdings auf die Anwendung des Klimaänderungsfaktors zunächst verzichtet werden; beispielsweise sollte der Bemessungsabfluss an Grenzgewässern nicht einseitig verändert werden [34].

Auf Grund der derzeit noch bestehenden Unsicherheiten bei den Klimamodellen und den Modellannahmen ist in Baden-Württemberg eine Fortschreibung der in Tabelle 5-4 gegebenen Klimaänderungsfaktoren zu gegebener Zeit vorgesehen. Auch der für Bayern festgelegte Zuschlag von 15% zum HQ₁₀₀ soll bei Vorliegen neuerer, gesicherterer Erkenntnisse regional angepasst werden.

5.3.2 Klimaänderungsfaktor Niederschlag

Die jetzt erforderliche Berücksichtigung des Lastfalles Klimaänderung auf wasserwirtschaftliche Bauwerke kann zu deutlichen Änderungen laufender Planungen führen. Bei Hochwasserrückhaltebecken z.B. erhöhen sich dadurch neben den Scheitelwerten auch die Füllungen der Hochwasserganglinien. Wenn das Schutzziel beibehalten werden soll, steigt bei den Hochwasserrückhaltebecken das erforderliche Rückhaltevolumen entsprechend an. Die Sensitivität der Wirkung eines Rückhaltereaumes auf den Lastfall Klimaänderung hängt dabei sehr stark vom Grad der Drosselung ab. Hochwasserrückhaltebecken, die das maßgebende Bemessungshochwasser nur relativ wenig abmildern, reagieren sehr empfindlich auf Erhöhungen der Zuflussfülle. Dagegen reagieren Becken mit starker Abminderung der maßgebenden Bemessungsganglinie wesentlich unempfindlicher auf Erhöhungen der Zuflussfülle.

Die Bemessung des Hochwasserrückhaltevolumens erfolgt über Bemessungsganglinien, die einer bestimmten Jährlichkeit zugeordnet werden. Die Bereitstellung der Bemessungsganglinien hängt dabei von der Verfügbarkeit der entsprechenden hydrologischen Information am geplanten Standort ab. Die Bemessungsganglinien werden deshalb oft über Niederschlag/Abflussmodelle ermittelt. Zugrundegelegt werden dabei Starkregenereignisse der für die Bemessung vorgegebenen Jährlichkeit mit unterschiedlicher Dauerstufe, die aus dem KOSTRA-Atlas [7] bzw. dem REWANUS-Atlas [14] entnommen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Auswahl der Niederschlagsdauern so erfolgt, dass mit den Be-

messungsganglinien sowohl das maßgebende Abflussereignis bezüglich des Abfluss-Scheitelwerts als auch bezüglich der maßgebenden Abflussfülle zur Ermittlung des Volumens des gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraums bereitgestellt wird.

Eine Erhöhung der Bemessungsniederschläge (z.B. auf Grundlage der KOSTRA-Daten [7]) über ereignisspezifische (N_T, T_D) Klimaänderungsfaktoren wäre sinnvoll. Entsprechende, aus Klimamodellen abzuleitende Faktoren stehen jedoch derzeit allerdings noch nicht zur Verfügung.

Werden hydrologische Modellberechnungen mit aufgrund von Klimaänderungen erhöhten Niederschlägen benötigt, so wird für Baden-Württemberg vorgeschlagen, über „maßgebende“ Gewässerstellen je Jährlichkeit T_n einen Klimaänderungsfaktor Niederschlag $f_{T,N}$ abzuleiten [25]. Der Faktor ist so zu wählen, dass an den „maßgebenden“ Gewässerstellen die aus den HQ_{T_n} -Klimaänderungsfaktoren abgeschätzten Abflusserhöhungen erreicht werden. Dabei ist für die Modellansätze zu berücksichtigen, dass mit einer Erhöhung der Niederschläge auch ein geändertes Abflussverhalten (u. a. höhere Abflussbeiwerte, rascheres Abfließen) verbunden ist.

Auch in Bayern erfolgt die Ermittlung der

Bemessungsfüllen wie bisher, aber unter Berücksichtigung des um den Klimaänderungsfaktor erhöhten Abflussscheitels. Wird der um den Klimaänderungsfaktor erhöhte HQ_{100} -Wert als Bemessungsabfluss gewählt, ist der Niederschlag für alle Niederschlagsdauerstufen um den gleichen Prozentsatz anzuheben, so dass bei der kritischen Niederschlagsdauer der Bemessungsscheitelabfluss modelliert wird [34].

