

# Vergleichende Analyse Globaler Klimamodellsimulationen für Bayern (Süddeutschland) und umliegende Gebiete

Zusammenfassung



# klima





Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



# **Vergleichende Analyse Globaler Klimamodellsimulationen für Bayern (Süddeutschland) und umliegende Gebiete**

**Zusammenfassung**

## Impressum

Vergleichende Analyse Globaler Klimamodellsimulationen für Bayern (Süddeutschland) und umliegende Gebiete

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Tel.: 0821 9071-0  
Fax: 0821 9071-5556  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Referat 81: Maria Foltyn, Holger Komischke, Inga Schmidt  
Basierend auf:

Nils Feske, Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo-, Hydrowissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Pienner Straße 23, 01737 Tharandt  
Hannaleena Pöhler, Bernd Schultze, Jörg Scherzer, UDATA Umweltschutz und Datenanalyse, Hindenburgstraße 1, 67433 Neustadt

### Redaktion:

LfU, Referat 81, Jane Korck, Harald Morscheid, Johann Weber

### Bildnachweis:

Abb. 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23, 24, 25 Bayerisches Landesamt für Umwelt

Abb. 3, 5, 11, 12, 17, 19 Bayerisches Landesamt für Umwelt basierend auf Pöhler et al. (s.u.)

Abb. 1 Nils Feske, Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo-, Hydrowissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Pienner Straße 23, 01737 Tharandt

Abb. 21, 22 Hannaleena Pöhler, Bernd Schultze, Jörg Scherzer, UDATA Umweltschutz und Datenanalyse, Hindenburgstraße 1, 67433 Neustadt

### Stand:

Mai 2014

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
1.1	Zielstellung	5
<b>2</b>	<b>Globale Klimaprojektionen – Auswahl und Vergleichsmethodik</b>	<b>7</b>
2.1	Globale Klimamodelle	7
2.2	Datengrundlage	9
2.3	Datenanalyse	10
2.3.1	Zeiträume der Auswertung	10
2.3.2	Jahresgänge und gemessene Bezugsreihen	10
2.3.3	Analyse von Klimaänderungssignalen	12
2.3.4	Begriffsdefinitionen	13
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>14</b>
3.1	Globale Klimaprojektionen mit SRES-Antrieb	14
3.1.1	Mittlere Jahresgänge im 19./20. Jahrhundert	14
3.1.2	Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert	17
3.1.2.1	Verläufe der modellierten Zeitreihen 1871 – 2100	17
3.1.2.2	Klimaänderungssignale in den KLIWA-Zeiträumen	19
3.2	Globale Klimaprojektionen mit RCP-Antrieb	23
3.2.1	Mittlere Jahresgänge im 19./20. Jahrhundert	23
3.2.2	Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert	25
3.2.2.1	Verläufe der modellierten Zeitreihen 1871-2100	25
3.2.2.2	Klimaänderungssignale in den KLIWA-Zeiträumen	27
3.3	Vergleich der Modellergebnisse mit SRES- und RCP-Antrieben	31
3.3.1	Mittlere Jahresgänge im 19./20. Jahrhundert	31
3.3.2	Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert	32
3.3.3	Korrelationsanalyse Temperatur- und Niederschlagstrend	34
3.4	Einordnung der Simulationen von ECHAM5/MPI-ESM-LR	37
3.4.1	Ausgangsniveau und Verläufe der modellierten Zeitreihen 1871-2100	37
3.4.2	Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert	39

<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>41</b>
4.1	Unsicherheiten der Klimamodellierung	41
4.2	Veränderungen bis Ende des 21. Jahrhunderts	42
4.3	Auswahl von Globalen Klimamodellen für die weitere Nutzung	44
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>61</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Zielstellung

Der zu beobachtende globale Klimawandel stellt weltweit eine große Herausforderung für Gesellschaft, Politik und Wirtschaft dar. Um die potenziell eintretenden Veränderungen und ihre Auswirkungen beurteilen zu können, ist die Kenntnis künftig möglicher Klimate notwendig. Deren Ableitung bis auf die regionale Ebene geschieht mit Hilfe von Modellketten (Abb. 1): Am Anfang stehen unterschiedliche Treibhausgas-Emissionsszenarien [17] bzw. repräsentative Konzentrationsentwicklungen („representative concentration pathways“, RCP-Szenarien, vgl. [23]), welche die Globalen Klimamodelle (GCMs) antreiben. Als zweites Glied der Kette kommt diesen eine zentrale Bedeutung zu, bilden ihre Ergebnisse doch die Randbedingungen für die Regionalen Klimamodelle (RCMs) und damit für Aussagen auf kleinräumiger Skala. Die Realitätsnähe der Regionalen Klimamodelle ist damit entscheidend von der Güte der jeweiligen Globalen Klimamodelle abhängig [11]. Neben den Modellen, welche die Grundlage für den 4. AR des IPCC [7] bildeten, stehen seit Anfang 2012 auch die Ergebnisse neuer Globalmodelle zur Verfügung. Auf deren Grundlage beruht der 5. AR, dessen erster Teilbericht seit 26. September 2013 veröffentlicht ist.

Zwar werden für Deutschland verschiedene Globale Klimamodelle als Input für Regionale Klimaprojektionen verwendet, doch basieren die für Deutschland verfügbaren Regionalen Klimaprojektionen derzeit zumeist auf den Antriebsdaten des Globalmodells ECHAM5 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie. Somit sind die darauf aufbauenden regionalen Modellergebnisse durch die Eigenheiten von ECHAM5 geprägt. Eine Ensemblebetrachtung in Bezug auf weitere Globale Klimamodelle kann daher bei der Einordnung bzw. Unsicherheitsabschätzung der durch ECHAM5 projizierten klimatischen Entwicklungen Hilfestellungen bieten. Weiterhin kann die potentielle Bandbreite regionaler klimatischer Entwicklungen umfassender beurteilt werden, wenn die Bereitstellung der notwendigen Randbedingungen zum Antrieb der Regionalmodelle durch verschiedene Globalmodelle berücksichtigt wird.

Diese Untersuchung analysiert die Größen Temperatur und Niederschlag. Zwar werden diese nicht direkt als Randbedingungen vom Globalmodell in das Regionalmodell übergeben, sind aber dennoch ein guter Indikator für mögliche Stärken oder Schwächen von Ergebnissen innerhalb der Modellkette.

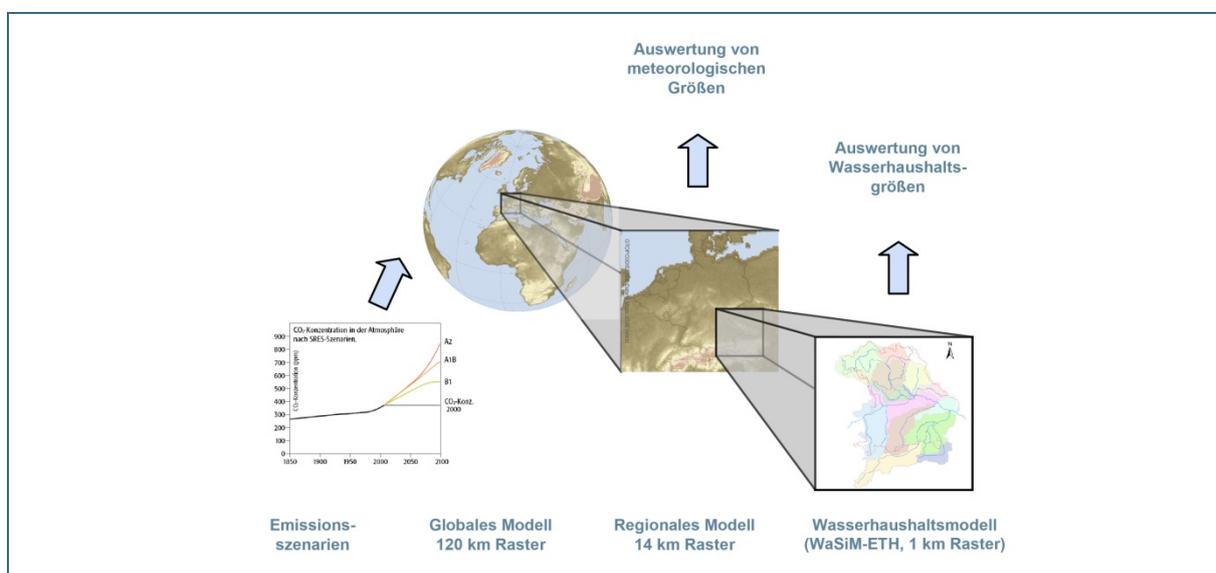


Abb. 1: Schematische Darstellung der Modellkette zur Erstellung regionaler Wasserhaushaltsprojektionen

Das Kooperationsvorhaben KLIWA (<http://www.kliwa.de>) hat das Ziel, für dieses Jahrhundert die Klimaänderung und damit verbundene Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in Süddeutschland zu untersuchen. Als eine Grundlage für eine sachgerechte Beurteilung unterschiedlicher Modellketten hat das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) durch das Institut für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden [3] sowie das Büro UDATA ([19], [20]) drei aufeinander aufbauende vergleichende Analysen Globaler Klimamodellsimulationen für Bayern und umliegende Gebiete durchführen lassen. Im Rahmen dieser Auswertungen wurden wesentliche Ergebnisse Globaler Klimamodelle für das Gebiet des Freistaates Bayern bzw. für die Region Süddeutschland (6 – 15° östliche Länge, 47 – 52° nördliche Breite) beschafft, aufbereitet und analysiert (Abb. 2).

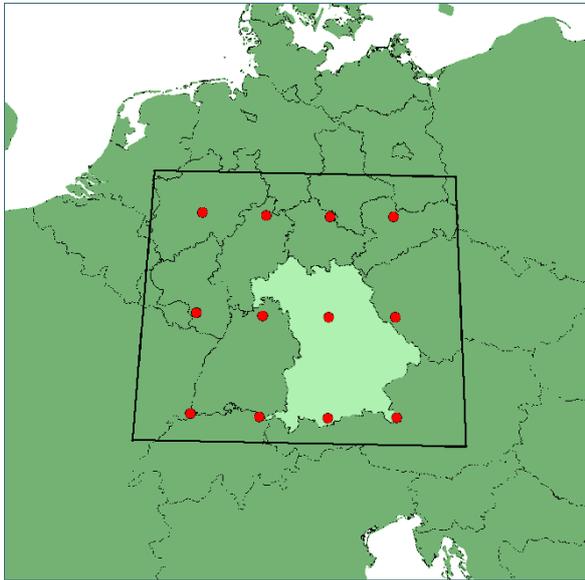


Abb. 2:  
Lage und Abgrenzung des  
Untersuchungsgebietes  
mit den verwendeten Gitter-  
punkten T63 von  
ECHAM5 (aus: [3])

Die gesamten Ergebnisse dieser Auswertungen sind in ausführlicher Form in den jeweiligen Abschlussberichten ([3], [19], [20]) nachzulesen. Aus diesen sind einzelne Textbausteine oder Abschnitte direkt, bzw. mit geringfügigen Änderungen in den vorliegenden Bericht übernommen. Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt.

## 2 Globale Klimaprojektionen – Auswahl und Vergleichsmethodik

### 2.1 Globale Klimamodelle

Aufgrund verschiedener thematischer und geographischer Schwerpunkte der weltweiten Klimaforschung existiert derzeit eine Vielzahl verschiedener Ansätze (vgl. [2]) zur Erstellung globaler Klimamodelle (*General Circulation Models* oder GCMs), die je nach Forschungsschwerpunkt eine Kombination der verschiedenen Klimamodell-Komponenten Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre und Biosphäre abbilden können. Diese GCMs werden fortwährend ergänzt und weiterentwickelt. So basiert der Großteil der genutzten Globalmodelle bisher auf potentiell möglichen Treibhausgas-Emissionsszenarien (SRES-Szenarien vgl. [5], [6], [7]): Bei der Szenariobildung sind mögliche zukünftige gesellschaftliche bzw. energiepolitische Entwicklungen und daraus abgeleitete Emissionsentwicklungen abgeschätzt und in Form von Modellgeschichten („storylines“) beschrieben. Der daraus berechnete zusätzliche Energiegehalt in der Atmosphäre („Strahlungsantrieb“) wird schließlich als Randbedingung für den Antrieb globaler Klimamodelle berücksichtigt (Abb. 3). Von den gängigen Szenarien A1B, A2, B1 und B2 führt das Emissionsszenario B1 zu dem geringsten Strahlungsantrieb, A2 zu dem höchsten. A1B und B2 ordnen sich dazwischen ein. Bei den bisherigen KLWA-Untersuchungen wurde das Hauptaugenmerk auf das Szenario A1B gelegt.

Für den neuen IPCC-Bericht (AR5, Veröffentlichung 2013/14 [8]) wurde ein neuer Satz von Antriebs-szenarien – RCP-Szenarien – entwickelt. Anders als die SRES-Szenarien geben diese direkt den Verlauf möglicher Strahlungsantriebe vor und vermeiden so die Unsicherheiten durch die Simulation sozioökonomischer Entwicklungen. RCP2.6 ist dabei das schwächste Szenario, gefolgt von dem eher moderaten RCP4.5, dem stärkeren RCP6.0 und dem stärksten Szenario RCP8.5.

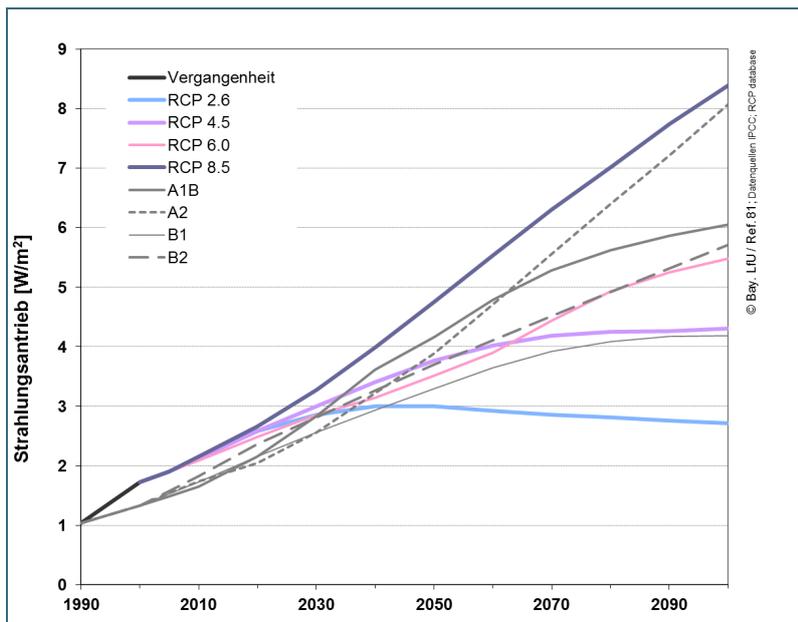


Abb. 3:  
Weltweiter anthropogen verursachter Strahlungsantrieb in SRES- und RCP-Szenarien

Die hier zusammengefassten, durchgeführten Analysen für den süddeutschen Raum verfolgten drei Ziele:

- 1) Den Wertebereich ausgewählter GCMs bei der Wiedergabe der Vergangenheit zu quantifizieren,
- 2) mögliche zukünftige Entwicklungen in ihrer Bandbreite aufzuzeigen sowie
- 3) Anhaltspunkte für die Auswahl einzelner GCM in weiterführenden Modellketten zu erhalten.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden Ergebnisse 14 unterschiedlicher GCMs mit verschiedenen Antriebsszenarien untersucht. Während die Daten der Modelle mit dem Antrieb durch SRES-Szenarien im Rahmen des IPCC AR4-Report (2007) [7] bzw. durch das EG-Forschungsprojekt ENSEMBLES aufbereitet und zur Verfügung gestellt wurden, gehen die Daten der Modelle mit RCP-Szenarien auf das CMIP5-Projekt zurück. Zur Unterscheidung der beiden Modellgenerationen werden daher im Folgenden die Bezeichnungen „ENSEMBLES-Modelle“, bzw. „CMIP5-Modelle“ verwendet.

Für den Antrieb der GCMs in der Vergangenheit stehen Simulationen auf Grundlage von gemessenen Treibhausgaskonzentrationen zur Verfügung. Je nach Datenursprung werden diese sogenannten „historischen“ Antriebsszenarien als „20C3M“ (ENSEMBLES-Projekt) bzw. „RCP historical“ (CMIP5-Projekt) bezeichnet. Aufgrund kleiner Unterschiede in der Erstellung und Anwendung sind diese Antriebe zwar nicht völlig identisch [18], aber generell sehr ähnlich. Demnach beruhen die Unterschiede in den nachfolgenden Globalmodellläufen allein auf Unterschieden der Modelle.

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Globalen Klimamodelle, farbig hinterlegt: Modellläufe mit RCP-Szenarien, \* = mehrere Vergangenheits-Läufe

Modell	ausführliche Bezeichnung	Land	Antriebsszenarien
BCM2.0	Bergen Climate Model	Norwegen	20C3M, A1B, A2, B1
CCSM3	Community Climate System Model	USA	20C3M, A1B, A2, B1
CGCM3.1-T47_(med-res)	Coupled Global Climate Model (Medium Resolution)	Kanada	20C3M, A1B
CNRM_CM3.3 (Lauf 1)	Centre National de Recherches Météorologiques Climate Model (version 3.3)	Frankreich	20C3M, A1B
CNRM-CM5 (Lauf 1)	Centre National de Recherches Météorologiques Climate Model (version 5)		RCP historical, RCP4.5, RCP8.5
CSIRO-Mk3.0	Mark 3 Coupled Climate Model	Australien	20C3M, A1B, A2, B1
ECHAM4	European Centre Hamburg Model 4	Deutschland	A2, B2
ECHAM5/MPI-OM* (Lauf 1, 2, 3)	European Centre Hamburg Model 5		20C3M, A1B, A2, B1
MPI-ESM-LR* („ECHAM6“) (Lauf 1, 2, 3)	Max Planck Institute – Earth System Model – Low Resolution		RCP historical, RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model 3	Großbritannien	20C3M, A1B, A2, B1
HadCM3C (Lauf 1, 2)	Hadley Centre Coupled Model 3 with Carbon Cycle Component		20C3M, A1B
HadGEM	Hadley Centre Global Environmental Model (version 1)		20C3M, A1B, A2
HadGEM2 (Lauf 1, 2, 3)	Hadley Centre Global Environmental Model (version 2 / AO)		20C3M, A1B
HadGEM2-ES (Lauf 1)	Hadley Centre Global Environmental Model (version 2 / AO) – Earth System		RCP historical, RCP4.5, RCP8.5
IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace Climate Model (Version4)	Frankreich	20C3M, A1B, A2, B1

Die hier untersuchten Zukunftsprojektionen basieren auf drei SRES-Emissionsszenarien sowie drei RCP-Szenarien. Deren Betrachtung erfolgt in zwei getrennten Kapiteln. Die einzelnen Modelle mit den jeweils verwendeten Antriebsszenarien sind in Tab. 1 aufgelistet. Im Anhang befindet sich hierzu noch eine ausführlichere Tabelle mit weiteren Informationen zu den Globalmodellläufen (Tab. A. 1). Ein Hinweis zur Modellbenennung: Der Nachfolger von ECHAM5 wird nicht als „ECHAM6“ sondern als MPI-ESM-LR bezeichnet, da ECHAM6 nur das Atmosphären-Modul des Earth System Modells MPI-ESM-LR darstellt.

Für einige Globalmodelle wurden mit den vorhandenen Antriebsszenarien jeweils bis zu drei unterschiedliche Modellläufe berechnet. Diese entstehen dadurch, dass die Berechnung durch das Globalmodell mit äußerst geringfügig veränderten Eingangsvariablen gestartet wird. Die so gebildeten Läufe stellen gegenüber den Läufen aus anderen GCMs ebenfalls gleichberechtigte Realisationen der zukünftigen Klimaentwicklung dar. Insgesamt waren damit 21 einzelne Modellläufe verfügbar. In der hiesigen Betrachtung sind die Ergebnisse mehrerer Läufe eines Modells allerdings zusammengefasst. Somit werden im Folgenden 16 Modellläufe (11 mit SRES-Szenarien, 5 mit RCP-Szenarien) näher beleuchtet. Die Ergebnisse einzelner Läufe weiterer Globalmodelle finden sich in den Tabellen im Anhang.

## 2.2 Datengrundlage

Die verwendeten Daten der Globalmodellläufe stammen aus der CERA-Datenbank (<http://cera-www.dkrz.de/>) des World Data Center for Climate Hamburg. Sie beruhen mehrheitlich auf Simulationen im Zusammenhang mit dem AR4 des IPCC [7]. Zusätzlich werden dort einige Datensätze, die Eingang in den AR5 [8] gefunden haben, zur Verfügung gestellt. Für die Analyse heruntergeladen wurden die Klimagrößen Temperatur und Niederschlag, welche für die Kontroll-Klimate bzw. die Zukunftsszenarien bereits in aggregierter, monatlicher Auflösung vorliegen.

Die Datensätze weisen modellabhängig verschiedene räumliche Auflösungen auf. Die Anzahl der Gitterpunkte im Untersuchungsgebiet variiert zwischen 2 und 20 Gitterpunkten. Wird aus allen im Untersuchungsgebiet befindlichen Gitterpunkten ein Mittelwert für weiterführende Auswertungen gebildet, so ist es möglich, dass die Lage und Ausdehnung der betrachteten Region in Abhängigkeit der Modellauflösung voneinander abweichen. Für einen konsistenten Modellvergleich erschien es jedoch zwingend, stets das räumlich identische Untersuchungsgebiet zu betrachten [1]. Aus diesem Grund werden die Datensätze zunächst durch ein rechnerisches Verfahren auf ein einheitliches Gitter interpoliert („bilinear remapping“, vgl. [9]). Dabei wird das T63-Gitter von ECHAM5 als Zielraster für die Interpolation verwendet, so dass alle Modell-Datensätze für 12 (4x3) identische Gitterpunkte bzw. für ein Untersuchungsgebiet einheitlicher Ausdehnung und Auflösung vorliegen (Abb. 2). Aus den einzelnen Gitterpunkten kann anschließend je ein Mittelwert einer Klimaprojektion für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet werden.