Die Anhebung aller Niederschlagsdauerstufen um einen einheitlichen Faktor ist eine vereinfachte Vorgehensweise und kann später nach entsprechenden Untersuchungen durch eine von der Niederschlagsdauer abhängige Änderungsfunktion abgelöst werden. Unbenommen von der linearen Anhebung der Niederschläge sollte das auf Grund der höheren Niederschlagsintensität unter Umständen geänderte Abflussbildungsverhalten berücksichtigt werden. Durch diese Berücksichtigung kann sich eventuell auch die kritische Niederschlagsdauer ändern.

Bei der beschriebenen Vorgehensweise handelt es sich um einen für die praktische Anwendung entwickelten einfachen Lösungsweg. Dabei ist in jedem Fall zu prüfen, ob die so ermittelten Abflüsse für das jeweilige Gewässer hydrologisch und hydraulisch plausibel erscheinen (Leistungsfähigkeit).



6 Ausblick

Derzeit erscheinen die Ergebnisse der Klimaszenarienrechnungen mit dem MR-Modell auf der Basis von Messdaten, verknüpft mit einer dynamischen Wetterlagenklassifikation, – trotz einer Reihe von Unzulänglichkeiten – für das Zukunftsszenario 2021 bis 2050 am wahrscheinlichsten, da sie tendenziell mit den aus den Langzeituntersuchungen abgeleiteten Erfahrungswerten übereinstimmen. Eine Weiterentwicklung dieses statistisch-dynamischen Verfahrens ist auf der Basis des verbesserten globalen Klimamodelles (ECHAM5) in Vorbereitung.

Mittelfristig wird die dynamische regionale Modellierung (z.B. Modell REMO) am besten geeignet sein, um das breite Spektrum der Anwendungsgebiete der Klimafolgen, bezogen auf die regionale wasserwirtschaftliche Problematik, abdecken zu können [1].

Dazu gibt es einige Entwicklungen, die verbesserte Ergebnisse versprechen, und zwar:

- Das Globalmodell ECHAM5 wird zur Zeit mit einer höheren horizontalen (T63, ca. 150 x 150 km) und vertikalen Auflösung (19 oder 31 Schichten) gerechnet. Dadurch wird erwartet, dass sich die Simulation des Niederschlages verbessert.
- Mit einer verbesserten REMO-Version 5.7 wird derzeit ein neues Szenario für den Ist-Zustand und drei Szenarienzustände (von ca. 2010 bis 2100) doppelt genestet mit einer horizontalen Auflösung von bis zu ca. 10 x 10 km (bisher 18 x 18 km) erstellt. Das neue Modellgebiet umfasst Deutschland und angrenzende Gebiete, soweit deren Flüsse nach Deutschland entwässern.



Abb. 6-1: Lokaler Hochwasserschutz

Es ist noch ein großer Entwicklungsaufwand bei den regionalen dynamischen Modellen sowie beim antreibenden globalen Modell zu leisten, damit die komplexen physikalischen Zusammenhänge noch besser modelliert werden können, um für wasserwirtschaftliche Fragestellungen verbesserte Modellergebnisse zu haben. Dennoch ist allgemein anerkannt, dass nur dieser Modellansatz eine entscheidende Verbesserung der Aussagen für das zukünftige Klima bringen kann.

Solange aber noch unsicher ist, welche Verbesserungen mit den oben angeführten Weiterentwicklungen erzielt werden, müssen statistische Modelle wie das MR-Modell zum Downscaling der Ergebnisse von globalen Modellen diese Lücke schließen, um für die Planung von wasserwirtschaftlichen Anlagen Bemessungswerte festlegen zu können. Ein zukünftig wichtiges Themengebiet in der Wasserwirtschaft ist die Auswir-

kung der Klimaänderung auf die Kurzzeittiefniederschläge. Da sich die Charakteristika konvektiver Zellen ändern, müssen die Bemessungsgrundlagen für die kommunalen Entwässerungsnetze an die Folgen der Klimaänderung angepasst werden.

Langfristig könnten damit enorme Kosten verbunden sein, die auf diesem Sektor der Klimaforschung für die Wasserwirtschaft einen deutlich verstärkten Mitteleinsatz in Zukunft rechtfertigen.

Durch die verbesserte Erfassung und Analyse der konvektiven Zellen durch Radarmessungen und der zu erwartenden fortschreitenden höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung der dynamischen Klimamodelle ist zu erwarten, dass in Zukunft auch für den Bereich der Siedlungswasserwirtschaft regionale Klimaszenarien erstellt werden können.



7 Literatur

- [1] Bartels H. (2004): Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland. KLIWA-Berichte, Heft 4, 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, S. 73 - 86.
- [2] Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- [3] Bronstert A., Bárdossy A., Bismuth C., Buiteveld H., Busch N., Disse M., Engel H., Fritsch U., Hunde-cha Y., Lammersen R., Niehoff D. und Ritter N. (2003): LAHoR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen an Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. – Berichte der Kommission des Rheins II-18
- [4] Bronstert A., Schwandt D. (2004): Darstellung, Vergleich und hydrologische sowie klimatologische Wertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland - Endbericht 1, Lehrstuhl für Hydrologie und Klimatologie Universität Potsdam, im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, unveröffentlicht.
- [5] Bronstert A., Schwandt D. (2005): Darstellung, Vergleich und hydrologische sowie klimatologische Wertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland - Endbericht 2, Lehrstuhl für Hydrologie und Klimatologie Universität Potsdam, im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, unveröffentlicht.
- [6] Cress A., Majewski D., Podzun R. (1995): Simulation of European climate with a limited area model : Observed boundary conditions, Contributions to atmospheric physics. - ISSN0005-8173. - 68, 2, S. 161 – 178.
- [7] DWD (2005): KOSTRA-DWD-2000 „Starkniederschlagshöhen für Deutschland, Fortschreibungsbericht und Grundlagenbericht“, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes (GF Hydrometeorologie), Offenbach
- [8] Enke W., Spekat A. (1997): Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression. Climate Research, Vol. 8, 195-207.
- [9] Enke W. (2003): Abschlussbericht – Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM 4 Klimasimulationslaufs (Szenario B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. Meteo-Research, Berlin, im Auftrag des Arbeitskreis KLIWA, unveröffentlicht.
- [10] Gerlinger K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien, KLIWA-Berichte, Heft 4, 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, S. 87 -102.
- [11] Gerstengarbe F.W., Werner P.C., Österle H., Zenker T. (PIK) (2002): Abschlussbericht zum Werkvertrag B-Mr-10029524/43, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, im Auftrag des Arbeitskreis KLIWA, unveröffentlicht.
- [12] Giorgi F., Hewitson B. et al. (2001): Regional Climate Information - Evaluation and Projections. Chapter 10, Climate Change - Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). World Meteorological Organization / United Nations Environment Programme. Cambridge University Press.
- [13] Günther Th. (2004): Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen. KLIWA-Berichte, Heft 4, 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, S.170 - 189.
- [14] Günther T., Rachner, M., Matthäus, H., Albrecht, F.M., Ertel, H. (2000): Regionalisierte Extremwerte des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze für Deutschland (REWANUS), Deutscher Wetterdienst, Berlin.