Weiterhin wurden die Maßeinheiten der bereitgestellten Datensätze der Modelle in gängige meteorologische Größen umgerechnet, zum Beispiel von Kelvin in °C. Zeitreihen wurden jeweils für jeden Monat, die meteorologischen Jahreszeiten (Frühling, Sommer, Herbst, Winter), das meteorologische Gesamtjahr sowie hydrologische Halbjahre (Winterhalbjahr: November bis April, Sommerhalbjahr: Mai bis Oktober) gebildet (Tab. 2).

Alle Daten sind auf Plausibilität und Vollständigkeit geprüft. Im Falle von unvollständigen Datensätzen konnten folglich keine Jahreswerte berechnet werden.

Tab. 2: Zeitliche Aggregierungsstufen der Modelldaten

Aggregierungsstufe	Monate	Temperatur	Niederschlag
Monat	Januar, Februar, März, April, Mai, Juni, Juli, August, September, Oktober, November, Dezember	Mittelwert	Summe
Winter	Dezember, Januar, Februar	Mittelwert	Summe
Frühjahr	März, April, Mai	Mittelwert	Summe
Sommer	Juni, Juli, August	Mittelwert	Summe
Herbst	September, Oktober, November	Mittelwert	Summe
Jahr	Januar bis Dezember	Mittelwert	Summe
hydrologisches Sommerhalbjahr	Mai bis Oktober	Mittelwert	Summe
hydrologisches Winterhalbjahr	November bis April	Mittelwert	Summe

## 2.3 Datenanalyse

### 2.3.1 Zeiträume der Auswertung

Grundlage der Datenanalyse bildete die statistische Beschreibung der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag der verschiedenen Projektionen jedes einzelnen Modells. Diese gliedert sich in die Ergebnisse für die Modellläufe der Zeiträume 19/20C (1871-2000 bzw. 1870-1999) und 21C (2001-2100 bzw. 2000-2099, Tab. 3). Beginn und Ende des jeweiligen Zeitraums hängen von der Datenverfügbarkeit für das jeweils ausgewertete Globalmodell ab. Aufbauend auf den gebildeten Statistiken wurde für jedes Modell je ein mittlerer Jahresgang der jeweiligen Untersuchungsperioden abgeleitet. Die 19/20C-Läufe dienen der Plausibilitätsbetrachtung, die 21C-Läufe der Analyse der denkbaren zukünftigen Entwicklungen. Innerhalb von KLIWA werden konsistent 30-Jahres-Zeiträume gegenübergestellt. Als Referenz zu den Zeiträumen für die nahe und die ferne Zukunft (KLIWA I + II) wurde daher der Zeitraum 1971-2000 (20C) als ein Ausschnitt aus 19/20C festgelegt. Da einige GCMs den bereits stattgefundenen Klimawandel gegen Ende des 20. Jh. einbeziehen, andere aber nicht, erscheint der lange Zeitraum 19/20C für einen Vergleich zwischen den Modellen stabiler als der Zeitraum 20C.

Bezeichnung	Zeitraum
Referenz (20C)	1971-2000
19/20C	1871-2000 bzw. 1870-1999
21C	2001-2100 bzw. 2000-2099
KLIWA I (Nahe Zukunft)	2021-2050
KLIWA II (Ferne Zukunft)	2071-2100

Tab. 3: Zeiträume für unterschiedliche statistische Auswertungen; „20C“ = „20<sup>th</sup> Century“

### 2.3.2 Jahresgänge und gemessene Bezugsreihen

Durch die Gegenüberstellung der Jahresgänge der Vergangenheit (Zeitraum 19/20C) wird beurteilt, in welchem Umfang sich die Ergebnisse verschiedener Modelle bzw. Modellläufe ähneln, bzw. welche Spannweiten der Klimatelemente im Jahresverlauf simuliert werden. Die Jahresgänge der einzelnen Modelle basieren dabei auf den sehr ähnlichen Datensätzen „20C3M“ (Modelle des ENSEMBLES-Projekts/ IPCC4) bzw. „RCP historical“ (Modelle des CMIP5-Projekts). Diese beiden Datensätze stellen kein Emissionsszenario im eigentlichen Sinne dar, sondern wurden aus gemessenen Treibhausgaskonzentrationen gebildet. Die Bandbreite der Jahresgänge geht daher allein auf die Konfiguration

sowie Anfangs- und Randbedingungen der einfließenden Modelle zurück. Eine Beurteilung der Modelle unabhängig von Emissionsszenarien ist also möglich.

Die Bezugsreihen für Temperatur und Niederschlag entstammen den klimatischen Mittelwerten aus dem europäischen Datensatz ENSEMBLE\_obs (1971-2000, „E<sub>obs</sub>“). Dieser wurde im Zuge des Projektes „ENSEMBLES“ aus Messdaten erstellt, beständig weiterentwickelt und steht auf der Seite des niederländischen Wetterdienstes zur Verfügung [13]. Der E<sub>obs</sub>-Datensatz ist für Bayern und das übrige Süddeutschland hinsichtlich der Temperatur plausibel. Es ist allerdings zu beachten, dass sich diese Bezugsreihe E<sub>obs</sub> auf den Zeitraum 1971-2000 (20C) bezieht und sich das Klima hier gegenüber dem Zeitraum 1871-2000 bereits verändert hat (erhöhte Mitteltemperatur). Auch gründen die Niederschlagsangaben auf unkorrigierten Messdaten und können daher gegebenenfalls niedriger liegen als die Niederschläge der Klimamodelle, welche keinen Messfehler aufweisen.

Es soll daher an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass der Referenzdatensatz hier als ein einheitliches Bezugsniveau für die vergleichende Beurteilung der Modellergebnisse herangezogen wurde und nicht im Sinne einer abschließenden Beurteilung der Modellgüte (also eines Vergleichs der Modellergebnisse mit den Beobachtungsdaten) verstanden werden sollte. Dies ist zum einen damit zu begründen, dass die Zielstellung Globaler Klimamodelle nicht zwangsläufig eine Beschreibung der klimatischen Verhältnisse in bestimmten Regionen ist, sondern andere, am globalen Maßstab orientierte, Zielstellungen verfolgen kann. Weiterhin muss festgehalten werden, dass die Simulationen von Globalmodellen auch nicht darauf ausgelegt sein müssen, die zeitliche Entwicklung klimatischer Größen bestmöglich an gegebene regionale Beobachtungsdaten anzupassen, sondern auf Aussagen über langfristige Entwicklungen abzielen können. Dementsprechend kann die klimatische Variabilität der Modelle auch einen zeitlich von Beobachtungsdaten abweichenden Verlauf aufweisen.

Zusätzlich ist zu beachten, dass die hier betrachteten Kenngrößen Temperatur und Niederschlag nicht die Größen sind, welche in der anfangs beschriebenen Modellkette als Randbedingung an die Regionalen Klimamodelle weitergegeben werden. Dies sind bestimmte meteorologische Felder in verschiedenen Höhenlagen, welche durch das regionale Klimamodell in der Modellregion weiter verfeinert werden. Diese Felder sind aber sehr viel komplexer und schwieriger auszuwerten, als es in dieser vergleichenden Analyse möglich wäre. Für die in Kapitel 2.1 genannten Fragestellungen ist zudem die Betrachtung von Temperatur und Niederschlag ausreichend.

Untersuchungen haben zudem ergeben, dass der Einfluss des GCMs innerhalb der Modellkette auf das regionale Klimamodelle zwar gegeben ist, das jeweilige Regionale Klimamodell allerdings zusätzlich einen eigenständigen Einfluss auf die Modellgüte nehmen kann. Deutlich belegen dies beispielsweise die unterschiedlichen Ergebnisse von verschiedenen Regionalen Klimamodellen für Bayern, angetrieben mit ECHAM5 [15]. Gemäß [4] zeigte sich bei Untersuchungen mit REMO und CLM, dass die Übereinstimmung bzw. Kopplung mit dem GCM bei der Kenngröße Niederschlag jahreszeitlich unterschiedlich ist: Im Winter ist die Kopplung an das antreibende GCM stärker ausgeprägt als im Winter.

Dennoch erlaubt der Vergleich des Verlaufs mit E<sub>obs</sub> eine erste Einschätzung der GCMs auf ihre generelle Modellgüte oder ihre generellen Schwächen für die weitere Nutzung. So können im Vergleich wertvolle Hinweise gewonnen werden, worauf bei Regionalen Klimaprojektionen, die mit einem bestimmten GCM angetrieben werden, besonders zu achten ist. So zeigt die Betrachtung des mittleren monatlichen Regimes, ob es sich tendenziell eher um ein warmes oder ein kaltes bzw. trockenes oder nasses Globales Klimamodell handelt. Diese Abweichungen können sich unter Umständen in den angetriebenen Regionalen Klimamodellen wiederfinden, daher ist bei der Auswahl und Plausibilitätsprüfung der Regionalen Klimamodelle besonders darauf zu achten. Auch die Wiedergabe des generellen monatlichen Verlaufs der betrachteten Klimakenngröße kann Hinweise liefern, ob ein GCM für die weiteren Modellketten besser oder schlechter geeignet scheint. So ist zum Beispiel bei einem GCM, wel-

ches den monatlichen Verlauf des Niederschlags für Südbayern mit einem Maximum im Sommer nachbildet, als besser geeignet für die nachfolgende regionale Klimamodellierung zu bewerten, als ein GCM-Lauf, der keinerlei Jahresgang mit einem Maximum und Minimum aufzeigt. Im letzteren Fall muss das davon angetriebene Regionale Klimamodell sehr viel stärker die vorgegeben Randbedingungen verändern. Daher sind die Ergebnisse solch einer Modellkette kritisch vor einer weiteren Verwendung, zum Beispiel in der Wasserhaushaltsmodellierung, zu prüfen. Somit können mit diesem Vergleich die Ergebnisse darauf aufbauender Regionaler Klimamodelle insgesamt besser eingeordnet werden und wichtige Hinweise für nötige Prüfschritte und mögliche Unplausibilitäten vor einer weiteren Verwendung gewonnen werden.

Das Ensemble-Mittel aller GCM-Läufe, als weitere Bezugslinie in den durchgeführten Auswertungen, umfasst stets alle zum Zeitpunkt der Auswertung vorliegenden Projektionen. Es dient der allgemeinen Einschätzung, ob es sich im Vergleich zum Ensemble eher um ein höheres, mittleres oder niedrigeres Modell handelt.

### 2.3.3 Analyse von Klimaänderungssignalen

Zur Überprüfung ob und wie stark die Klimaelemente der Modellergebnisse in den Bezugszeiträumen einer Entwicklung unterliegen, wurde das Klimaänderungssignal auf drei unterschiedliche Weisen ermittelt:

1. Zunächst wurden 30-jährige gleitende Mittel gebildet. Grundlage dafür waren die jeweiligen Modelldaten von 1871-2100. Ziel dieser Glättung war die Herausarbeitung der langfristigen Variabilität des Klimas.
2. Als zweites Verfahren erfolgte eine lineare Trendanalyse mit absoluten bzw. relativen, linearen Trends in den 19/20C- und den 21C-Läufen für alle Simulationen (vgl. [21]). Der relative Trend entspricht dem auf den Mittelwert des Gesamtzeitraums bezogenen absoluten Trend. Die abgeleitete Trendstatistik beinhaltet Beginn, Ende, Länge und Mittelwert der betrachteten Datenreihe sowie die Schätzparameter der linearen Regressionsfunktion mit dem zugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Zur Beurteilung der Signifikanz der klimatischen Entwicklungen wurde die Trendstatistik nach MANN (1945) [16] und KENDALL (1970) [10] berechnet. Dies schließt eine Aussage über die Trendrichtung (positiv, negativ), den Mann-Kendall-Trendwert  $Q$ , die zugehörige Irrtumswahrscheinlichkeit sowie die entsprechende Bewertung der Signifikanz analog nach [11] ein. Die berechneten Änderungsraten beziehen sich dabei immer auf den gesamten Zeitraum, also in 19/20C auf 130 Jahre, in 21C auf 100 Jahre. Die Ergebnisse der Trendanalysen sind in diesem zusammenfassenden Bericht auszugsweise enthalten.
3. Vorrangig werden die Resultate der Klimaänderungssignale auf Grundlage des dritten Verfahrens vorgestellt, des Mittelwertvergleichs zwischen dem 20C-Zeitraum und den beiden KLIWA-Zukunftszeiträumen. Dieser Vergleich ermöglicht eine gezielte Betrachtung der Zeiträume, die im Vorhaben KLIWA in der auf den GCMs aufbauenden regionalen Klimamodellierung und anschließenden Wirkungsmodellierung besonders intensiv ausgewertet werden. Für die Temperatur wird dabei die absolute Mittelwertdifferenz betrachtet, für den Niederschlag die relativen Veränderungen (prozentual).

Die Analysen wurden für die vorliegenden Modellergebnisse jeweils für die Klimagrößen Temperatur und Niederschlag in den zuvor genannten Untersuchungszeiträumen, die SRES-Emissionsszenarien A1B, A2, B1 und gegebenenfalls B2, die RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5 sowie für die einzelnen Monate, Jahreszeiten und das Gesamtjahr durchgeführt. Die verwendeten Projektionen sowie die für diese verfügbaren Antriebsszenarien und Zeiträume für Trendanalysen und Mittelwertvergleiche sind in Tab. A. 1 im Anhang ersichtlich. Als Begleitinformation findet sich eine Zusammenstellung aller in den drei Berichten vorliegenden Analysen ebenso im Anhang (Tab. A. 2).

### 2.3.4 Begriffsdefinitionen

Innerhalb der Ensemblebetrachtungen werden die zwei Begriffe „Bandbreite“ und „Spannweite“ nahezu synonym als Abstand zwischen dem kleinstem und dem größtem Wert der einbezogenen Projektionen in einer bestimmten Zeitspanne verwendet. Die „Bandbreite“ gilt dabei für die absoluten Ergebnisse von Temperatur oder Niederschlag, während die „Spannweite“ für abgeleitete Größen, also Abweichungen vom Bezugsdatensatz oder Trends, Anwendung findet.

Bei der Untersuchung von Jahresgängen werden sowohl monatliche als auch jahreszeitliche Spannweiten der Modellergebnisse angegeben. Methodisch ergeben sich die jahreszeitlichen Spannweiten dabei als Mittelwert der monatlichen Spannweiten.

Als Interpretationshilfe von Niederschlagstrends wurde ein Vertrauensbereich von  $\pm 10\%$  Änderung festgelegt. Dieser berücksichtigt die natürliche Variabilität der Jahres- und Halbjahreswerte des Zeitraums 1971-2000 und dient als Hinweis auf die Signifikanz des Änderungssignals. Innerhalb dieses Bereiches gilt ein Trend nur als Tendenz, nicht als signifikante Änderung.

## 3 Ergebnisse

Im nachstehenden Abschnitt werden die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen betrachtet. Die Beschreibung geschieht zunächst getrennt nach den Auswertungen der ENSEMBLES/ IPCC4-Modelle [3], [19] und der CMIP5-Modelle [20]. Im Anschluss erfolgt ein Vergleich zwischen den beiden Modellgruppen.

Eine Statistik der einzelnen Modelle und weitere vergleichende Analysen befinden sich in ausführlicher Form in den Abschlussberichten von FESKE [3] und PÖHLER et al. [19], [20].

### 3.1 Globale Klimaprojektionen mit SRES-Antrieb

Die Mehrzahl der derzeit vorliegenden Projektionen des zukünftigen Klimas basiert auf Global-, bzw. nachfolgend Regionalmodellen, mit Antrieb durch SRES-Szenarien. Daher werden hier zunächst gesondert nur diese Modelle betrachtet. Diese entstammen dem ENSEMBLES-Projekt bzw. dem 4. IPCC-Bericht.

#### 3.1.1 Mittlere Jahrgänge im 19./20. Jahrhundert

Die mittleren Jahrgänge beleuchten das klimatische Ausgangsregime der Modelle im Zeitraum 19/20C und beruhen daher auf dem historischen Datensatz 20C3M (vgl. Kapitel 2.1). Im Folgenden dargestellt sind die Jahrgänge der Temperatur (Abb. 4) und des Niederschlags (Abb. 6) einschließlich der Ensemble-Bandbreite, des Bezugsdatensatzes ENSEMBLE\_obs und des Ensemble-Mittels als Orientierungshilfe.

Im Allgemeinen weisen die mittleren Jahrgänge der **Temperatur** die für die Nordhalbkugel typischen Maxima im Sommer bzw. Minima im Winter auf (Minimaltemperatur im Januar bzw. Februar, Maximaltemperatur im Juli). Allerdings bestehen Unterschiede hinsichtlich des Temperaturniveaus sowie der Amplituden der Jahrgänge. Die Amplitude der Temperaturen, als vereinfachtes Maß für die Kontinentalität, variiert modellabhängig zwischen 15,3 K (CCSM, maritim geprägtes Klima) und 22,4 K (HadCM3C, zunehmende Kontinentalität). Im Mittel über alle Modelle („Ensemble-Mittelwert“) ergibt sich eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 6,7 °C bei einer Bandbreite von 2,9 °C. Das kälteste Modell ist hierbei CGCM3.1-T47 mit im Mittel 4,8 °C Jahresmitteltemperatur; die wärmsten Modelle sind HadCM3C und HadGEM2 mit 7,7 °C. ECHAM5 bewegt sich mit 7,5 °C um den Ensemble-Mittelwert. Die mittlere Wintertemperatur beträgt -1,5 °C. Der Sommer weist im Ensemble-Mittel eine Durchschnittstemperatur von 15,9 °C auf.

Bei der monatlichen Betrachtung der Abweichungen vom Bezugsdatensatz  $E_{obs}$  (Abb. 5) wird deutlich, dass die Modelle in den Sommer- und Wintermonaten eine hohe Spannweite aufweisen, insbesondere im Juli und August. Dagegen fallen die Abweichungen in den Frühjahrs-, und besonders Herbstmonaten, geringer aus. Bestimmend für die hohe Streuung sind vor allem die Modelle CGCM3.1-T47 und CSIRO-Mk3 (kühl) sowie HadCM3C und CCSM (warm). ECHAM5 liegt in allen Monaten nahezu gleichmäßig zwischen 0,5 K und 1,5 K niedriger als der Bezugsdatensatz und trifft den Verlauf des Jahrganges damit recht gut. Unter der Annahme, dass der kürzere Bezugsdatensatz bereits klimawandelbeeinflusst und somit systematisch wärmer ist als der weiter in die Vergangenheit zurückreichende Modelldatensatz, passen die Ergebnisse von ECHAM5 für Süddeutschland vergleichsweise gut. Weitere Modelle mit im Jahrgang verhältnismäßig gleichmäßigen Abweichungen von  $E_{obs}$  sind HadCM3 und CSIRO-Mk3.0.

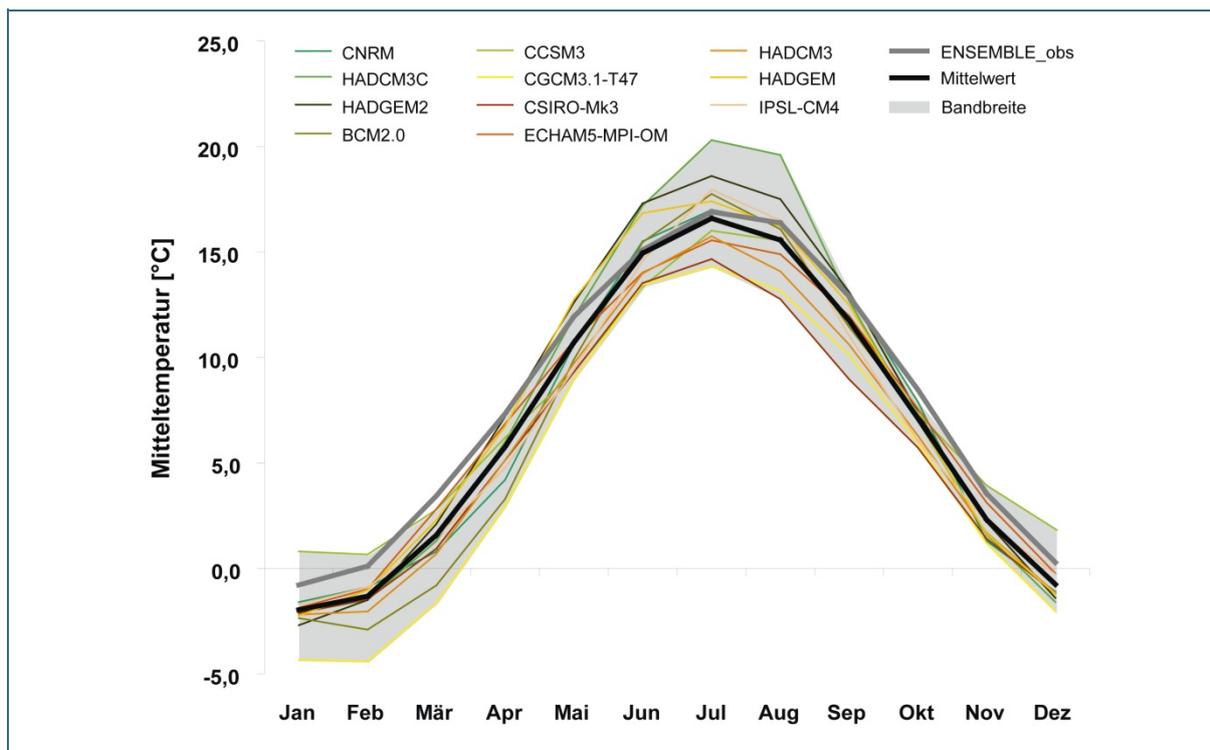


Abb. 4: Vergleich der mittleren Temperaturjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 11 Modelle mit 20C3M-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE\_obs (E<sub>obs</sub>) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 11 Modelle

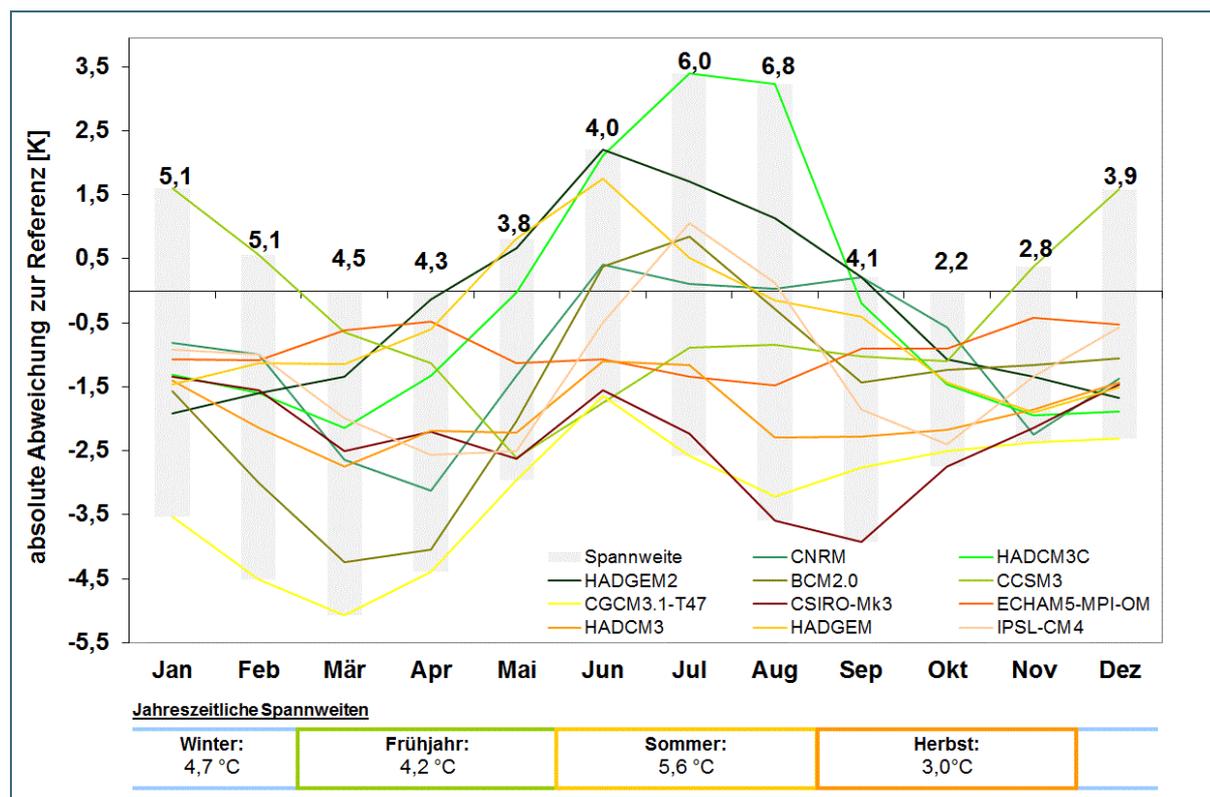


Abb. 5: Vergleich der mittleren monatlichen Temperaturabweichungen zwischen den Modellen und dem Bezugsdatensatz (E<sub>obs</sub> 1971-2000) im Jahresgang – Zeitraum 19/20C; die Zahlen im Diagramm geben die Spannweite der Modelle in K an.

Die durch die Modelle simulierten **Niederschlags**verteilungen im Jahresverlauf stellen sich vielfältiger dar, als es bei der Temperatur der Fall ist. Allgemein ist bei der Ensemble-Betrachtung ein typischer Jahresgang des Niederschlags erkennbar, in dem Sommer und Winter deutlich feuchter sind als die Übergangsjahreszeiten. Dabei weisen acht der untersuchten Modelle ihr Niederschlagsmaximum in den Sommermonaten auf, während das Niederschlagsmaximum der restlichen drei Modelle (CCSM3, ECHAM5, IPSL-CM4) im Winter zu finden ist (Abb. 6).

Der mittlere Jahresniederschlag aus allen Modellen beträgt 1025 mm mit einer Bandbreite von 209 mm. Für den Sommer ergibt sich aus der Ensemble-Betrachtung eine Niederschlagssumme von 279 mm, im Winter von 253 mm. Im Frühjahr und Herbst fallen die mittleren Niederschlagssummen mit 255 bzw. 237 mm geringer aus.

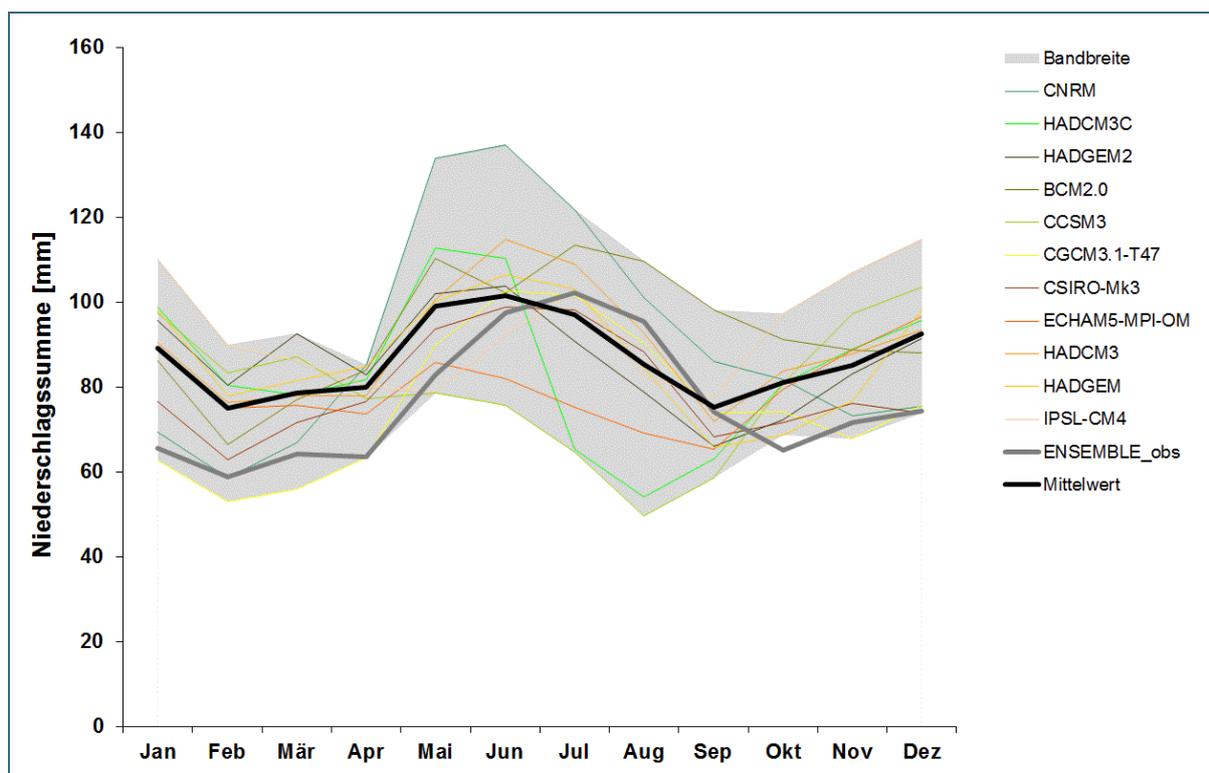


Abb. 6: Vergleich der Niederschlagsjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 11 Modelle mit 20C3M-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE\_obs (E<sub>obs</sub>) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 11 Modelle

Die Bandbreite der mittleren Jahresniederschlagssumme der 19/20C-Läufe liegt zwischen 910 mm und 1119 mm (CGCM3.1-T47 und IPSL-CM4). ECHAM5 ordnet sich mit durchschnittlich 955 mm im unteren Drittel ein. Große relative jahreszeitliche Unterschiede ergeben sich im Sommer (Spannweite von 61 %). Insbesondere in den Monaten Juli und August liegt die Mehrzahl der Modellausgaben unterhalb des Bezugsdatensatzes (Abb. 7). Auch die Winterniederschläge sind mit 63 % durch vergleichsweise große relative Spannen gekennzeichnet, vor allem im Monat Januar. Im Frühjahr (53 %) und Herbst (51 %) stimmen die Modellsimulationen etwas besser miteinander überein. Allgemein ist im Winter eine Überschreitung der Referenzniederschläge festzustellen, was u.a. auch an der Verwendung eines unkorrigierten Bezugsdatensatzes liegen kann. Im Sommer dagegen unterschreiten die meisten Modelle den unkorrigierten Referenzniederschlag noch. ECHAM5 weicht dabei zwischen +36 % (Januar) und -28 % (August) vom E<sub>obs</sub>-Datensatz ab, ist also im Sommer tendenziell eher trockener und im Winter eher feuchter. CGCM3.1-T47 und CSIRO-Mk3 unterscheiden sich über alle Monate betrachtet am wenigsten von E<sub>obs</sub> und treffen den Jahresgang in seinem Verlauf also recht gut.

Allerdings sind sie damit im Niveau gegenüber der Realität zu trocken, da  $E_{\text{obs}}$  aus unkorrigierten Niederschlägen gebildet wurde.

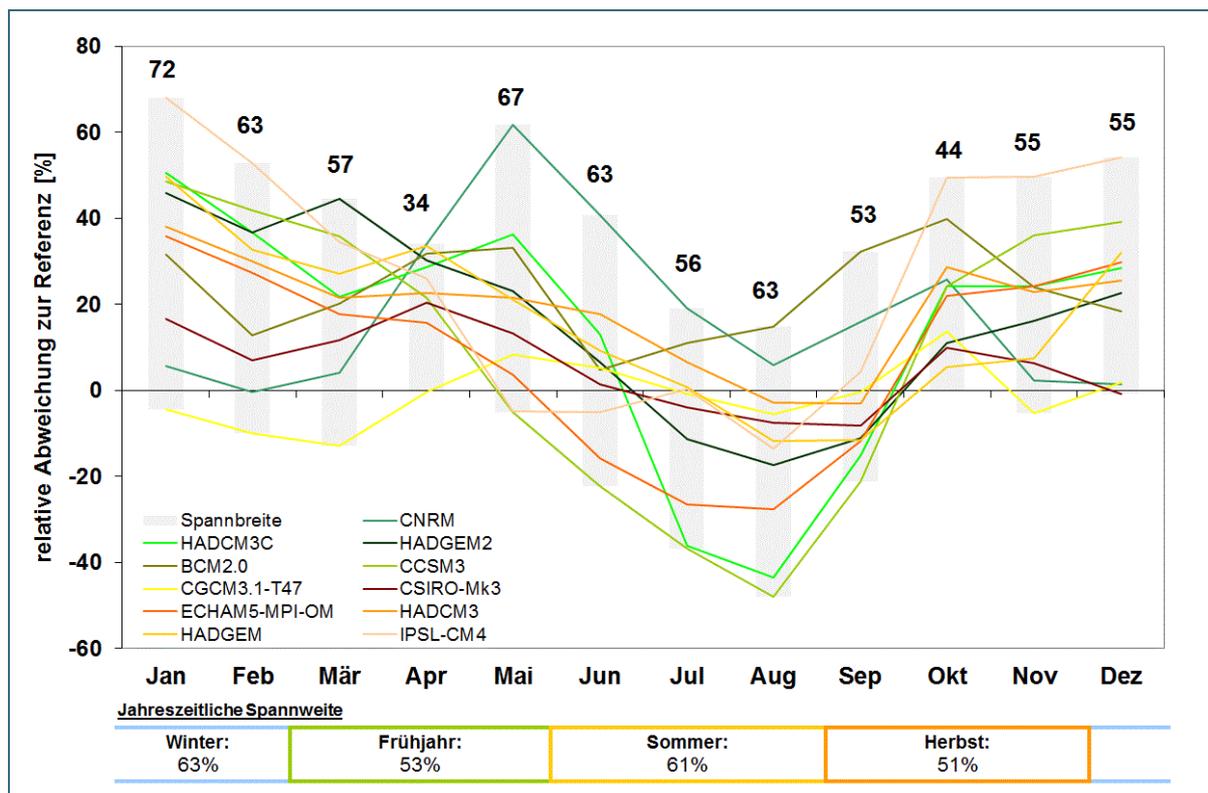


Abb. 7: Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlagsabweichungen zwischen den Modellen und dem Bezugsdatensatz ( $E_{\text{obs}}$  1971-2000) im Jahresgang –Zeitraum 19/20C; die Zahlen im Diagramm geben die relative Spannweite der Modelle in % an.

### 3.1.2 Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert

#### 3.1.2.1 Verläufe der modellierten Zeitreihen 1871 – 2100

Der zeitliche Verlauf der Jahresmitteltemperatur im 30-jährigen gleitenden Mittel von 1871–2100 ähnelt sich in seiner Tendenz bei allen Modellen und Emissionsszenarien (Abb. 8). Allerdings unterscheidet sich in den 19/20C-Läufen (1871-2000) das Ausgangsniveau der einfließenden Modelle bereits erheblich voneinander, wie an der Bandbreite zu sehen. Hinsichtlich der Temperaturentwicklung werden modellabhängig nur geringe Zunahmen zwischen +0,1 K/130a und +1,3 K/130a simuliert (Tab. 4).

In den 21C-Läufen (2001-2100) steigt die Temperatur in allen Modellen abhängig vom gewählten Emissionsszenario hoch signifikant an. Die Kurvenverläufe der Temperatur lassen dabei näherungsweise die Kurvenverläufe der Emissionsszenarien erkennen. In den Emissions-Ensemble-Mitteln der Jahresmitteltemperatur gibt das schwache Emissionsszenario B1 einen moderaten Anstieg von 2,1 K/100a wieder, während A1B und A2 mit +3,9 K/100a und +4,5 K/100a deutlich stärkere Zunahmen zeigen (Tab. 4). Jedoch verläuft die Temperaturentwicklung streng genommen nicht linear (Abb. 8) weshalb lineare Trends demnach durchschnittliche Entwicklungen angeben. Weiterführende Übersichten zu den linearen Trends der analysierten Modelle des Jahresmittels, der Jahreszeiten und der Monate finden sich in den Berichten von FESKE [3] bzw. PÖHLER et al. [19], [20].

Allgemein steigt mit der Zunahme der Temperatur auch die Bandbreite der Modellergebnisse in den verschiedenen Emissionsszenarien. Die größte Bandbreite der projizierten Temperaturen (Abb. 8), bzw. größte Spannweite der linearen Trends (Tab. 4) im Zeitraum 21C besteht für A1B. Zu beachten ist dabei allerdings auch die Zusammensetzung der betrachteten Ensembles: In der Vergangenheit ist der Modellantrieb mit 20C3M gleich, allerdings setzt sich das Ensemble für A1B aus 16 Globalmodellläufen zusammen, A2 und B1 hingegen nur aus acht, z. T. verschiedenen, Läufen. Dadurch ergeben sich bereits in 20C (1971-2000) bei A1B größere Bandbreiten als mit A2 und B1 sowie Niveauunterschiede zwischen letzteren beiden. Dieses Verhalten setzt sich in der Zukunft fort (Abb. 8).

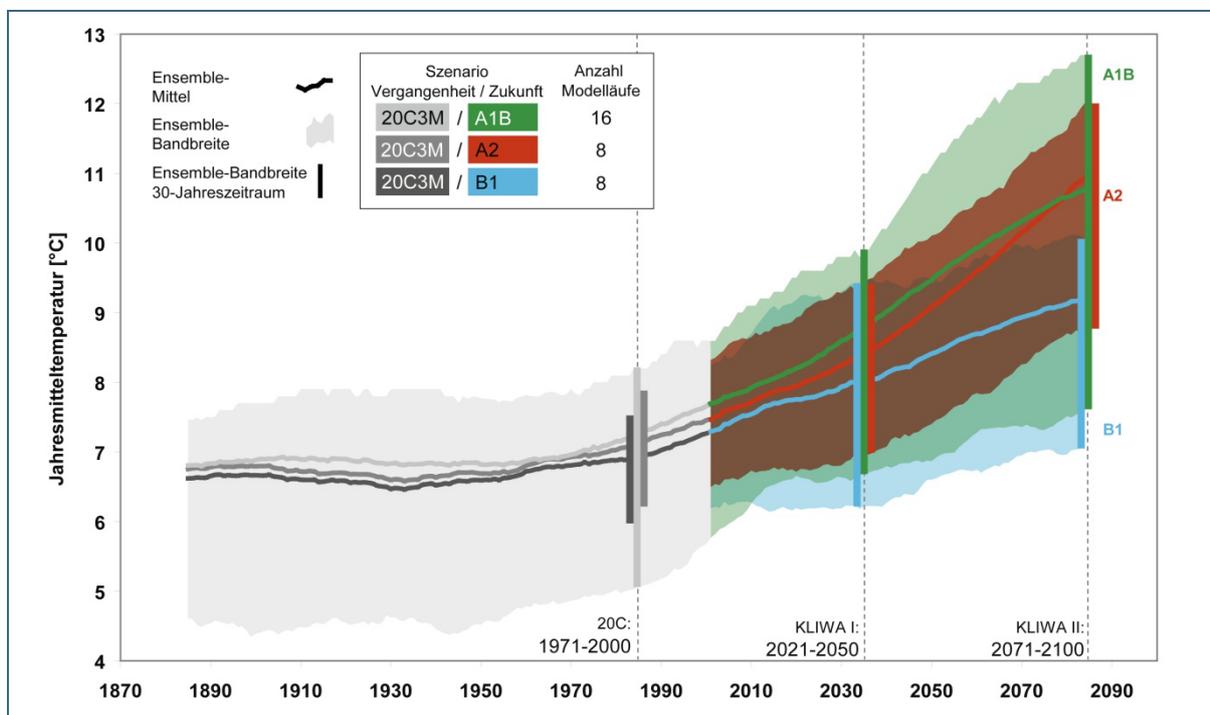


Abb. 8: Verläufe der Jahresmitteltemperatur (30-jähriges gleitende Mittel der Ensemble-Mittelwerte) in der Vergangenheit (20C3M) und den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 inkl. Ensemble -Bandbreite in KLIWA I und II sowie 20C (nur ein Antrieb aber unterschiedliche Kombination von Modellläufen)

Tab. 4: Lineare Trends der Jahresmitteltemperatur [K/130a] (Vergangenheit) bzw. [K/100a] (Zukunft) der Modellläufe des ENSEMBLES-Projekts/IPCC4 im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (absoluter Abstand zwischen minimalen und maximalen projizierten Trends) der Modelle

Emissionsszenario	20C3M (Vergangenheit)	B1	A1B	A2	21C gesamt
Ensemble-Mittelwert	0,5	2,1	3,9	4,5	3,6
Ensemble-Spannweite	+0,1 bis +1,3	+0,5 bis +3,0	+1,5 bis +6,1	+2,7 bis +5,2	+0,5 bis +6,1

Auch die Verläufe der Jahresniederschlagssumme verhalten sich in den 30-jährigen gleitenden Ensemble-Mitteln im Zeitraum 1871-2100 ähnlich (Abb. 9). Dabei besitzen die Ausgangsniveaus, wie bereits bei der Temperatur in den 19/20C-Läufen eine große Bandbreite.

Ein Niederschlagstrend liegt in der Vergangenheit (19/20C) nicht vor. Auch im Zeitraum 21C (2001-2100) sind die Änderungssignale – im Gegensatz zur Temperatur – nur gering und überwiegend nicht signifikant. Die Kurvenverläufe (Abb. 9) und linearen Trendangaben im Ensemble-Mittel (Tab. 5) deuten zwar eine leichte Niederschlagsabnahme im Zusammenhang mit den Emissionsszenarien an, jedoch liegen die Trends größtenteils innerhalb des Vertrauensbereiches von ±10 % und können über-

dies modellabhängig entgegengesetzte Richtungen besitzen. Die Interpretation als verlässliches Signal ist daher nicht möglich. Auf der Ebene von Jahreszeiten und Monaten sind aussagekräftigere Änderungen vorhanden, worauf im folgenden Kapitel eingegangen wird.

Die Bandbreiten der projizierten Jahresniederschlagssummen bzw. die Spannweiten der projizierten linearen Trends (Abb. 9, Tab. 5) der verschiedenen Emissionsszenarien überlappen sehr stark, wobei wieder die Zahl und Charakteristik der einbezogenen Modelle eine große Rolle spielt. Die Ergebnisse der Jahresniederschlagssumme hängen damit mehr von den einbezogenen Modellen ab als von den Emissionsszenarien selbst.