- [15] Haag, I.; Gerlinger, K.; Kolokotronis, V.: (2005): Auswirkungen von Windwurfschäden auf Hochwasserabflüsse am Beispiel des Enz-Nagold-Gebiets, Wasserwirtschaft, Heft 10/2005, S. 8-14
- [16] Ihringer J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasser-Statistik. KLIWA-Berichte, Heft 4, 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, S. 153 - 167.
- [17] IPCC (2001): Climate Change – The Scientific Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 944 S.
- [18] Jacob D., Podzun R. (1997): Sensitivity Studies with the Regional Climate Model REMO, Meteorol. Atmos. Phys, 63, 119-129.
- [19] Jacob D., Bülow K. (2002): Zwischenbericht – Dynamische und statistische Erstellung von hochaufgelösten Klimaszenarien (1/6°) als Basis für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen im KLIWA-Projekt B 1.1.1 Klimaszenarien, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, im Auftrag des Arbeitskreis KLIWA, unveröffentlicht.
- [20] Jacob D., Bülow K., Milliez M. (2003): Dynamische und statistische Erstellung von hochaufgelösten Klimaszenarien (1/6°) als Basis für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen im KLIWA-Projekt B 1.1.1 Klimaszenarien, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, im Auftrag des Arbeitskreis KLIWA - KLIWA-Abschlussbericht Mai 2003.
- [21] Kleeberg et al. (1999): ASGi – Band 1 Theoretische Grundlagen. Unpublizierte Modellbeschreibung.
- [22] KLIWA (2005a): Auswertung und Vergleich der regionalen Klimaszenarien, Erläuterungsbericht
- [23] KLIWA (2005b): Langzeitverhalten der Gebietsniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte, Heft 7, Bearbeiter: T. Reich, 156 S.
- [24] Krahe P., Eberle M., Richter K.-G., Wilke K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts für das Rheingebiet. KLIWA-Berichte, Heft 4, 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, S.121-134.
- [25] LfU (2005): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. Leitfaden Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie Nr. 92, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- [26] Majewski D. (1991): The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models, Vol.2, 147-191.
- [27] Räisänen J., Hansson U., Ullerstig A., Döscher R., Graham L.P., Jones C., Meier M., Samuelsson P., Willén U. (2004): European climate in the late 21st century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. - Clim. Dynamics, Vol 22, No 1, 13-31.
- [28] Rechid D., Jacob D. (2004): Influence of monthly varying vegetation on the simulated climate in Europe. Meteorologische Zeitschrift; submitted.
- [29] Roeckner E.K., Bengtsson L., Christof M., Claussen M., Dümenil L., Esch M., Giogretta M., Schlese U., Schulzweida U. (1996): The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report 218.
- [30] Roeckner E., Bengtsson L., Feichter J., Lelieveld J., Rodhe H. (1999): Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. Journal of Climate, Vol. 12, No. 10, 3004-3032.
- [31] Schär Ch., Frei Ch., Vidale P.-L., Kleinn J., Gurtz J. (2000): Grenzen und Möglichkeiten der globalen und regionalen Klimamodellierung für die Quantifizierung des Wasserhaushalts, Studie für KLIWA, Klimaforschung ETH Zürich, www.kliwa.de, unveröffentlicht.
- [32] Schär Ch., Frei Ch., Fukutome S., Lüthi D., Kleinn J., Seneviratne S., Vidale P.L. (2001): Regionale Klimamodelle – Möglichkeiten und Grenzen. KLIWA-Berichte, Heft 1, S. 92-103.

-
- [33] Semmler T., Jacob D., Schlünzen K.H., Podzun, R. (2004): Influence of sea ice treatment in a regional climate model on boundary layer values in the Fram Strait region. *Monthly Weather Review*, 132, 985-999.
 - [34] StMUGV (2004): Berücksichtigung von möglichen Klimaänderungen – Interner Erlass Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, unveröffentlicht.
 - [35] Straub H. (2004): Langzeitverhalten von hydrologischen Größen, KLIWA-Berichte, Heft 4, 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, S. 57 - 72.
 - [36] Ulbrich U. (2004): Mögliche diagnostische Arbeiten zu Extremereignissen. – Planungstreffen für den deutschen Beitrag zum IPCC AR4, unveröffentlicht.
 - [37] Wald J. (2004): Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Planungen – Praxisbeispiele, KLIWA-Berichte, Heft 4, 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, S. 169 - 185.



8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. Z-1:	Deutschland aus dem All (Bildquelle: Earth Observatory, NASA)	5
Abb. Z-2:	Künftig mehr Regen als Schnee?	6
Abb. Z-3:	Niedrigwasser im Sommer	7
Abb. Z-4:	Hochwasser im Februar 1990 an der Donau bei Riedlingen	8
Abb. 1-1:	Globales System Erde (Bildquelle: Earth Observatory, NASA)	9
Abb. 1-2:	Simulation der Lufttemperatur mit globalen Klimamodellen (Bildquelle: Earth Observatory, NASA)	10
Abb. 1-3:	Darstellung des Downscaling aus einem GCM zu einem RCM	11
Abb. 1-4:	Tiefdruckgebiete über Europa im Winter (Bildquelle: Earth Observatory, NASA)	12
Abb. 1-5:	Wetterlage „Westlage zyklonal“ (Bildquelle: Prof. Dr. H. J. Caspary)	12
Abb. 2-1:	Globale Temperaturveränderungen von 1880 bis 2002 (Bildquelle: Earth Observatory, NASA)	13
Abb. 2-2:	Änderung der mittleren globalen Lufttemperatur (bezogen auf den Wert von 1990) nach den Emissionsszenarien des IPCC	14
Abb. 2-3:	Vereinfachte schematische Darstellung des PIK-Modells	16
Abb. 2-4:	Vereinfachte schematische Darstellung des MR-Modells	17
Abb. 2-5:	Vereinfachte schematische Darstellung des MPI-Modells (REMO)	18
Abb. 3-1:	33 Untersuchungsgebiete und neun aggregierte KLIWA-Regionen in Süddeutschland (Baden-Württemberg und Bayern, insgesamt ca. 106.000 km ²)	20
Abb. 3-2:	Verteilung der 54 Klimastationen in den KLIWA-Regionen	22
Abb. 3-3:	PIK-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen Lufttemperatur	24
Abb. 3-4:	PIK-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niederschlagshöhen	25
Abb. 3-5:	Verteilung der Niederschlagsstationen in den KLIWA-Regionen	28