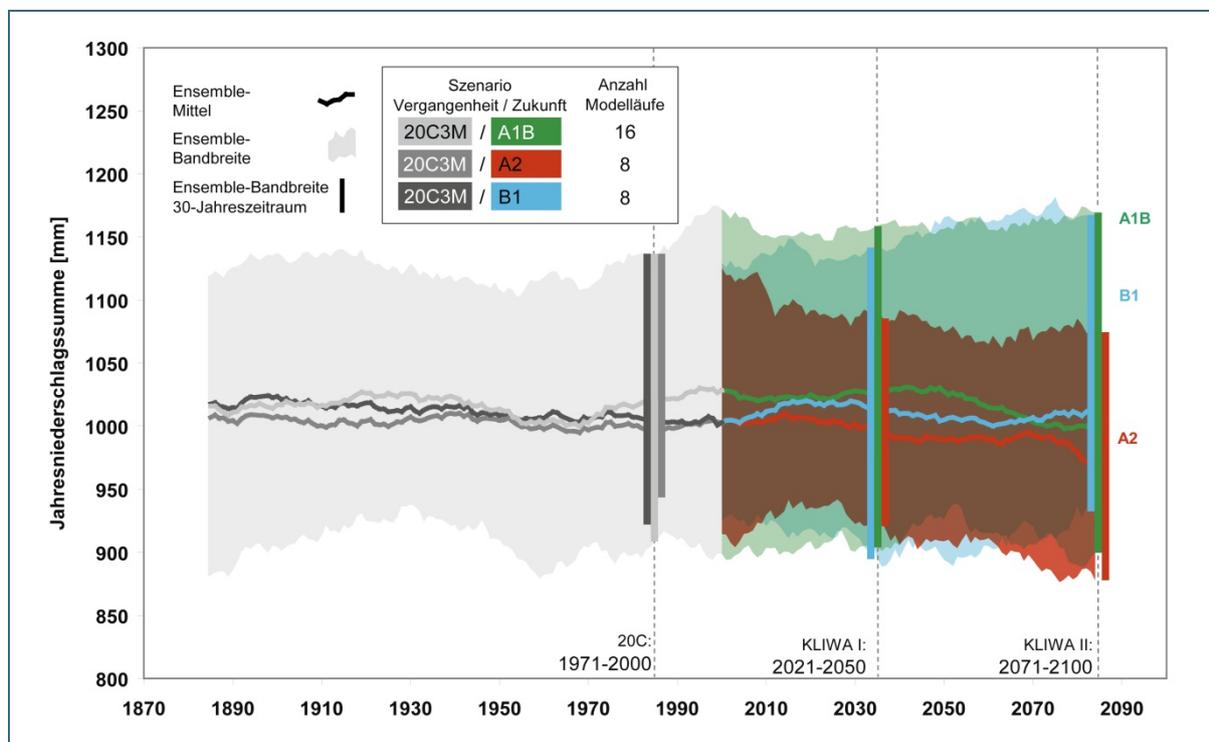


Abb. 9: Verläufe der Jahresniederschlagssumme (30-jährige gleitende Mittel der Ensemble-Mittelwerte) in der Vergangenheit (20C3M) und den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 inkl. Ensemble-Bandbreite in KLIWA I und II sowie 20C (nur ein Antrieb aber unterschiedliche Kombination von Modellläufen)

Tab. 5: Lineare Trends der Jahresniederschlagssumme [%/130a] (Vergangenheit) bzw. [%/100a] (Zukunft) der Modellläufe des ENSEMBLES-Projekts/IPCC4 im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (minimaler und maximaler projizierter Trend) der Modelle

Emissionsszenario	20C3M (Vergangenheit)	B1	A1B	A2	21C gesamt
Ensemble-Mittelwert	-0	-1	-3	-5	-3
Ensemble-Spannweite	-6 bis +7	-7 bis +8	-15 bis +8	-13 bis 0	-15 bis +8

### 3.1.2.2 Klimaänderungssignale in den KLIWA-Zeiträumen

Die folgenden dargestellten Änderungssignale umfassen die in KLIWA verwendeten 30-jährigen Mittelungszeiträume („Zeitscheiben“) 2021-2050 (KLIWA I) und 2071-2100 (KLIWA II) im Vergleich zum Vergangenheitszeitraum 1971-2000 (20C). Hier gehen zunächst nur die acht (sieben) Globalmodellläufe ein, welche sowohl mit A1B als auch mit A2 und B1 gerechnet wurden (Tab. 6). Somit hängen die Änderungssignale allein von der Stärke der Emissionsszenarien ab – eine zusätzliche Variabilität durch unterschiedliche Modellensembles wird vermieden. Ergänzende Angaben zu Mittelwerten und

Spannweiten von Temperatur- und Niederschlagsänderungen in den vollständigen Szenarien-Ensembles (A1B – 16, A2 – 10, B1 – 8 Modellläufe) findet sich im Anhang (Tab. A. 3).

Die folgende Boxplot-Darstellung ermöglicht sowohl die Visualisierung von Ensemble-Mittelwerten als auch die durch die Modelle gebildete Spannweite.

Modell	Temperatur	Niederschlag
BCM2.0	X	(X) nicht A2
CCSM3	X	X
CSIRO-Mk3	X	X
ECHAM5 (Lauf 1-3)	X	X
HadCM3	X	X
IPSL-CM4	X	X

Tab. 6:  
Für SRES-Szenarien A1B, A2 und B1  
gemeinsam verfügbare Globalmodellläufe

Die Ergebnisse der Zeitscheibenvergleiche der **Temperatur** decken sich weitestgehend mit den zuvor durchgeführten Zeitreihenbetrachtungen: Die Ensemblemittel der Änderungssignale sind zur Mitte des 21. Jahrhunderts (KLIWA I) in den drei Emissionsszenarien ähnlich hoch; mit Ausnahme weniger Modelle wird der Wert +2 K nicht überschritten (Abb. 10, Tab. 7). Auch differieren die Spannweiten der Änderungssignale weder zwischen den Jahreszeiten noch zwischen den Emissionsszenarien wesentlich. Zum Ende des Jahrhunderts (KLIWA II) hingegen unterscheiden sich die Änderungssignale deutlicher (i.A. zwischen +1,0 K und +5,0 K) entsprechend der Stärke der Emissionsszenarien und es zeichnet sich eine Erhöhung der Spannweiten ab. Ebenso treten die Unterschiede der Änderungssignale zwischen den Jahreszeiten markanter hervor.

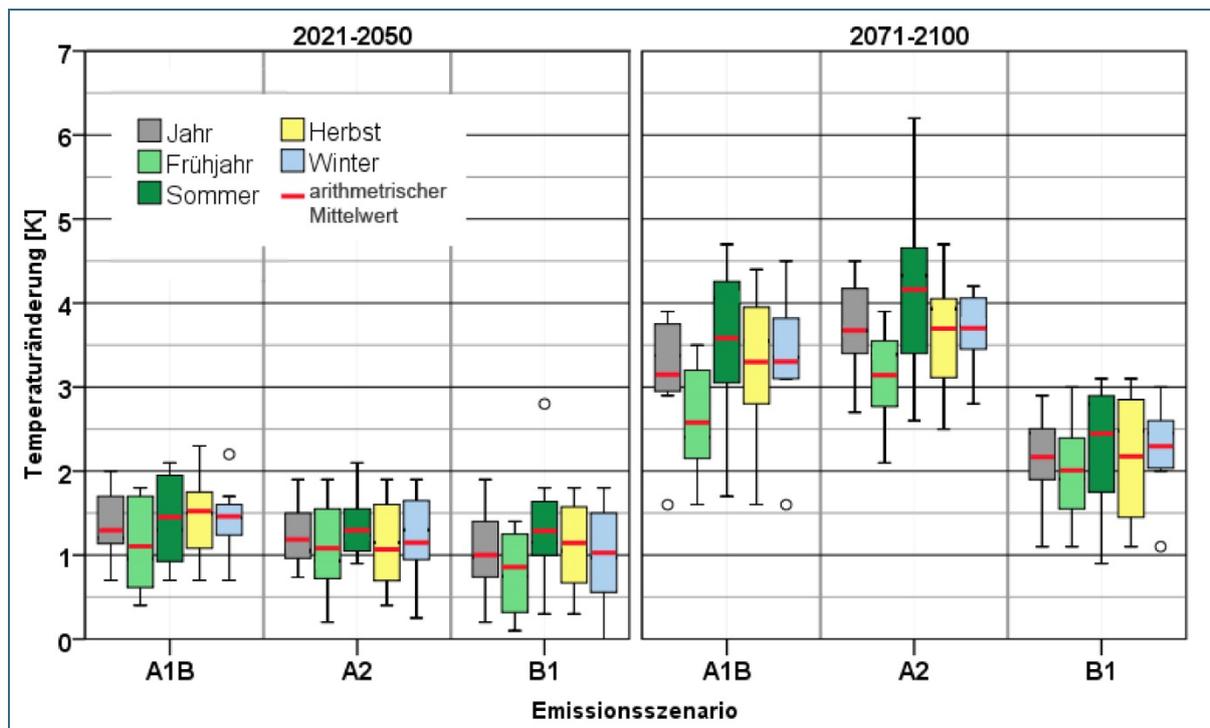


Abb. 10: Temperaturänderungssignal in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen mit SRES-Antrieb

Über alle Szenarien hinweg ergeben sich im Ensemble-Mittel zumeist im Sommer die stärksten Temperaturzunahmen mit bis zu +4,2 K (A2 in KLIWA II). Auch die Spannweite der Modellausgaben ist in dieser Jahreszeit am höchsten. Winter und Herbst zeigen in beiden Zeiträumen ein annähernd gleiches Änderungssignal, während der Frühling stets die schwächsten Signale in allen Szenarien besitzt.

Tab. 7: SRES-Szenarien – Mittlere Veränderung der Temperatur in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderungen, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen; gelb: 0 bis +2 K, hellorange >+2 bis +4 K, orange: >+4 K

	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
<b>Mittleres Temperaturänderungssignal [K]</b>					
2021-2050 vs. 1971-2000					
A1B-20C	+1,3	+1,1	+1,4	+1,5	+1,4
A2-20C	+1,2	+1,1	+1,3	+1,1	+1,2
B1-20C	+1,0	+0,8	+1,3	+1,1	+1,0
2071-2100 vs. 1971-2000					
A1B-20C	+3,2	+2,6	+3,6	+3,3	+3,3
A2-20C	+3,7	+3,2	+4,2	+3,7	+3,7
B1-20C	+2,2	+2,0	+2,4	+2,2	+2,3
<b>Spannweite der Temperaturänderung [K]</b>					
2021-2050 vs. 1971-2000					
A1B-20C	1,3	1,4	1,4	1,6	1,5
A2-20C	1,2	1,7	1,2	1,5	1,6
B1-20C	1,7	1,3	2,5	1,5	1,8
2071-2100 vs. 1971-2000					
A1B-20C	2,3	1,9	3,0	2,8	2,9
A2-20C	1,8	1,8	3,6	2,2	1,4
B1-20C	1,8	1,9	2,2	2,0	1,9

Eine Übersichts-Darstellung der Änderungssignale der einzelnen Modelle in den Einzelmonaten und Jahreszeiten der Zeiträume KLIWA I bzw. KLIWA II geben Tab. A. 4 und Tab. A. 5 im Anhang. Die dort dargestellten Werte der einzelnen Monate zeigen, dass Juli, August und September generell am stärksten von der Erwärmung betroffen sind. Im Vergleich der hier ausgewählten acht GCMs führen die Modelle HadCM3 und IPSL-CM4 zu den größten Zunahmen, BCM2.0 zu der geringsten. Die drei ECHAM5-Läufe reihen sich im oberen Drittel ein.

Wie bereits bei der Auswertung der Zeitreihen der 30-jährig gleitenden Mittelwerte angemerkt, bestehen keine Änderungen der Jahresniederschlagssumme – das Ensemble-Mittel der Änderungssignale liegt für alle drei Emissionsszenarien und beide Zeiträume um  $\pm 1\%$  (Abb. 11, Tab. 8). Auch die Änderungssignale der Modelle in den Jahreszeiten bewegen sich in KLIWA I noch überwiegend im Vertrauensbereich von  $\pm 10\%$ , wenn auch Tendenzen zu leichten Niederschlagszunahmen im Frühjahr und Winter zu verzeichnen sind. In KLIWA II ergeben sich dagegen deutlichere Signale, wiederum im Zusammenhang mit der Stärke der Emissionsszenarien: Während der Winter weiterhin Zunahmen von im Mittel bis zu  $+13\%$  aufweist, nehmen die Sommerniederschläge bis zu  $-19\%$  ab (jeweils A2). Die Änderungen im Frühjahr und Herbst geben keine klare Richtung an. Wie auch bei der Temperatur ist die modellbedingte Spannweite gegen Ende des Jahrhunderts höher als gegen dessen Mitte.

Wie die Übersicht zu den Änderungssignalen der einzelnen Modelle auf Ebene der Monate darstellt (Anhang, Tab. A. 6, Tab. A. 7), werden die größten Niederschlagsabnahmen im August projiziert, die größten Niederschlagszunahmen im Dezember. Je stärker das Emissionsszenario, desto deutlicher ist auch im Allgemeinen das Signal. Auf Modellebene betrachtet bewirken vor allem HadCM3 und die drei ECHAM5-Läufe die größten signifikanten sommerlichen Abnahmen, während BCM2.0 und vor allem ECHAM5 Lauf 2 und 3 zu den winterlichen Niederschlagszunahmen im Ensemble-Mittel führen.

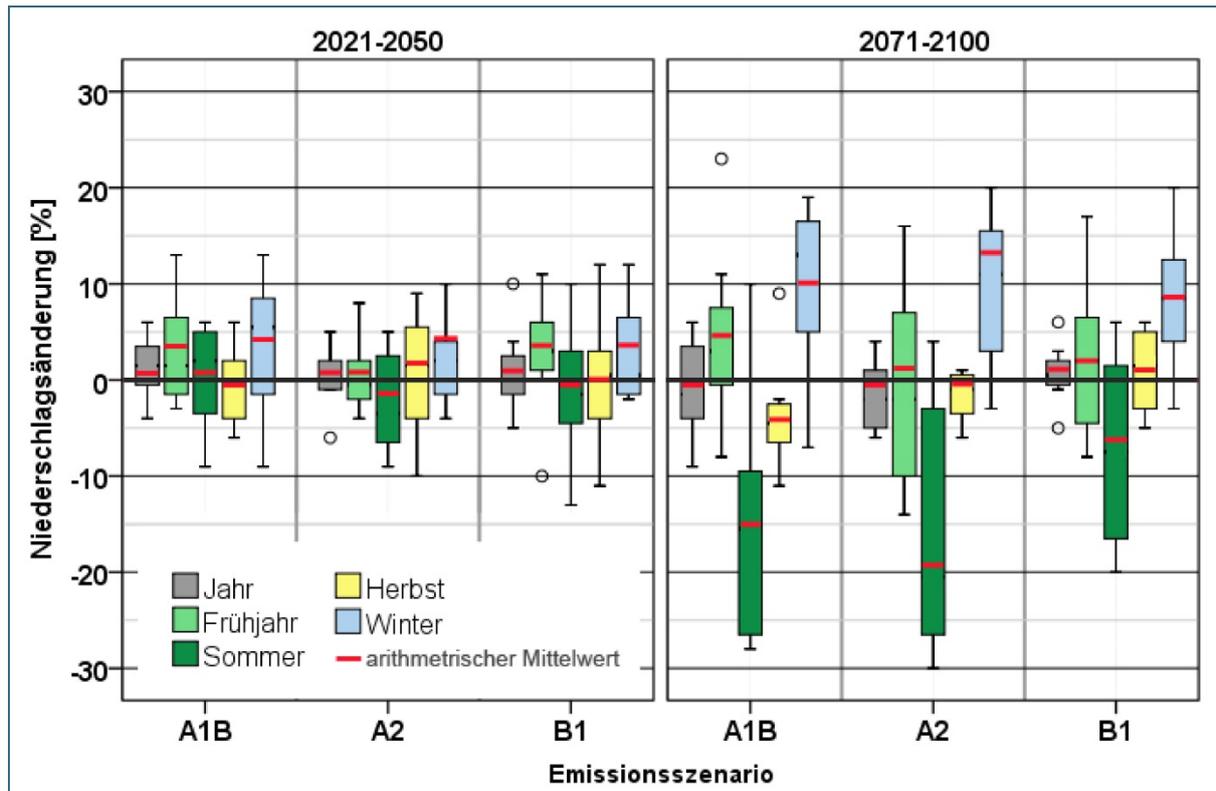


Abb. 11: Niederschlagsänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der Mittelwerte der KLIWA-Zeiträume, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen mit SRES-Antrieb

Tab. 8: SRES-Szenarien – Mittlere Veränderung des Niederschlags in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderung, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen; keine Farbe: Änderung  $\leq \pm 10\%$ , gelb:  $< -10$  bis  $-20\%$ , hellblau:  $\geq +10$  bis  $+20\%$

	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
<b>Mittleres Niederschlagsänderungssignal [%]</b>					
2021-2050 vs. 1971-2000					
A1B/20C	+1	+3	+1	-1	+4
A2/20C	+1	+1	-2	+2	+4
B1/20C	+1	+3	-1	0	+3
2071-2100 vs. 1971-2000					
A1B/20C	-1	+4	-15	-4	+10
A2/20C	-1	+1	-19	-1	+13
B1/20C	+1	+2	-7	+1	+8
<b>Spannweite der Niederschlagsänderung [%]</b>					
2021-2050 vs. 1971-2000					
A1B/20C	10	16	15	12	22
A2/20C	6	10	13	19	13
B1/20C	15	21	23	23	14
2071-2100 vs. 1971-2000					
A1B/20C	15	31	38	20	26
A2/20C	11	30	39	10	16
B1/20C	11	25	26	11	23

## 3.2 Globale Klimaprojektionen mit RCP-Antrieb

Die Zukunftsprojektionen des aktuellen 5. IPCC-Berichts [8] beruhen mit den RCP-Szenarien auf einer neuen Art von Modellantrieb. Seit Anfang 2012 stehen die Datensätze dieser neuen Projektionen der Fachwelt zur Verfügung. Wie sich die Ergebnisse von RCP-getriebenen Globalmodellen äußern, wurde über die Auswahl der Globalmodelle MPI-ESM-LR, CNRM-CM5 und HadGEM2\_ES in PÖHLER et al. [20] exemplarisch beleuchtet und ist im Folgenden zusammengefasst. Ein detaillierter Vergleich gegenüber den von SRES angetriebenen Modellen wird im darauf folgenden Kapitel durchgeführt. Für das Globalmodell MPI-ESM-LR und seinen Vorgänger ECHAM5 liegen je drei Modellläufe vor, deren Unterschiede im Kapitel 3.4 dargestellt werden. Hier werden die drei Läufe stets in ihrer Gesamtheit einbezogen.

### 3.2.1 Mittlere Jahrgänge im 19./20. Jahrhundert

Als Antrieb der hier dargestellten Modelle aus dem CMIP5-Projekt dient in der Vergangenheit der Datensatz „RCP historical“, der, wie auch schon 20C3M (vgl. Kapitel 2.1), auf gemessenen Daten basiert. Im Folgenden dargestellt sind die Jahrgänge der Temperatur (Abb. 12) und des Niederschlags (Abb. 13) einschließlich der Ensemble-Bandbreite aus sowohl den Modellen des CMIP5- als auch des ENSEMBLES-Projektes. Weiterhin dienen die Verläufe des Datensatzes  $E_{obs}$  als Referenz- sowie des Ensemble-Mittels als Orientierungslinie. Die hier gezeigten mittleren Jahrgänge im Zeitraum 19/20C beleuchten das Ausgangsregime der CMIP5-Modelle, auf das die Zukunftssimulationen mit Antrieb aus den RCP-Szenarien aufsetzen.

Alle drei RCP-angetriebenen Modelle ordnen sich in die Ensemble-Bandbreite der **Temperatur** gut ein und zeigen einen typischen Jahrgang (Abb. 12). Allerdings variieren die Temperaturamplituden teilweise erheblich und zeigen damit die unterschiedliche Kontinentalität. Während die Amplitude im Bezugsdatensatz 17,7 K beträgt, liegt sie in den Modellen zwischen 15,9 K (MPI-ESM-LR Lauf 2 - maritim) und 21,3 K (HadGEM2-ES - kontinental).

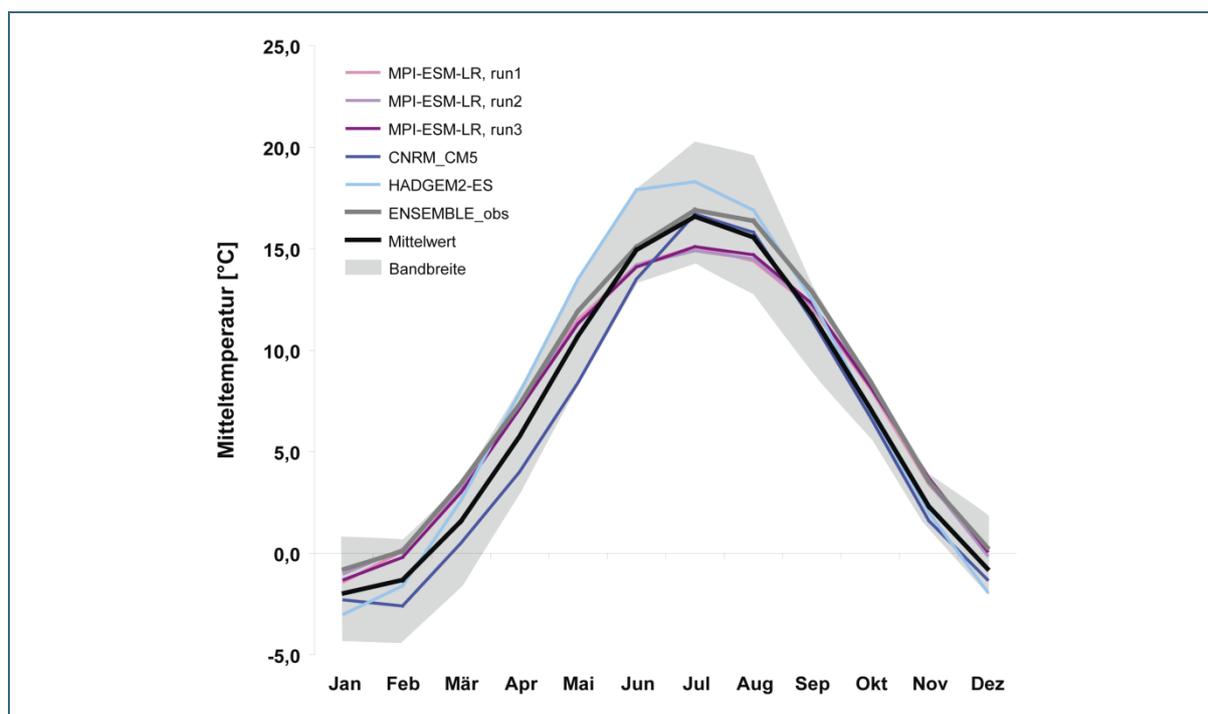


Abb. 12: Vergleich der Temperaturjahrgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 5 Modellläufe mit „RCP historical“-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE\_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellenensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe (20C3M+RCP historical)

Die Jahresmitteltemperaturen der drei MPI-ESM-LR-Läufe („ECHAM6“) liegen mit 7,3 bzw. 7,4 °C in der Mitte der drei RCP-Modelle, bei einer Differenz zum Bezugsdatensatz zwischen -0,1 und +0,1 K. Im Herbst ist dieses Modell zudem das Wärmste. Bemerkenswert ist, dass die drei MPI-ESM-LR Läufe von den drei betrachteten Modellen die geringste Amplitude mit einem ~1,8 K geringeren Juli-Mittel als in der Referenzreihe besitzt. CNRM\_CM5 ist mit einer Jahresmitteltemperatur von 6 °C das kühlste Modell, vor allem im Zeitraum Februar bis Juni. HadGEM2-ES gibt zwischen April bis August die höchsten Monatsmitteltemperaturen der drei neuen Modelle an, unterscheidet sich im Jahresmittelwert mit 7,7 °C aber kaum vom Bezugsdatensatz. Im Vergleich zum Ensemble-Mittel aller Modelle weisen CNRM\_CM5 und HadGEM2-ES in den Herbstmonaten die größte Übereinstimmung auf, sind also „mittlere Modelle“.

Die **Niederschläge** der 19/20C-Läufe unterscheiden sich im Jahresgang sowohl im Verlauf als auch in den Summen erheblich von der Referenzreihe bzw. untereinander (Abb. 13). Die dargestellte Überschätzung der Niederschlagssummen gegenüber dem Bezugsdatensatz  $E_{obs}$  rührt zum Teil auch von der Nutzung unkorrigierter – und somit zu niedriger – Niederschläge im  $E_{obs}$ -Datensatz her. Somit ist eine gewisse Überschätzung durch die GCM-Daten zu erwarten.

In den Jahressummen ist HadGEM2-ES mit 977 mm das trockenste Modell, CNRM-CM5 mit 1222 mm das feuchteste. MPI-ESM-LR („ECHAM6“) liegt mit 1045 mm, 1055 mm und 1062 mm für seine drei Läufe in der Mitte. Der Mittelwert der Jahressummen beträgt 1085 mm, die Bandbreite 245 mm. Im innerjährlichen Vergleich trifft CNRM-CM5 den Verlauf der Beobachtungsdaten recht gut, jedoch liegen die modellierten mittleren monatlichen Niederschlagssummen ganzjährig deutlich über denen des Bezugsdatensatzes  $E_{obs}$ . Dagegen ist HadGEM2-ES im Sommer wesentlich trockener und zeigt verschobene Niederschlagsminima und –maxima. Gleiches gilt für die MPI-ESM-LR-Läufe. Im Vergleich zum Gesamt-Ensemble repräsentieren sie mittlere Verhältnisse.

Im Mittel wird von den Modellen auch das Maximum des Jahresgangs nicht vollständig getroffen. Es liegt zwar bei allen Modellen im Sommer, wird aber etwa einen Monat früher erreicht. Auch sind die modellierten Amplituden geringer. Insgesamt wird also der Jahresgang der Referenz nur bedingt gut abgebildet.

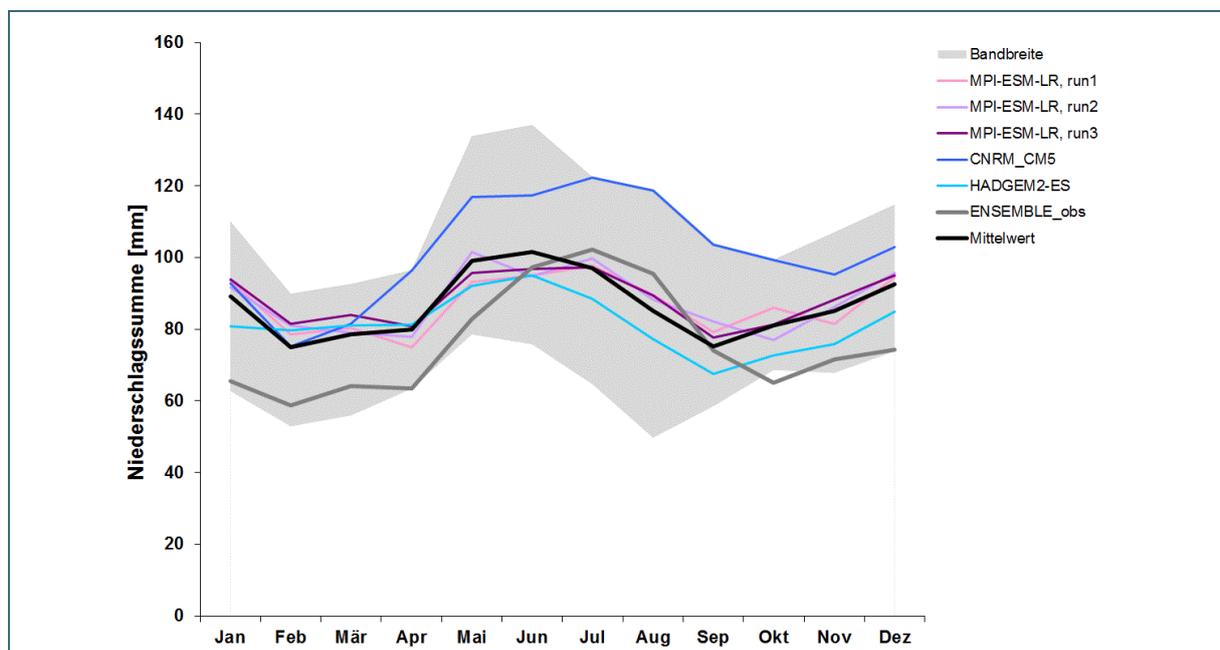


Abb. 13: Vergleich der Niederschlagsjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 5 Modellläufe mit „RCP historical“-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE\_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe (20C3M+RCP historical)

## 3.2.2 Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert

### 3.2.2.1 Verläufe der modellierten Zeitreihen 1871-2100

Abb. 14 und Abb. 15 zeigen die Verläufe der Jahresmitteltemperatur bzw. der Jahresniederschlags-summe der untersuchten Modellläufe (bis zu fünf Läufe je RCP) im 30-jährigen gleitenden Mittel im Zeitraum 1871-2100. Dabei wurde das RCP-Szenario 2.6 nur für MPI-ESM-LR („ECHAM6“) mit drei Modellläufen ausgewertet. Es ist aber anzunehmen, dass HadGEM2-ES und CNRM-CM5 einen ähnlichen Korridor um MPI-ESM-LR bilden würden, wie in den beiden höheren Szenarien RCP4.5 und RCP8.5.

Analog zu den für die SRES-Szenarien vorliegenden Ergebnissen konnten auch für RCP-Szenario-betriebene Modelle einheitliche Grundtendenzen festgestellt werden: Im Zeitraum 19/20C (1871-2000), beträgt der Trend der Jahresmitteltemperatur im Ensemble-Mittel 0,7 K/130a. Das geht hier allein auf die MPI-ESM-LR-Läufe zurück, da die beiden anderen Modelle keinen signifikanten Trend zeigen. Ab Beginn des 21. Jahrhunderts steigt die Temperatur in allen Modellläufen überwiegend hoch signifikant an, mit Ensemble-Mitteln zwischen +0,6 K/100a und +4,9 K/100a (Tab. 9). Insgesamt liegen die Verläufe der Jahresmitteltemperaturen im 30-jährigen gleitenden Mittel mit Ausnahme von CNRM bis Mitte des 21. Jahrhunderts in allen Antriebsszenarien noch relativ eng beisammen, danach erfolgt eine Aufspreizung zwischen den verschiedenen Szenarien (Abb. 14). Während die Modellergebnisse mit dem schwächsten Szenario RCP2.6 ab diesem Zeitpunkt kaum noch Änderungen im Temperaturniveau zeigen, steigen sie für RCP4.5 bei gleichbleibender Bandbreite bis Ende des Jahrhunderts moderat an. Mit RCP8.5 betriebene Modelle weisen einen deutlich stärkeren Temperaturanstieg bei gleichzeitig zunehmender Modellbandbreite auf. Den größten Trend zeigt hierbei das Modell HadGEM2-ES. Zu berücksichtigen sind dabei die unterschiedlichen Ausgangsniveaus der Modelle bereits im 19/20C-Lauf. Besonders deutlich hebt sich dabei CNRM\_CM5 als insgesamt sehr kühles Modell ab, wobei die Temperaturzunahme ab den 90'er Jahren bis Ende des Jahrhunderts im Rahmen der anderen Modelle liegt. Angaben zu den linearen Trends der Modelle in Jahreszeiten und Monaten finden sich in PÖHLER et al. [20].

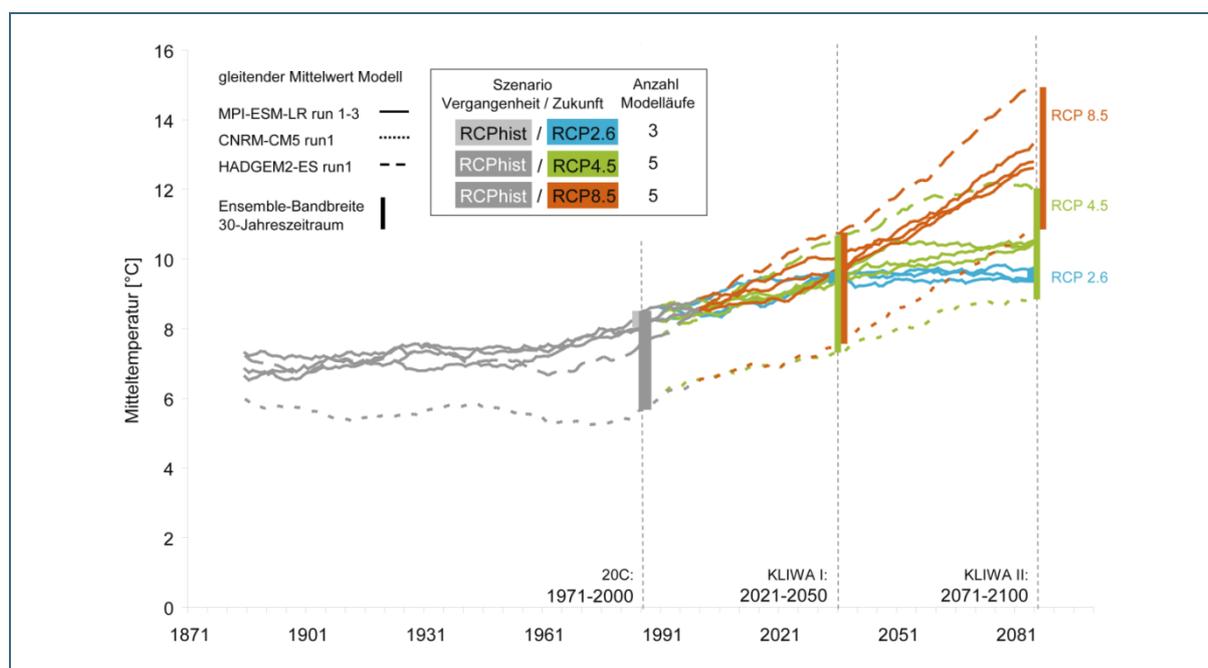


Abb. 14: Verläufe der absoluten Jahresmitteltemperatur (30-jähriges gleitendes Mittel) in der Vergangenheit (RCPHist) und die Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 inkl. Ensemble -Bandbreite in KLIWA I und II sowie 20C (ein Antrieb)

Tab. 9: Lineare Trends der Jahresmitteltemperatur [K/130a] (Vergangenheit) bzw. [K/100a] (Zukunft) der Modell-Läufe des CMIP5-Projekts im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (absoluter Abstand zwischen minimalen und maximalen projizierten Trends) der Modelle; 3 Modelle (5 Modellläufe), RCP2.6: Nur ein Modell (3 Modellläufe)

Antriebsszenario	RCP historisch	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	21C gesamt
Ensemble-Mittelwert	+0,7	+0,6	+2,2	+4,9	+2,9
Ensemble-Spannweite	+1,2	+0,7	+1,2	+2,2	+6,3

Die Jahresniederschlagssummen weisen weder im Zeitraum 19/20C noch in 21C nennenswerte und zumeist insignifikante Änderungen auf. Dies untermauern sowohl die Verläufe der 30-jährigen gleitenden Mittelwerte (Abb. 15) als auch die Ensemble-Mittelwerte der Trends (Tab. 10). Entwicklungen ergeben sich allerdings auf Ebene der Jahreszeiten, worauf im folgenden Kapitel bzw. in PÖHLER et al [20] näher eingegangen wird. Wie die Verläufe der absoluten Jahresniederschlagssummen zeigen, sind die Bandbreiten der Modellausgaben deutlich stärker von den verwendeten Globalmodellen geprägt als von den RCP-Szenarien, mit denen sie angetrieben werden. Vor allem für das Modell MPI-ESM-LR bewegen sich die Ergebnisse für alle drei RCPs im gleichen Bereich. CNRM-CM5 ist als vergleichsweise feucht einzustufen, während HadGEM2-ES eher trocken im Vergleich zu den anderen betrachteten GCMs ist.

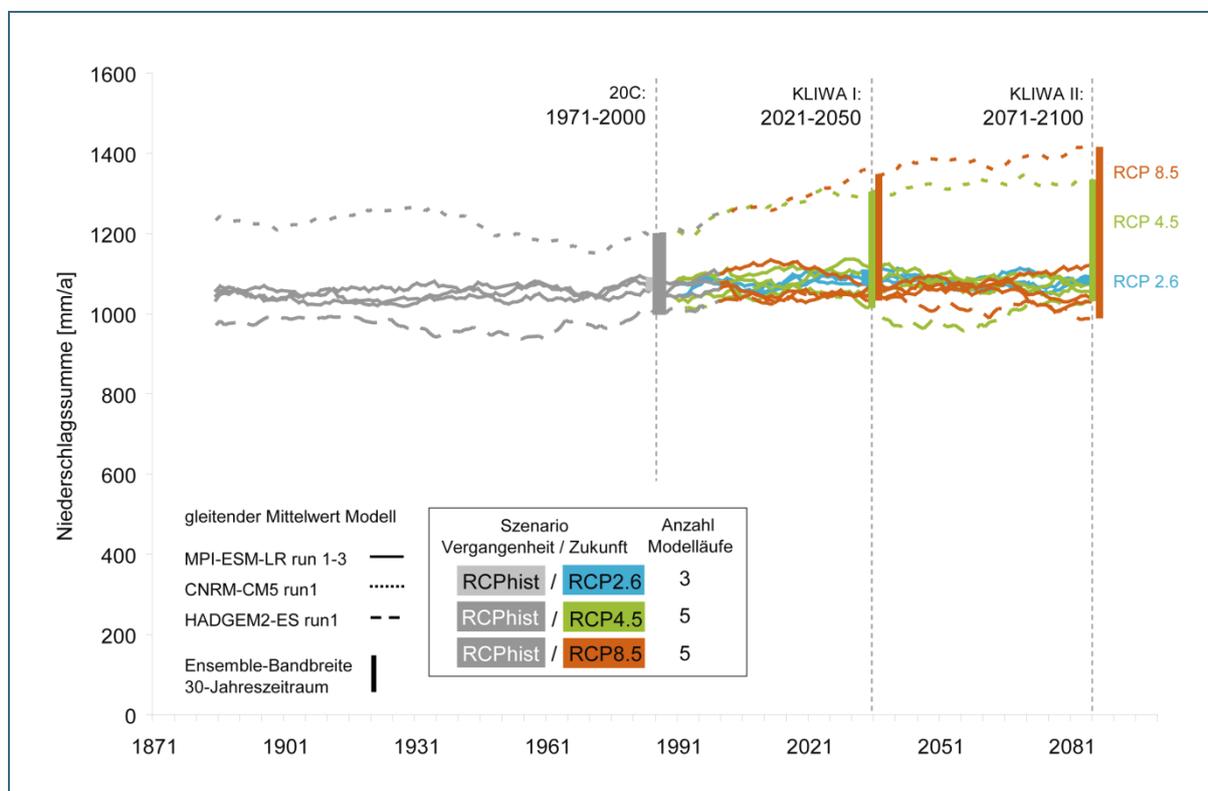


Abb. 15: Verläufe der absoluten Jahresniederschlagssumme (30-jähriges gleitendes Mittel) in der Vergangenheit (RCP hist) und die Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 inkl. Ensemble -Bandbreite in KLIWA I und II sowie Vergangenheit (ein Antrieb)

Tab. 10: Lineare Trends der Jahresniederschlagssumme [%/130a] (Vergangenheit) bzw. [%/100a] (Zukunft) der Modell-Läufe des CMIP5-Projekts im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (absoluter Abstand zwischen minimalen und maximalen projizierten Trend); 3 Modelle (5 Modellläufe), RCP2.6: Nur ein Model (3 Modellläufe).

Antriebsszenario	RCP historisch	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	21C gesamt
Ensemble-Mittelwert	+1	+0	-1	0	-1
Ensemble-Spannweite	+10	+6	+13	+24	+24

### 3.2.2.2 Klimaänderungssignale in den KLIWA-Zeiträumen

Die Änderungssignale der **Temperatur** im KLIWA-Zeitraum 2021-2050 (KLIWA I) gegenüber 20C (1971-2000) liegen im Ensemble-Mittel in allen Jahreszeiten zwischen +0,8 K und +2,0 K (Abb. 16, Tab. 11, Anhang Tab. A. 3Tab. A. 3) und sind noch relativ ähnlich. Bei dieser Aussage wird das Ensemble-Mittel von RCP2.6, das nur auf drei Läufen des MPI-ESM-LR („ECHAM6“) beruht, außer Acht gelassen. Im späteren Zeitraum KLIWA II (2071-2100) zeichnen sich dagegen deutlichere Temperaturänderungssignale ab, welche die Stärke des zugrunde liegenden Antriebszenarios abbilden. Jahreszeitlich betrachtet werden in beiden Zeiträumen die geringsten Änderungen im Frühjahr modelliert. Dagegen fällt in KLIWA I die Erwärmung im Winter und Sommer ähnlich mit Zunahmen zwischen +1,6 K und +2,0 K im Ensemblemittel aus, in KLIWA II tritt die größte Temperaturzunahme im Sommer (bis +5,4 K, RCP8.5) ein, während sich Winter und Herbst jeweils in einem ähnlichen Bereich (RCP4.5: ~+2,5 K, RCP8.5: ~4,5 K) einordnen.

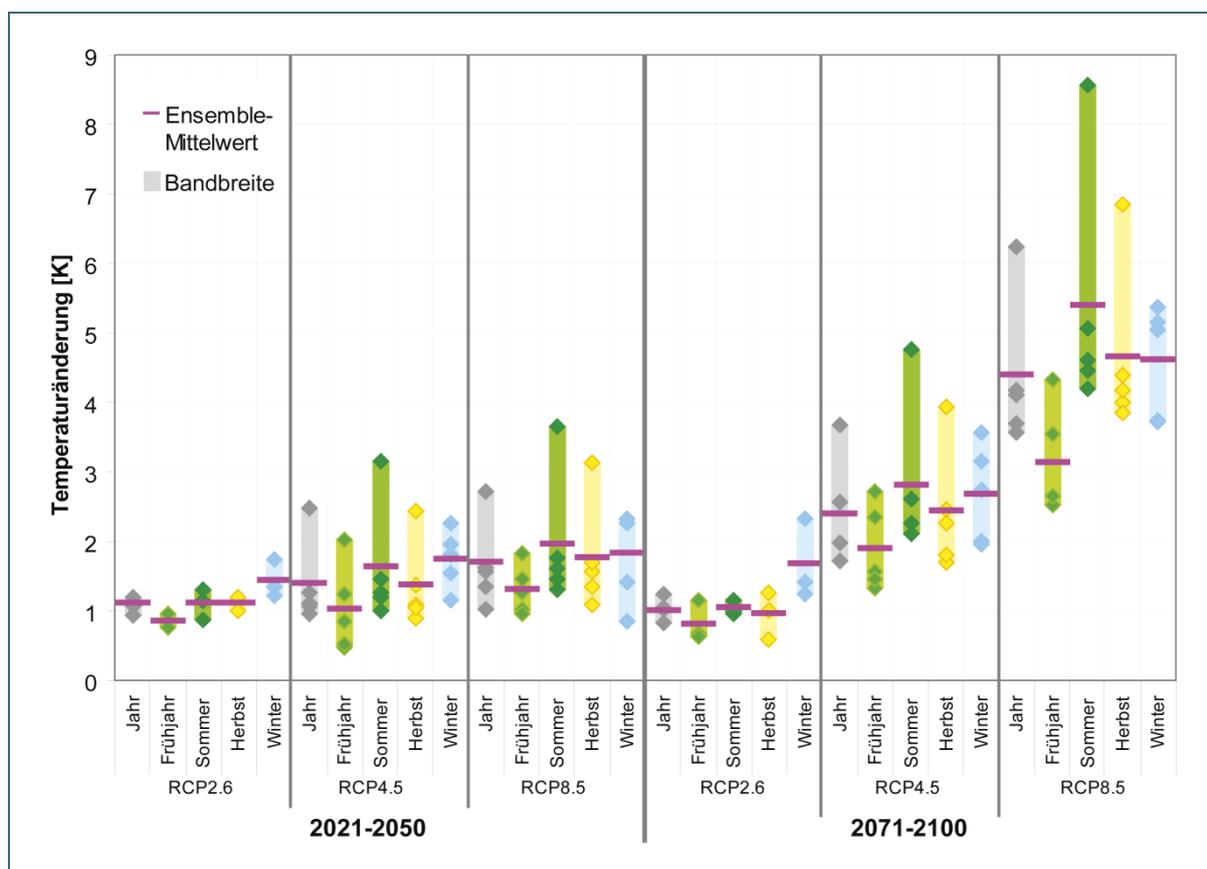


Abb. 16: Temperaturänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensemble aus fünf Modellläufen mit RCP-Antrieb, RCP2.6: drei Modellläufe MPI-ESM\_LR

Wie sich auch in der Auswertung der SRES-Szenarien zeigt, sind Juli, August, und September die Monate mit den größten Erwärmungen (siehe Anhang, Tab. A. 4, Tab. A. 5). Das wärmste Modell ist mit +9,9 K HadGEM2-ES, RCP8.5 im Zeitraum KLIWA II.