Abb. 3-6:	MR-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen Lufttemperaturen	30
Abb. 3-7:	MR-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niederschlagshöhen	31
Abb. 3-8:	REMO-Modellraster und KLIWA-Regionen	34
Abb. 3-9:	MPI-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen Lufttemperatur	37
Abb. 3-10:	MPI-Modell: Regionenspezifische Auswertung der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niederschlagshöhen	38
Abb. 3-11:	Absolute Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen Lufttemperaturen zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)	43
Abb. 3-12:	Absolute Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niederschlagshöhen zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)	44
Abb. 3-13:	Relative Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niederschlagshöhen zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)	45
Abb. 3-14:	Absolute Veränderungen der mittleren halbjährlichen Lufttemperaturen (hydrologisches Sommerhalbjahr) zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)	46
Abb. 3-15:	Absolute Veränderungen der mittleren Lufttemperaturen im hydrologischen Winterhalbjahr zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR und MPI)	47
Abb. 3-16:	Absolute und relative Veränderungen der mittleren Niederschlagshöhen im hydrologischen Sommerhalbjahr zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR, MPI)	48
Abb. 3-17:	Absolute und relative Veränderungen der mittleren Niederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand für die neun KLIWA-Regionen (bei den Modellen PIK, MR, MPI)	49
Abb. 5-1:	Spannweiten der Lufttemperatur in der Ist-Zeit (1971-2000) und in der Zukunft (2021-2050)	59
Abb. 5-2:	Spannweiten der Niederschlagssumme in der Ist-Zeit (1971-2000) und in der Zukunft (2021-2050)	60
Abb. 5-3:	Jahresmittel der Lufttemperatur für das Zukunftsszenario	62



Abb. 5-4: Differenz Jahresmittel der Lufttemperatur zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	62
Abb. 5-5: Mittelwert der Lufttemperatur im Winter für das Zukunftsszenario	63
Abb. 5-6: Mittelwert der Lufttemperatur im Sommer für das Zukunftsszenario	63
Abb. 5-7: Differenz Mittelwert der Lufttemperatur im Sommer zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	64
Abb. 5-8: Differenz Mittelwert der Lufttemperatur im Winter zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	64
Abb. 5-9: Anzahl der bisherigen und künftigen Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Baden-Württemberg (oben) und Bayern (unten)	65
Abb. 5-10: Anzahl der bisherigen und künftigen heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Bayern (oben) und Baden-Württemberg (unten)	66
Abb. 5-11: Häufigkeit der Tagesmaxima der Lufttemperatur an der Klimastation Karlsruhe – Vergleich zwischen Ist-Zustand und Zukunftsszenario	67
Abb. 5-12: Anzahl der bisherigen und künftigen Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Bayern (oben) und Baden-Württemberg (unten)	68
Abb. 5-13: Anzahl der bisherigen und künftigen Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Bayern (oben) und Baden-Württemberg (unten)	69
Abb. 5-14: Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 25\text{mm}$, Station Freudenstadt	70
Abb. 5-15: Mittelwert der Niederschläge im Sommer für das Zukunftsszenario	71
Abb. 5-16: Mittelwert der Niederschläge im Winter für das Zukunftsszenario	71
Abb. 5-17: Relative Änderung der Mittelwerte der Niederschläge im Sommer zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	72
Abb. 5-18: Relative Änderung der Mittelwerte der Niederschläge im Winter zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	72
Abb. 5-19: Veränderung der mittleren Anzahl von Trockentagen im Sommerhalbjahr	73
Abb. 5-20: Mittlere Dauer der extremen Trockenperioden im Sommer- und Winterhalbjahr	74
Abb. 5-21: Veränderung der mittleren Anzahl von Tagen mit $N \geq 25\text{ mm}$ im Winterhalbjahr	75
Abb. 5-22: Mittlere Dauer der extremen Nassperioden im Sommer- und Winterhalbjahr	76
Abb. 5-23: Durchschnittlich letzter Spätfrost bzw. erster Frühfrost im Jahr	76