Tab. 11: RCP-Szenarien – Mittlere Veränderung der Temperatur in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderungen, Ensemble aus fünf (bzw. drei) Modellläufen, gelb: 0 bis +2 K, hellorange >+2 bis +4 K, orange: >+4 K

	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
<b>Mittleres Temperaturänderungssignal [K]</b>					
	2021-2050 vs. 1971-2000				
RCP2.6 – 20C	+1,1	+0,8	+1,1	+1,1	+1,4
RCP4.5 – 20C	+1,4	+1,0	+1,6	+1,4	+1,7
RCP8.5 – 20C	+1,7	+1,3	+2,0	+1,8	+1,8
	2071-2100 vs. 1971-2000				
RCP2.6 – 20C	+1,0	+0,8	+1,0	+1,0	+1,7
RCP4.5 – 20C	+2,4	+1,9	+2,8	+2,4	+2,7
RCP8.5 – 20C	+4,4	+3,1	+5,4	+4,6	+4,6
<b>Spannweite der Temperaturänderung [K]</b>					
	2021-2050 vs. 1971-2000				
RCP2.6 – 20C	0,4	0,5	0,2	0,7	1,1
RCP4.5 – 20C	1,9	1,4	2,7	2,2	1,6
RCP8.5 – 20C	2,7	1,8	4,4	3	1,7
	2071-2100 vs. 1971-2000				
RCP2.6 – 20C	0,3	0,2	0,4	0,2	0,5
RCP4.5 – 20C	1,5	1,6	2,2	1,5	1,1
RCP8.5 – 20C	1,7	0,9	2,4	2	1,5

Analog zu den Ergebnissen bei der Temperatur zeigen die Ergebnisse der **Niederschlagsänderung** in der nahen Zukunft (KLIWA I) im Mittel noch relativ geringe Änderungen. Signale von mehr als  $\pm 10\%$  ergeben sich hauptsächlich durch CNRM-CM5 und HadGEM2-ES. In der ferneren Zukunft (KLIWA II) weisen die Änderungssignale aber ein deutlicheres Muster auf: Im Ensemble-Mittel sinkt im Zeitraum KLIWA II die Niederschlagssumme im Sommer um bis zu -19 %, im Winter steigt sie um bis zu +18 % (Abb. 17, Tab. 12, Anhang Tab. A. 3 Tab. A. 3). Zu beachten ist dabei jedoch die große Spannweite der Änderungssignale, die modellabhängig auch unterschiedliche Richtungen innerhalb der Jahreszeit angeben können, insbesondere im Sommer und Herbst. Tab. A. 6 und Tab. A. 7 im Anhang fassen wiederum die Ausprägung der Niederschlagsänderungen in den einzelnen Modellen und Monaten zusammen.

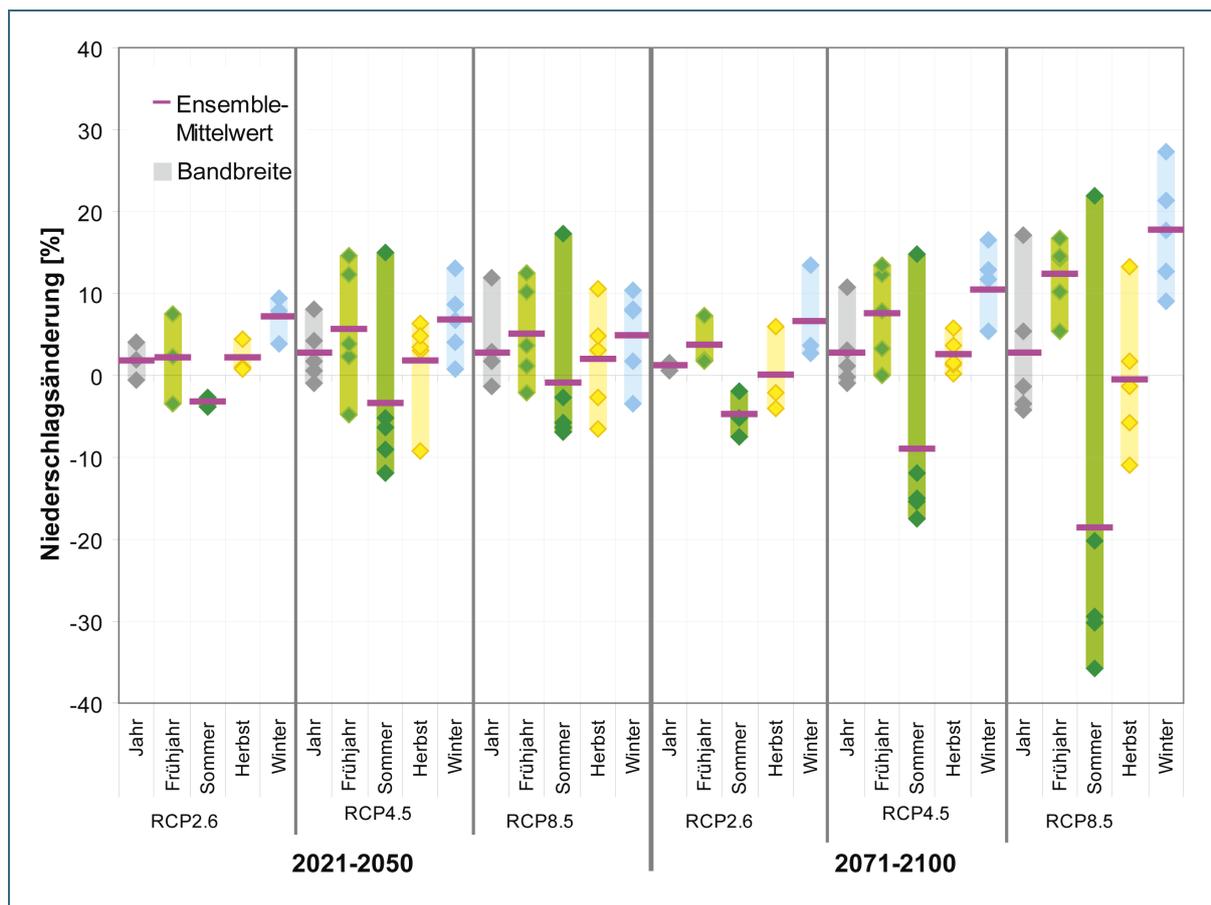


Abb. 17: Niederschlagsänderungen gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100; Ensemble aus 5 Modellläufen mit RCP-Antrieb, RCP2.6: drei Modellläufe MPI-ESM\_LR

Tab. 12: RCP-Szenarien – Mittlere Veränderung des Niederschlags in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderungen, Ensemble aus fünf (bzw. drei) Modellläufen; keine Farbe: Änderung <math>\pm 10\%</math>, gelb: <math>< -10</math> bis <math>-20\%</math>, hellblau: <math>\geq +10</math> bis <math>+20\%</math>

	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
<b>Mittleres Niederschlagsänderungssignal [%]</b>					
2021-2050 vs. 1971-2000					
RCP2.6 – 20C	+2	+2	-3	+2	+7
RCP4.5 – 20C	+3	+6	-4	+2	+7
RCP8.5 – 20C	+3	+5	-1	+2	+5
2071-2100 vs. 1971-2000					
RCP2.6 – 20C	+1	+4	-5	-0	+7
RCP4.5 – 20C	+3	+7	-9	+3	+10
RCP8.5 – 20C	+3	+12	-19	-1	+18
<b>Spannweite der Niederschlagsänderung [%]</b>					
2021-2050 vs. 1971-2000					
RCP2.6 – 20C	4	11	1	4	6
RCP4.5 – 20C	9	19	27	16	12
RCP8.5 – 20C	13	15	24	17	14

Spannweite der Niederschlagsänderung [%]					
	2071-2100 vs. 1971-2000				
RCP2.6 – 20C	1	6	6	10	11
RCP4.5 – 20C	12	13	32	6	11
RCP8.5 – 20C	21	11	58	24	18

### 3.3 Vergleich der Modellergebnisse mit SRES- und RCP-Antrieben

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellläufe aus dem ENSEMBLES- sowie CMIP5-Projekt zusammen dargestellt und vergleichend betrachtet.

#### 3.3.1 Mittlere Jahressgänge im 19./20. Jahrhundert

Für die **Temperatur** zeigen alle Modelle im Zeitraum 19/20C (1871-2000) einen typischen Jahresgang, allerdings unterscheiden sich die mittleren Temperaturspannweiten teilweise erheblich voneinander (zwischen 15,4 K und 22,3 K, Bezugsdatensatz: 17,7 K). Die Ergebnisse der CMIP5-Modelle ordnen sich in ihrem Jahresgang in die der ENSEMBLES-Modelle gut ein (Abb. 18). Ausnahmen sind CNRM\_CM5, das zwischen Mai und Juni das neue Ensembleminimum bildet, und HadGEM2-ES, das von April bis Juni das neue Ensemblemaximum definiert. ECHAM5 und die MPI-ESM-LR-Läufe („ECHAM6“) liegen dabei weitestgehend in der Ensemble-Mitte. Die Spannweite der Abweichungen zum Bezugsdatensatz erhöht sich nur im Frühjahr durch die Hinzunahme des warmen HadGEM2-ES merklich.

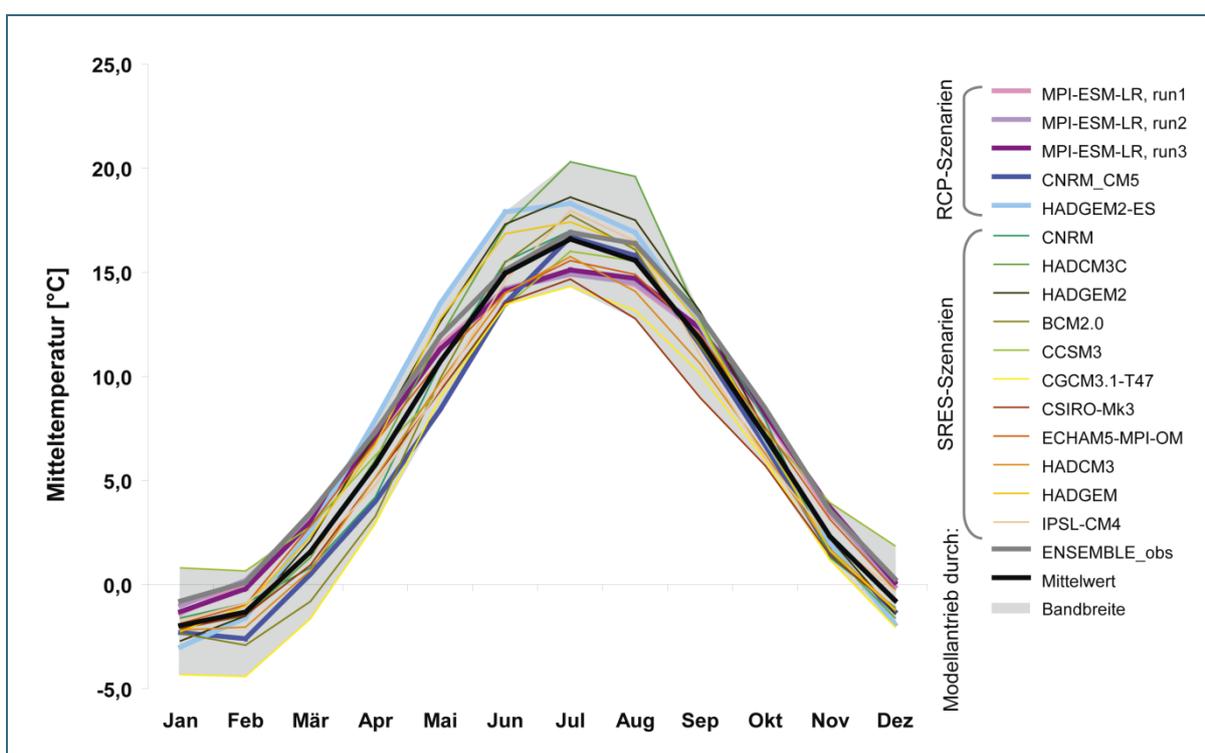


Abb. 18: Vergleich der Temperaturjahressgänge im Zeitraum 19/20C-Läufe (1871-2000), dargestellt sind 11 Modellläufe mit 20C3M-Antrieb, 5 Modellläufe mit RCP-historical-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE\_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe

Die **Niederschläge** der 19/20C-Läufe und der Bezugsreihe  $E_{obs}$  unterscheiden sich sowohl im Jahresgang als auch in der Jahressumme erheblich (Abb. 19), teilweise auch begründet durch die Verwendung unkorrigierter, also zu geringer, Bezugsdaten.

Allgemein ordnen sich die CMIP5-Modelle gut in das bestehende Ensemble ein. Dabei stellt MPI-ESM-LR ein mittleres Modell dar. Nach Hinzunahme der CMIP5-Modelle hat sich die mittlere Jahresniederschlagssumme von 1025 mm auf 1039 mm verschoben. Weiterhin erhöht sich die jährliche Bandbreite von 299 mm auf 312 mm, da CNRM-CM5 zwischen Juli und Oktober das neue Ensemblemaximum bildet. Damit erweitert es die maximale monatliche Ensemble-Bandbreite von 60 auf 69 mm und verlagert diese vom Juni in den August. Auch die monatlichen Spannweiten der Abwei-

chung zur Referenz erhöhen sich allein durch CNRM-CM5. Solch starke Abweichungen erfordern eine besonders kritische Betrachtung der Ergebnisse darauf aufbauender Regionalmodell- oder Wasserhaushaltsmodellläufe. Prägen sich dort die starken Unterschiede weiterhin durch und führen somit zu lokal unplausiblen Resultaten, kann dies ein Auswahl- bzw. Ausschlusskriterium für die weitere Nutzung dieses Globalmodelllaufes sein.

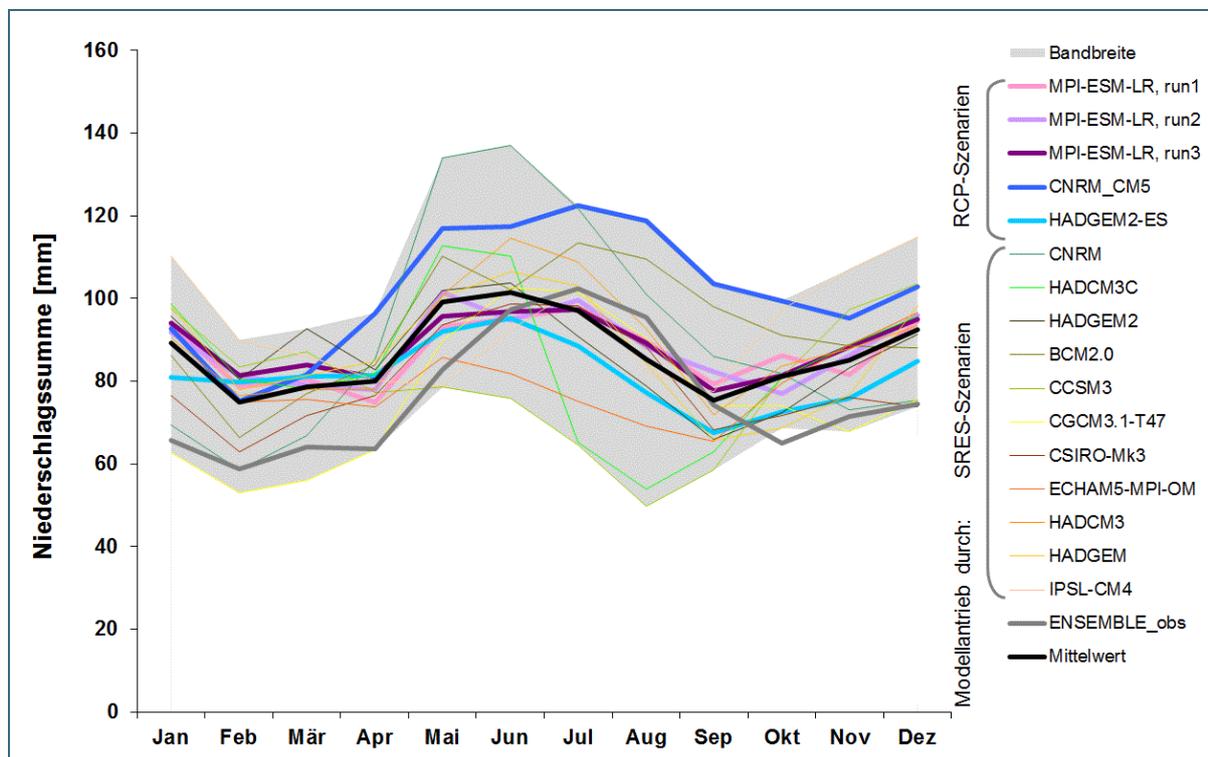


Abb. 19: Vergleich der Niederschlagsjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind 11 Modellläufe mit 20C3M-Antrieb, 5 Modellläufe mit RCP-historical-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE\_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe

### 3.3.2 Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert

Der hier angestellte Vergleich soll zeigen, wie sich die Klimaänderungssignale auf Grundlage der neuen RCP-Szenarien von denen auf Grundlage der SRES-Szenarien in KLIWA I und II (2021-2050 bzw. 2071-2100) unterscheiden. Berücksichtigt werden soll dabei auch der Umstand, dass die einzelnen Szenarien nicht von jedem Globalmodell gerechnet wurden und sich somit sowohl die Modellanzahl innerhalb der Modellensembles als auch deren Zusammensetzung unterscheidet. So setzen sich die Ensemble-Mittelwerte von A1B aus 16 verschiedenen Modellläufen zusammen, die von A2 und B1 aus acht, von RCP4.5 und 8.5 aus fünf und von RCP2.6 aus drei Läufen eines Modells. Ein direkter Vergleich ist daher nur eingeschränkt möglich. Die im Diagramm dargestellten Zahlenwerte finden sich zur ergänzenden Information im Anhang (Tab. A. 3)

Die **Temperatur**änderungssignale gegenüber 1971-2000 liegen in KLIWA I für das Jahres- und die jahreszeitlichen ENSEMBLE-Mittel unter 2 K ohne deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien (Abb. 20). In KLIWA II zeichnet sich hingegen ein starker Temperaturanstieg ab, wobei sich die jeweilige Stärke der Antriebsszenarios durchprägt: RCP8.5 führt als stärkstes Szenario zu den höchsten Änderungssignalen von +4,4 K im Jahresmittel und bis zu +5,4 K im Sommer. Mit Ausnahme des Frühjahrs übersteigt es die Signale des bisherigen „Spitzenreiters“ SRES-Szenario A2 deutlich. Die Ensemble-Mittel der Änderungssignale von A1B ordnen sich leicht unterhalb denen von A2 und zwischen denen von RCP4.5 und RCP8.5 ein. Die Temperaturzunahmen des moderaten Szenarios

RCP4.5 liegen in etwa auf dem Niveau von B1. Die Lage der Temperaturänderungen des schwachen Szenarios RCP2.6 kann nicht hinreichend interpretiert werden, da es auf drei Läufen nur eines Modells beruht.

Bezogen auf Jahreszeiten ergeben sich für SRES-Szenarien in beiden Zeiträumen die höchsten Temperaturzunahmen im Sommer, für die RCP-Szenarien im Sommer oder Winter (Abb. 20). Das Frühjahr besitzt im Allgemeinen die geringsten Änderungssignale.

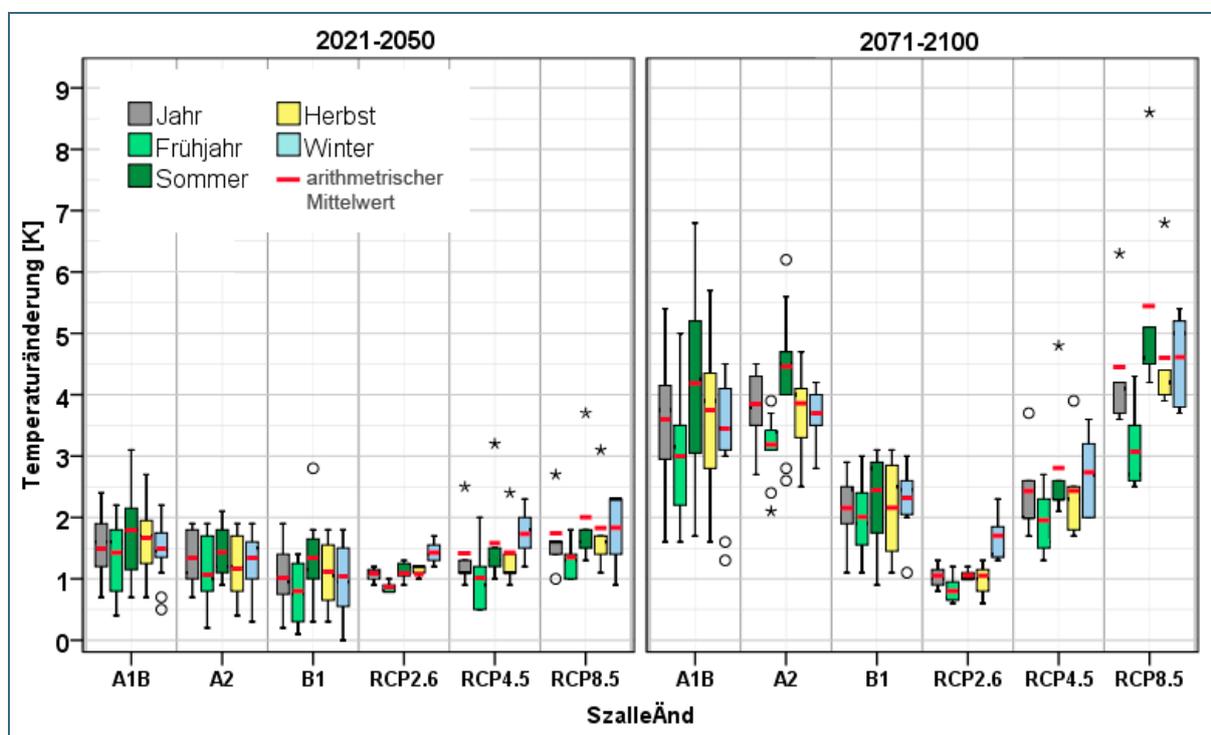


Abb. 20: Temperaturänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensembles aus verschiedenen Anzahlen von Modellläufen (s. Text); Sternchen/ Kreise: Ausreißer

Die mittleren Änderungssignale des **Niederschlags** liegen im Zeitraum 2021-2050 innerhalb des Vertrauensbereiches von  $\pm 10\%$  (Abb. 21) und sind demnach als gering einzustufen. Dabei zeigen die RCP-Szenarien im Winter und Frühjahr meist höhere Werte als die SRES-Szenarien. Im Zeitraum 2071-2100 sind die Änderungssignale ausgeprägter. Allen Szenarien ist das Muster von deutlichen Niederschlagsabnahmen im Sommer gemein: vier von sechs Ensemblemittelwerten betragen mehr als  $-10\%$ . Gleichzeitig zeigen alle Szenarien Zunahmen im Winter und teilweise auch im Frühjahr. Der Herbst wird indifferent wiedergegeben.

Die Einordnung der Ensemble-Mittel der RCP-Szenarien gegenüber denen der SRES-Szenarien folgt weniger einem klaren Muster als dies bei der Temperatur der Fall ist. Die Änderungssignale von RCP4.5 liegen zumeist in der Nähe von B1. Das Szenario mit dem höchsten Strahlungsantrieb, RCP8.5, zeigt im Winter die mit Abstand höchsten Niederschlagszunahmen und ähnelt im Sommer den Abnahmen der SRES-Szenarien A1B und A2.

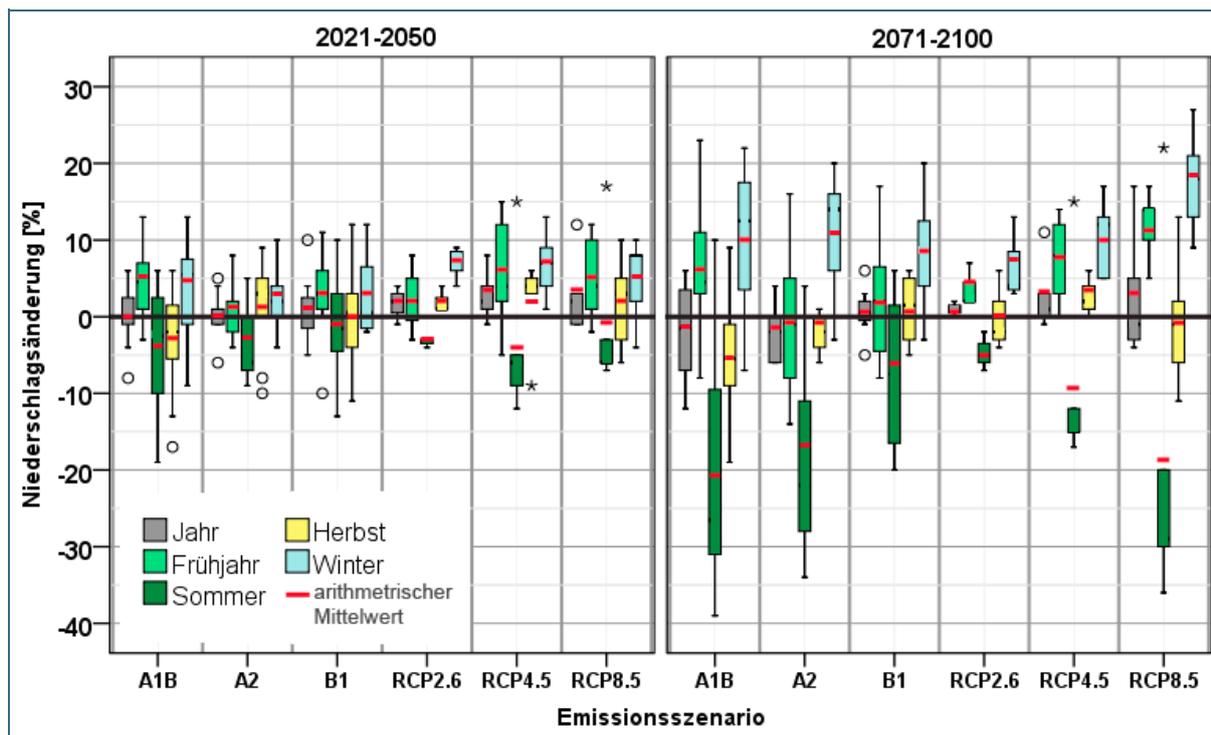


Abb. 21: Niederschlagsänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensembles aus verschiedenen Anzahlen von Modellläufen (s. Text), Sternchen/ Kreise: Ausreißer

Insgesamt erweitert die Hinzunahme der RCP-Szenarien die Spannweiten der Modellausgaben in Temperatur und Niederschlag. Bemerkenswert ist dabei jedoch der Einfluss der Modelle selbst: Die größten Unterschiede innerhalb eines Ensembles bestehen für das Szenario A1B, insbesondere im Zeitraum 2071-2100 (Abb. 20, Abb. 21). Dies ist dadurch bedingt, dass in dieses Ensemble 16 Modellläufe eingehen. Die Spannweiten für die Ensembles der beiden anderen SRES-Szenarien A2 und B1 sind entsprechend geringer. Weiterhin sind in den Ensembles der Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 einzelne Modelle mit sehr hohen Temperaturzunahmen enthalten (Abb. 20) – in den Boxplots sind diese als Ausreißer gekennzeichnet. Diese Modelle ziehen somit sowohl die Spannweiten in die Breite als auch die jeweiligen Ensemble-Mittelwerte nach oben. Es ist daher hier nicht eindeutig abzugrenzen, ob Unterschiede in den Ensembledaten primär vom zugrundeliegenden Antriebsszenario (SRES oder RCP) oder von den Modellen stammen. Vielmehr zeigt sich darin, dass die Anzahl und Charakteristik der mit einem vorgegebenen Antriebsszenario betriebenen Modelle eine ebenso große Rolle spielt, wie die Eigenschaften dieses Antriebsszenarios selbst.

### 3.3.3 Korrelationsanalyse Temperatur- und Niederschlagstrend

Die folgende Korrelationsanalyse stellt die linearen Trends von Temperatur [K/100a] und Niederschlag [%/100a] in den Zeiträumen 19/20C und 21C als Streudiagramm gegenüber. Entsprechend physikalischer Zusammenhänge führt eine erhöhte Temperatur zu verstärkter Verdunstung und damit zu Änderungen des Niederschlagsverhaltens, was sich in den Jahreszeiten unterschiedlich äußert. Die Analyse dient somit der Charakterisierung der Modelle in Hinblick auf die Kopplung von Temperatur und Niederschlag sowie der Einordnung dieses Verhaltens gegenüber den anderen Modellen. Darüber hinaus kann diese Darstellung zur Plausibilitätsabschätzung der projizierten Änderungen genutzt werden. Auch erlaubt sie zukünftig die Identifizierung von Gruppen mit einem ähnlichen Veränderungsverhalten für Temperatur und Niederschlag. Dies kann für die weitere Auswahl und Nutzung der GCMs oder von RCMs basierend auf diesen Modellläufen genutzt werden.

Erwartungsgemäß gibt es in Frühjahr und Herbst keinen direkten Zusammenhang zwischen den Veränderungen des Niederschlags und der Temperatur. Im Winter konnte eine schwache Korrelation ( $R^2 = 0,36$ ) zwischen steigender Temperatur und steigendem Niederschlag festgestellt werden, im Sommer eine etwas größere Korrelation ( $R^2 = 0,52$ ) zwischen den steigenden Temperaturen und sinkendem Niederschlag (Abb. 22 und Abb. 23). Durch die Hinzunahme der RCP-Szenarien haben sich die Korrelationskoeffizienten im Sommer abgeschwächt (zuvor 0,67), im Winter verstärkt (zuvor 0,28). Die Ursachen sind in beiden Fällen vor allem die Ergebnisse der Modellläufe mit RCP8.5. Die Modellläufe mit diesem Antrieb heben sich besonders im Winter (Abb. 23) deutlich von den anderen Modellläufen ab: Sie zeigen sowohl hohe positive Temperatur- als auch Niederschlagstrends. Eine Unterscheidung der anderen Antriebsszenarien ist nicht so eindeutig möglich.

Bei Untersuchung der hydrologischen Halbjahre ist nur im Winterhalbjahr eine schwache Korrelation erkennbar ( $R^2 = 0,27$ ), während im hydrologischen Sommerhalbjahr kein Zusammenhang sichtbar wird ( $R^2 = 0,04$ ).

Bei Betrachtung einzelner Modelle hebt sich beispielsweise die Zukunftsprojektion von CNRM-CM5 im Szenario RCP8.5 von den anderen Modellen ab: Während der überwiegende Teil der anderen Modellläufe im Sommer (Abb. 22) bei steigender Temperatur eine Niederschlagsabnahme zeigt, ist die Temperaturzunahme gleichsam mit einer Niederschlagszunahme gekoppelt. Ein solches Verhalten steht ebenso den in Bayern beobachteten Trends in der Vergangenheit entgegen. Die Ergebnisse dieses Laufs von CNRM-CM5 müssten demnach auf ihre Eignung für weiterführende Modelle geprüft und ggf. ausgeschlossen werden. Im Vergleich dazu gruppieren sich die Trendbeziehungen von MPI-ESM-LR um die Trendgerade, zeigen also die erwarteten Zusammenhänge, die sich aus dem Ensemble ableiten lassen.

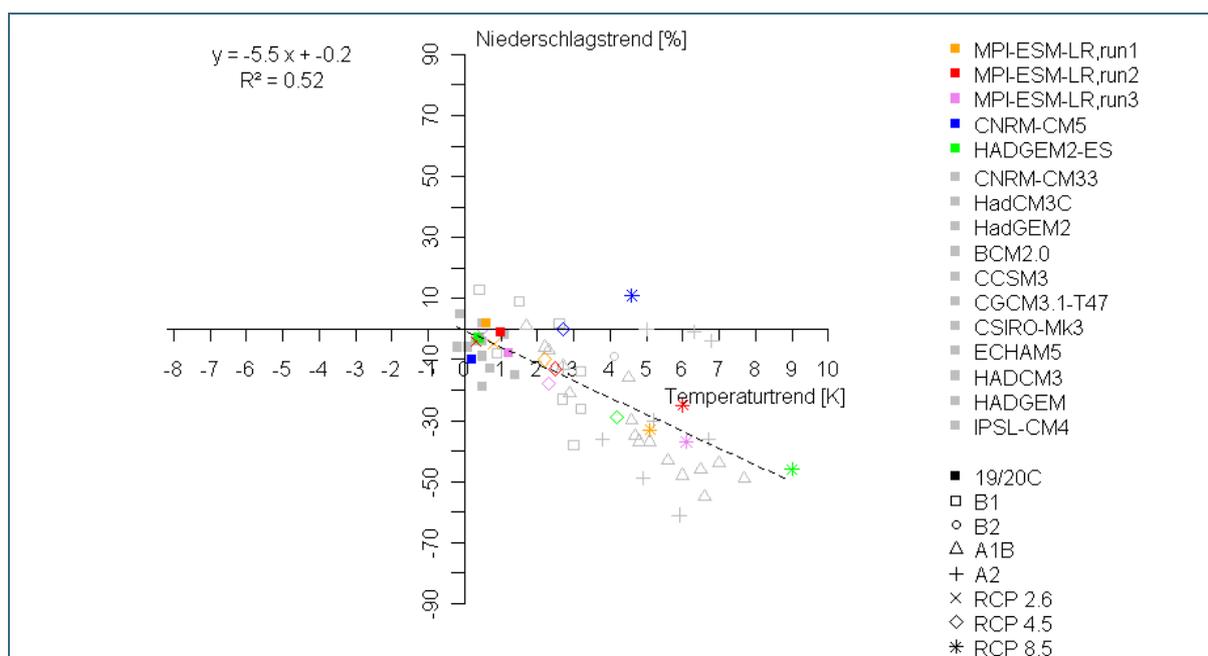


Abb. 22: Temperatur- und Niederschlagstrends für den Sommer; Kombinierte Darstellung für alle untersuchten Modellläufe, grau: Modellläufe auf Grundlage von SRES-Szenarien. Farbig abgesetzt: Modelle auf Grundlage von RCP-Szenarien. Gestrichelte Linie: linearer Trend aller Werte

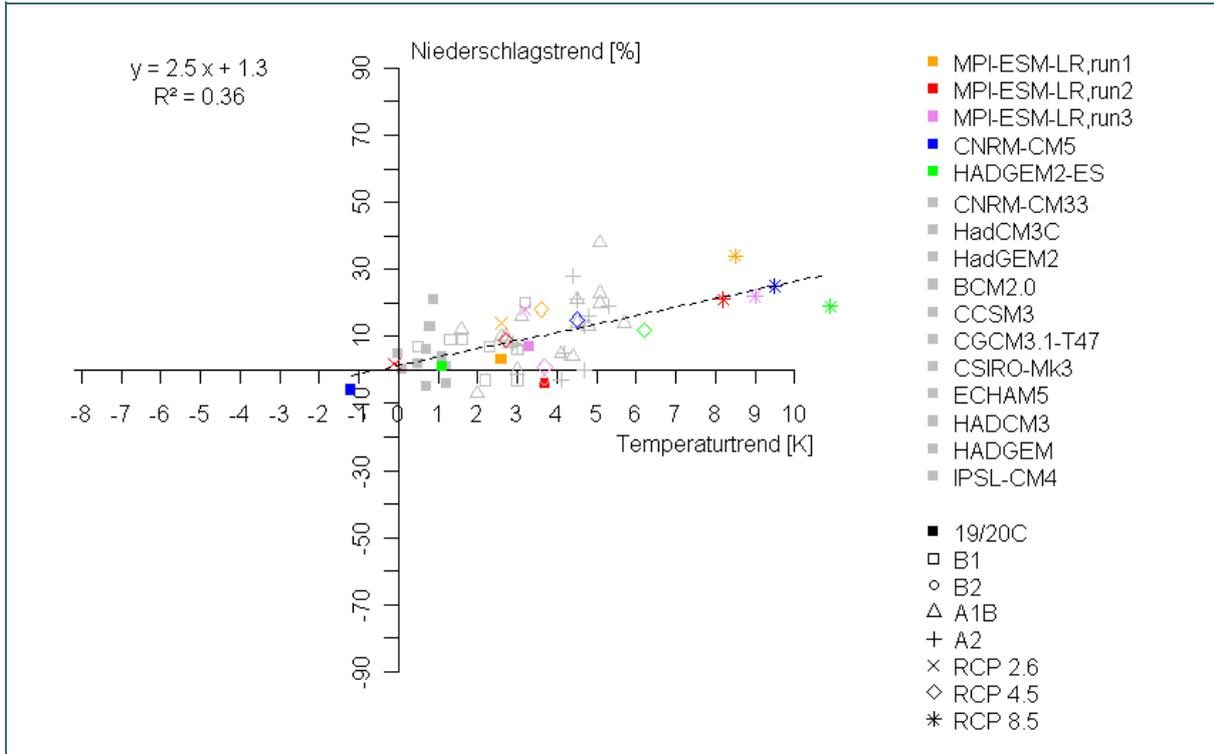


Abb. 23: Temperatur- und Niederschlagstrends für den Winter; Kombinierte Darstellung für alle untersuchten Modellläufe, grau: Modellläufe auf Grundlage von SRES-Szenarien. Farbig abgesetzt: Modelle auf Grundlage von RCP-Szenarien. Gestrichelte Linie: linearer Trend aller Werte

### 3.4 Einordnung der Simulationen von ECHAM5/MPI-ESM-LR

Das Globalmodell ECHAM5 dient in Deutschland bisher als das vorrangige Antriebsmodell für Regionale Klimamodelle, so auch für die innerhalb des KLIWA-Projektes schwerpunktmäßig verwendeten Regionalmodelle, wie beispielsweise WETTREG oder (COSMO-)CLM. Der Nachfolger von ECHAM5, das MPI-ESM-LR („ECHAM6“), wird daher sicherlich auch für neue regionale Klimaprojektionen basierend auf den RCPs ein häufig genutztes Modell sein. Die Charakteristika von ECHAM5 und MPI-ESM-LR im Vergleich untereinander und zu anderen Globalmodellen sind daher von besonderem Interesse.

#### 3.4.1 Ausgangsniveau und Verläufe der modellierten Zeitreihen 1871-2100

Die Einordnung der ECHAM5/MPI-ESM-LR-Läufe im Ensemble aller verfügbarer Globalmodelle und Szenarien wird hier exemplarisch anhand der Verläufe von Jahresmitteltemperatur (Abb. 24) und Jahresniederschlagssumme (Abb. 25) gezeigt. Ebenso werden die beiden Globalmodelle untereinander sowie mit dem Bezugsdatensatz  $E_{\text{obs}}$  verglichen. Untereinander zeigen sich zwischen den beiden Globalmodellen ECHAM5 und MPI-ESM-LR Unterschiede im Niveau bei der Jahrestemperatur und im Jahresniederschlag, was darauf hinweist, dass sich die beiden Modelle in ihren Algorithmen unterscheiden.

In Hinblick auf die Jahresmitteltemperatur (Abb. 24) ordnen sich die beiden Modelle in etwa um den Ensemble-Mittelwert (ECHAM5) bzw. im oberen Drittel (MPI-ESM-LR) der Ensemble-Bandbreite ein. Im Vergleich untereinander sind die historischen RCP-Läufe bereits leicht wärmer als die ECHAM5-Läufe. Somit ergibt sich für die Jahrestemperatur um die Jahrhundertwende 1985-2015 (30-jähriges, gleitendes Mittel) schon ein unterschiedliches Ausgangsniveau, auf dem die Modellierung für die Zukunftsszenarien aufsetzt. Es bleibt zwar zu prüfen, wie sich diese Unterschiede in den verschiedenen Regionalen Klimamodellen ausprägen, jedoch ist sicherlich zu erwarten, dass sich dieser Unterschied zeigen wird.

Bei der Jahresniederschlagssumme (Abb. 25) ist ebenso ein Unterschied zwischen beiden Globalen Klimamodellen zu beobachten. So liegt MPI-ESM-LR etwas oberhalb des Ensemblemittelwerts, während ECHAM5 deutlich geringere Werte modelliert und sich somit klar auf einem niedrigeren Ausgangsniveau befindet. Auch hier ist zu erwarten, dass sich dies auch in den Regionalen Klimamodellen widerspiegeln wird.

Durch die Verwendung von jeweils drei Läufen zeigt sich weiterhin die modellinterne Variabilität der beiden Globalmodelle. Beispielsweise beträgt die Bandbreite des 30-jährigen gleitenden Mittels des Niederschlags für das Szenario RCP8.5 bis zu 104 mm, für das SRES-Szenario B1 bis zu 102 mm. Die beiden Modelle geben damit in etwa die natürliche Variabilität von 10 % wieder.

Verglichen mit dem 30-jährigen Mittelwert des  $E_{\text{obs}}$ -Datensatzes für 1971-2000 liegt die simulierte Temperatur (Abb. 24) bei ECHAM5 niedriger, bei MPI-ESM-LR ungefähr im Bereich der Beobachtung von 8 °C. Hinsichtlich des Niederschlages (Abb. 25) geben beide Modelle höhere Niederschläge als die Beobachtung (915 mm) an, was aber auch darin begründet liegt, dass in den  $E_{\text{obs}}$ -Datensatz unkorrigierte, also zu niedrige, Niederschlagsmengen eingehen.