Abb. 5-24: Ende der Schneeschmelze	77
Abb. 5-25: Lage der exemplarisch ausgewählten Pegel und deren Einzugsgebiete innerhalb der 9 KLIWA-Regionen	79
Abb. 5-26: Monatliche mittlere Niedrigwasserabflüsse (MoMnQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (Wasserhaushaltsmodell LARSIM)	81
Abb. 5-27: Monatliche mittlere Niedrigwasserabflüsse (MoMnQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für zwei Pegel in Bayern (Wasserhaushaltsmodell ASGi)	81
Abb. 5-28: Monatliche mittlere Abflüsse (MoMQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (Wasserhaushaltsmodell LARSIM)	82
Abb. 5-29: Monatliche mittlere Abflüsse (MoMQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für zwei Pegel in Bayern (Wasserhaushaltsmodell ASGi)	83
Abb. 5-30: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (Wasserhaushaltsmodell LARSIM)	84
Abb. 5-31: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für zwei Pegel in Bayern (Wasserhaushaltsmodell ASGi)	85
Abb. 5-32: Regional einheitliche Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$ in Baden-Württemberg	87
Abb. 6-1: Lokaler Hochwasserschutz	90



8.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	PIK-Modell: Absolute Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und homogenisierten Messdaten 1971-2000	26
Tab. 3-2:	PIK-Modell: Relative Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und homogenisierten Messdaten 1971-2000	27
Tab. 3-3:	MR-Modell: Absolute Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands 1971-2000	32
Tab. 3-4:	MR-Modell: Relative Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands 1971-2000	33
Tab. 3-5:	MPI-Modell: Absolute Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands (Kontrolllauf) 1970-1999	39
Tab. 3-6:	MPI-Modell: Relative Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation des Ist-Zustands (Kontrolllauf) 1970-1999	40
Tab. 3-7:	Veränderung von Lufttemperatur und Niederschlag zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand	42
Tab. 5-1:	Monatliche mittlere Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ): Relative Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	80
Tab. 5-2:	Monatliche mittlere Abflüsse (MoMQ): Relative Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	82
Tab. 5-3:	Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ): Relative Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand	84
Tab. 5-4:	Regionale Klimaänderungsfaktoren für unterschiedliche Jährlichkeiten T in Baden-Württemberg	87

Bisher erschienene KLIWA-Berichte:

Herausgeber: Arbeitskreis KLIWA
(Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg,
Bayerisches Landesamt für Umwelt, 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.
- Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 2.1.3: "Analyse zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse."
98 S., ISBN 3-88251-284-9.
- Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 2.1.2: "Analyse zum Langzeitverhalten der jährlichen und mittleren Abflüsse."
93 S., ISBN 3-88251-286-5.
- Heft 4: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
Fachvorträge beim 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg.
250 S., ISBN 3-937911-16-2.
- Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.2.3: "Analyse zum Langzeitverhalten von Gebietsmittelwerten der Lufttemperatur."
76 S., ISBN 3-937911-17-0.
- Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.1.4: "Flächendeckende Analyse des Langzeitverhaltens verschiedener Schneedeckenparameter in Baden-Württemberg und Bayern."
76 S., ISBN 3-937911-18-9.
- Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.1.2: "Langzeituntersuchungen von Gebietswertreihen des Niederschlags"
160 S., ISBN 3-937911-19-7.
- Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.1.3: "Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse in Baden-Württemberg und Bayern"
96 S., ISBN 3-88148-412-4.
- Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.
KLIWA-Projekt B 1.1.1/1.1.4: "Entwicklung und Vergleich regionaler Klimaszenarien", KLIWA-Projekt B 2.4/2.5: "Simulation des Abflusskontinuums und des Hochwasserabflusses mit regionalen Klimaszenarien"
104 S., ISBN 3-88251-305-5.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>