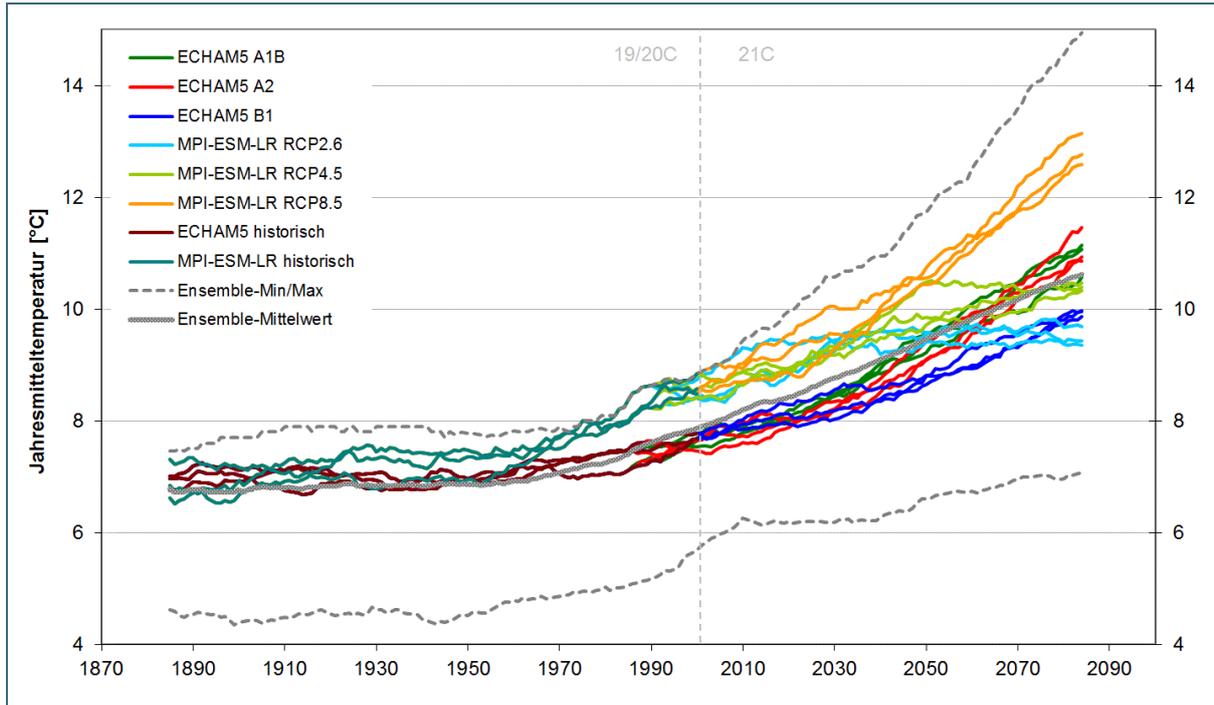


Abb. 24: Verläufe der Jahresmitteltemperatur im 30-jährigen gleitenden Mittel für die Läufe 1-3 von ECHAM5 und MPI-ESM-LR im Vergleich zu Mittelwert, Minimum und Maximum aller Modelle (Ensemble) sowie dem Bezugsdatensatz  $E_{obs}$

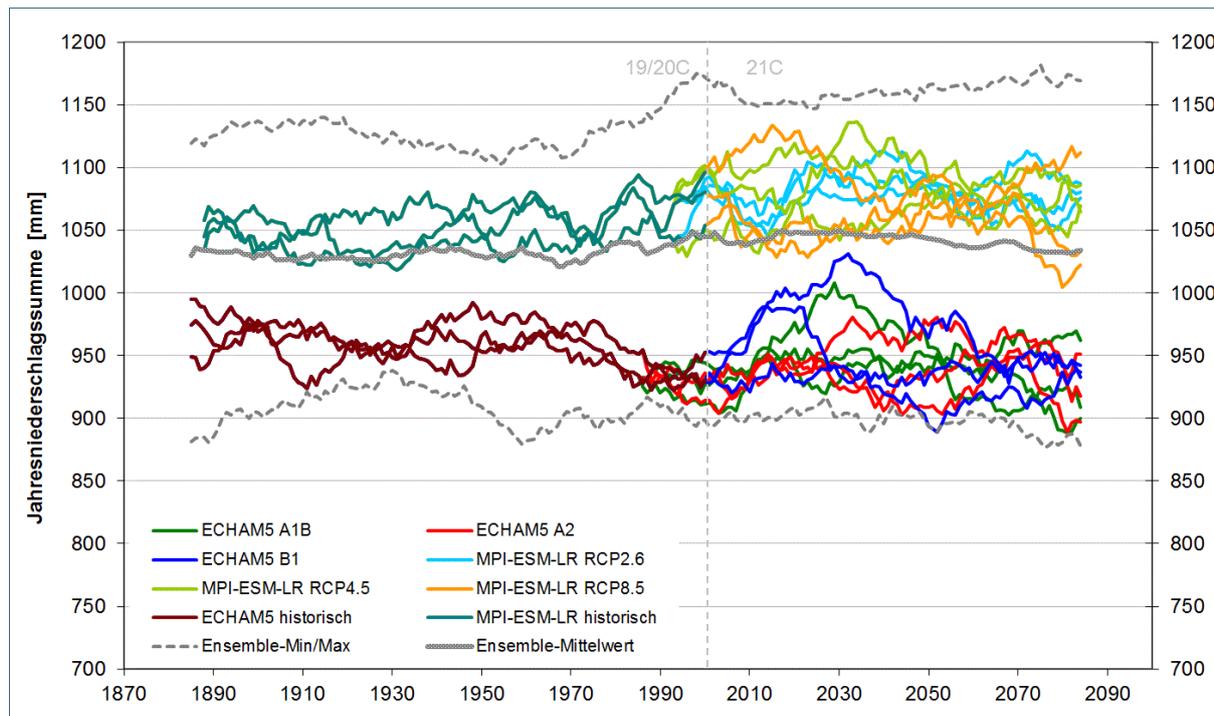


Abb. 25: Verläufe der Jahresniederschlagssumme im 30-jährigen gleitenden Mittel für die Läufe 1-3 von ECHAM5 und MPI-ESM-LR im Vergleich zu Mittelwert, Minimum und Maximum aller Modelle (Ensemble) sowie dem Bezugsdatensatz  $E_{obs}$

### 3.4.2 Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse im 19./20. und 21. Jahrhundert

An dieser Stelle wird die durch ECHAM5 und MPI-ESM-LR modellierte Entwicklung von Temperatur und Niederschlag der Entwicklung durch das Ensemble aller Modelle gegenübergestellt und auch untereinander verglichen. Dabei wurde die Angabe linearer Trends anstatt von Änderungssignalen gewählt, um auch die Vergangenheit betrachten zu können. Die Einordnung geschieht gegenüber dem mittleren Trend aller 16 betrachteten Modellläufe.

Die Richtung der **Temperaturentwicklungen** von ECHAM5 und MPI-ESM-LR in Vergangenheit und Zukunft geht im Allgemeinen mit der Temperaturentwicklung des Ensembles einher (Tab. 13). Auch sind die linearen Temperaturtrends in nahezu allen Szenarien und Jahreszeiten signifikant (nicht dargestellt). Die Stärke der Signale bei den beiden Modellen unterscheidet sich jedoch, vor allem in den Jahreszeiten. So nehmen die linearen Temperaturtrends der Vergangenheit bei ECHAM5 zwar im Jahr, Sommer und Winter Werte nahe den mittleren Trends des Ensembles an, heben sich aber insbesondere im Frühjahr (+1,5 K gegenüber +0,4 K) und Herbst (-0,1 K gegenüber +0,5 K) ab. Die Trends von MPI-ESM-LR liegen in allen Jahreszeiten und Läufen deutlich über dem Ensemble-Mittel und sind, abgesehen vom Frühjahr, stärker als die Trends von ECHAM5. Im Zeitraum 21C deckt sich das Mittel der linearen Trends der drei ECHAM5-Läufe in nahezu allen Jahreszeiten relativ gut mit dem Mittel der Trends aller Modelle. Ausnahme bildet der Herbst mit höheren Werten. Dagegen zeigt MPI-ESM-LR im Mittel zumeist geringere Trends als das Gesamt-Ensemble und ECHAM5. Lediglich der Winter hebt sich mit deutlich höheren Temperaturzunahmen markant ab. Das Verhalten der vergleichsweise meist geringeren Trends von MPI-ESM-LR erklärt sich aus dem Verlauf der zugrunde gelegten Strahlungsantriebe: Die Anstiege von RCP2.6 und RCP4.5 schwächen sich ab Mitte des 21. Jahrhunderts ab (Abb. 3), was sich in den Temperaturverläufen (Abb. 24) und damit auch den Ensemble-Mittelwerten (Tab. 13) der Trends von MPI-ESM-LR niederschlägt. Dagegen liegt mit dem RCP8.5 ein Antrieb vor, der besonders im Sommer und Winter bei MPI-ESM-LR zu deutlich höheren Anstiegen führt, als bisher bei allen SRES-Läufen mit ECHAM5 zu beobachten. Auch hier unterscheiden sich die beiden Globalmodellen untereinander.

Im Zeitraum 19/20C bewegen sich die linearen **Niederschlagstrends** von ECHAM5, außer im Sommer, in allen Jahreszeiten innerhalb des Vertrauensbereiches von  $\pm 10\%$ . Überwiegend sind sie negativ und bewegen sich damit unterhalb des Ensemble-Mittels aller Modelle. MPI-ESM-LR zeigt dagegen kaum einen Niederschlagstrend und geht damit mit dem Ensemble-Mittel einher. Die linearen Niederschlagstrends der Zukunft (Zeitraum 21C) besitzen im Ensemble-Mittel ein Muster, dem auch ECHAM5 und MPI-ESM-LR folgen: Im Jahr und den Übergangsjahreszeiten ist keine eindeutige Änderung zu verzeichnen, während die sommerlichen Trends auf Abnahmen, die winterlichen Trends auf Zunahmen des Niederschlags deuten. In diesen beiden Jahreszeiten konnten auch signifikante Trends in den einzelnen Modellläufen festgestellt werden. Sie äußern sich vor allem bei den Läufen mit höheren (Emissions-)szenarien (nicht dargestellt). Im Vergleich beider Modelle ergeben sich mit ECHAM5 im Sommer stärkere Abnahmen als mit MPI-ESM-LR. Im Winter verhalten sich beide Modelle mit leichten Zunahmen ähnlich.

Tab. 13: Lineare Trends von Temperatur und Niederschlag von ECHAM5/ MPI-ESM-LR sowie zum Vergleich lineare Trends der Ensembles aller Modelle und Szenarien in 19/20C (1871-2000) und 21C (2001-2100)

		Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
<b>Linearer Temperaturtrend [K/130a] (Vergangenheit) bzw. [K/100a] (Zukunft)</b>						
ECHAM5 19/20C	Mittel	+0,7	+1,5	+0,3	-0,1	+1,2
MPI-ESM-LR 19/20C	von-bis	+1,0 bis +1,2	+0,6 bis +0,9	+0,6 bis +1,2	+1,1 bis +1,5	+2,6 bis +3,7
	Mittel	+1,1	+0,8	+0,9	+1,3	+3,2
<b>Ensemble 19/20C</b>	<b>Mittel</b>	<b>+0,6</b>	<b>+0,4</b>	<b>+0,5</b>	<b>+0,5</b>	<b>+1,1</b>
ECHAM5 21C	B1	+2,3 bis +3,0	+1,7 bis +2,4	+2,7 bis +3,2	+2,1 bis +3,3	+2,3 bis +3,0
	A1B	+3,8 bis +4,5	+2,2 bis +3,1	+4,6 bis 5,1	+3,9 bis +4,5	+4,5 bis +5,7
	A2	+4,6 bis +4,8	+3,9 bis 4,0	+4,9 bis 5,2	+4,8 bis +5,0	+4,7 bis +5,3
	Mittel	+3,8	+2,9	+4,3	+4,0	+4,2
MPI-ESM-LR 21C	RCP2.6	+0,2 bis +0,9	+0,1 bis +0,6	+0,3 bis +0,8	+0,2 bis +0,5	-0,1 bis +3,2
	RCP4.5	+1,9 bis +2,0	+1,4 bis +1,6	+2,2 bis +2,5	+1,8 bis +2,2	+2,7 bis +3,7
	RCP8.5	+4,3 bis +4,5	+2,4 bis +2,9	+5,1 bis +6,1	+4,7 bis +5,1	+8,2 bis +9,0
	Mittel	+2,9	+2	+3,6	+3,0	+5,6
<b>Ensemble 21C</b>	<b>Mittel</b>	<b>+3,4</b>	<b>+2,8</b>	<b>+4,1</b>	<b>+3,5</b>	<b>+4,1</b>
<b>Linearer Niederschlagstrend [%/130a] (Vergangenheit) bzw. [%/100a] (Zukunft)</b>						
ECHAM5 19/20C	Mittel	-6	-18	-4	-5	+1
MPI-ESM-LR 19/20C	von-bis	+2 bis +5	+6 bis +16	-8 bis +2	-5 bis +4	-4 bis +7
	Mittel	+3	+12	-2	0	+2
<b>Ensemble 19/20C</b>	<b>Mittel</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>-6</b>	<b>+1</b>	<b>+3</b>
ECHAM5 21C	B1	-7 bis -1	-11 bis +13	-38 bis -14	-12 bis +2	-3 bis +7
	A1B	-8 bis +5	-6 bis +15	-37 bis -30	-15 bis +9	+14 bis +21
	A2	-4 bis -1	-13 bis -3	-36 bis -30	-8 bis +4	+16 bis +28
	Mittel	-4	+1	-31	-3	+14
MPI-ESM-LR 21C	RCP2.6	-3 bis +3	-7 bis +9	-5 bis -2	-12 bis -3	+2 bis +18
	RCP4.5	-5 bis 0	-5 bis +8	-18 bis -10	-6 bis -4	+1 bis +18
	RCP8.5	-3 bis 0	-1 bis +15	-37 bis -25	-8 bis -5	+21 bis +34
	Mittel	-1	+2	-16	-3	+16
<b>Ensemble 21C</b>	<b>Mittel</b>	<b>-2</b>	<b>+1</b>	<b>-22</b>	<b>-3</b>	<b>+12</b>

## 4 Schlussfolgerungen

### 4.1 Unsicherheiten der Klimamodellierung

Die Ableitung der zukünftigen klimatischen Entwicklung folgt Modellketten aus verschiedenen möglichen Antriebsszenarien sowie Kombinationen von Globalen und Regionalen Klimamodellen. Für Aussagen zu den Auswirkungen der Klimaänderungen kommen ggf. noch Wirkmodelle, beispielsweise Wasserhaushaltsmodelle zu der Modellkette hinzu. Die Unsicherheiten der Aussagen wachsen entsprechend mit jedem hinzukommenden Glied (Abb. 26). Dabei dürfen die einzelnen Klimasimulationen nicht als konkrete Prognose oder Vorhersage verstanden werden, sondern als jeweils beispielhafte und auf definierten Grundannahmen basierende, klimatische Entwicklungen. Nach wie vor mangelt es in einigen komplexen Bereichen des globalen Klimasystems (beispielsweise den Permafrostböden), an Erfahrungswerten zu Rückkopplungen und Mechanismen. Dadurch, und nicht zuletzt auch aufgrund der naturgemäß limitierten Datenverfügbarkeit, sind Klimamodelle nur eingeschränkt in der Lage, alle Prozesse adäquat zu berücksichtigen. Diese Umstände sind die wesentliche Ursache der bestehenden Unsicherheiten.

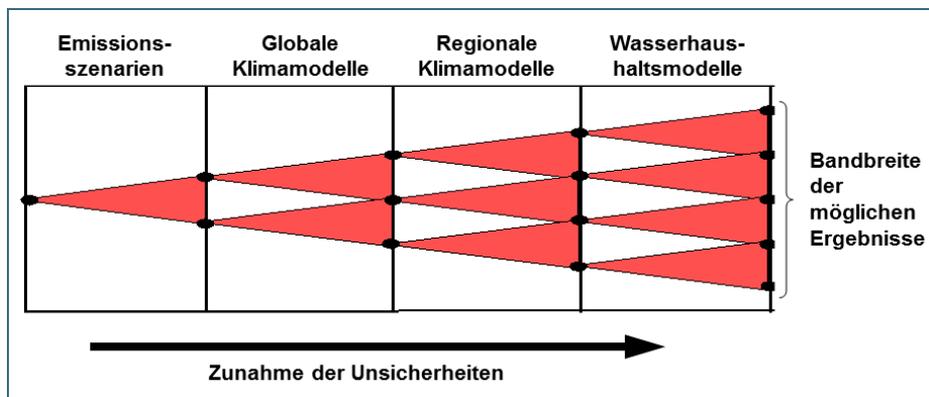


Abb. 26:  
Schema der Zunahme der Unsicherheiten von Modellergebnissen (Knotenpunkte) am Beispiel der Modellkette für Wasserhaushaltsmodellierungen

Bereits durch die Betrachtung von verschiedenen Antriebsszenarien entstehen mehrere Entwicklungsmöglichkeiten. Daraus berechnen die Globalmodelle als zweites Glied der Kette die klimatische Entwicklung im 21. Jahrhundert. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden 16 Modellläufe näher betrachtet. Sie können zwar nicht den gesamten Rahmen an möglichen Klimaentwicklungen umfassen, geben jedoch bereits einen guten Überblick über die Bandbreite der potentiellen klimatischen Zukunft (siehe auch Tab. 14). Verschiedene, möglichst vielfältige Ausprägungen dieser unterschiedlichen Entwicklungen können dann dazu verwendet werden, einen Rahmen für die Erarbeitung von Handlungsoptionen aufzuspannen.

Dabei hat die Modellauswahl einen großen Einfluss auf die in diesem Bericht ermittelten statistischen Größen. Die verschiedenen Modellsimulationen unterscheiden sich hinsichtlich des Ausgangsniveaus sowie der Richtung, des Ausmaßes und der Geschwindigkeit der projizierten Entwicklung, was die Interpretation erschwert. So ist im Zeitraum 19/20C, wo ein einheitlicher Antrieb vorliegt, die Bandbreite der modellierten Jahresmitteltemperaturen umso größer, je höher die Anzahl der ins Ensemble eingehenden Modelle ist (vgl. Abb. 8). Ebenso beeinflusst die Wahl einzelner Modelle die Lage des Ensemble-Mittelwertes oder der Bandbreite einer Klimagröße zum Teil erheblich (siehe Kapitel 3.2.2). Auch zeigen die Auswertungen von Änderungssignalen, dass die Wahl des Globalen Klimamodells entscheidender sein kann als die Wahl eines Antriebszenarios. Die ermittelten Spannweiten der Änderungssignale durch die Modelle sind größer als die Spannweiten durch die Antriebsszenarios und überlappen in großem Maße (z. B. Kapitel 3.2.2). Im Vergleich zur Ensemble-internen Variabilität ist

die modellinterne Variabilität dagegen gering, was am Beispiel von ECHAM5 und MPI-ESM-LR nachgewiesen werden konnte.

Die Mehrzahl der Globalmodelle projiziert eine Zunahme der Winterniederschläge bei gleichzeitig höheren Temperaturen. Die damit unter Umständen verbundenen Veränderungen der Anteile verschiedener Niederschlagsarten (z. B. weniger Schnee, mehr Regen, siehe auch [22]) können hier nicht weiter beurteilt werden. Für die Anwendung von Modellergebnissen bei Wasserhaushaltsmodellierungen oder Hochwasserprojektionen (z. B. Schneeschmelzhochwasser) zieht dies weitere Unsicherheiten nach sich.

Weitere Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen klimatischen Entwicklung müssen im Rahmen einer sorgfältigen Interpretation der Modellergebnisse berücksichtigt werden. Wichtige Aspekte ergeben sich dabei aus der jahreszeitlichen und regionalen Differenzierung. So empfiehlt sich eine Betrachtung der einzelnen Trends verschiedener Parameter im jahreszeitlichen Verlauf, um eine mögliche kombinierte Wirkung wie z. B. die erhöhte Verdunstung bei Temperaturzunahme im Sommer, berücksichtigen zu können. Hierbei sollten auch weitere relevante Klimaparameter betrachtet werden. Bei einer Betrachtung von verschiedenen Teilregionen ist es aufgrund der Vielfalt an geographischen Ausgangsbedingungen nicht zwangsläufig zu erwarten, dass sich eine allgemein festgestellte Grundtendenz im gesamten Untersuchungsgebiet gleichermaßen bemerkbar macht.

Die verfügbaren Globalmodelle unterliegen einer beständigen Weiterentwicklung. So flossen in die vorliegenden Berichte einerseits Auswertungen zu den Modellen ECHAM5-MPI-OM, CNRM und HadGEM2 auf Grundlage von SRES-Szenarien ein, andererseits Auswertungen zu den jeweiligen Nachfolgemodellen MPI-ESM-LR, CNRM-CM5, HadGEM2-ES, betrieben mit RCP-Szenarien. Bei dem exemplarischen Vergleich von ECHAM5/MPI-ESM-LR konnte anhand des Niederschlags gezeigt werden, dass konzeptionelle Unterschiede in der Berechnungsmethodik bestehen, die sich in unterschiedlichen Ausgangsniveaus beider Modelle im 19/20C-Lauf äußern. Dieser Umstand ist bei Vergleichen zwischen SRES- und RCP-Szenarien zu beachten, selbst wenn ein (scheinbar) fast gleiches Modell verwendet wird. Die modellinterne Variabilität ist positiv zu bewerten sofern sie, wie bei ECHAM5/MPI-ESM-LR, die natürliche Variabilität abbildet. Allerdings birgt dies zusätzliche Unsicherheiten, die zu berücksichtigen sind.

## 4.2 Veränderungen bis Ende des 21. Jahrhunderts

Auf Grundlage globaler Klimamodelle ist es nicht möglich, regionalklimatische Besonderheiten zu berücksichtigen, doch liefern die GCM die notwendigen Randbedingungen für die regionale Klimamodellierung. Dabei kann der Bezug auf die durch verschiedene globale Modelle projizierte klimatische Bandbreite Hinweise darüber liefern, welche Entwicklungen wahrscheinlich, bzw. welche eher unsicher sind und wo sich die einzelnen globalen Klimamodelle als Antriebe einsortieren. Somit ist eine gezieltere Auswahl von mittleren Szenarien oder auch eine bewusste Auswahl extremer Szenarien für bestimmte Fragestellungen möglich. Auch ist es eine Hilfestellung bei dem Versuch, die Bandbreite der denkbaren Veränderungen mit gezielt ausgewählten Klimaprojektionen abzudecken.

Aus den Untersuchungen für den Zeitraum 2001-2100 ergibt sich für das SRES-Ensemble, dass die **Temperaturen** in allen Modellen abhängig vom gewählten SRES-Emissionsszenario hoch signifikant ansteigen (vgl. Kap. 3.1.2). Die Kurvenverläufe der Temperatur lassen dabei näherungsweise die Kurvenverläufe der Emissionsszenarien erkennen. In den SRES-Ensemblemitteln der Jahresmitteltemperatur hebt sich das schwache Emissionsszenario B1 mit einem nur moderaten Anstieg deutlich von A1B und A2 ab (Tab. 14). Aufgrund der höheren Modellanzahl ergibt sich für das SRES-A1B eine größere Spannweite. Das betrachtete RCP-Ensemble zeigt ebenfalls signifikante Zunahmen (vgl.

Kap. 3.2.2). Diese passen gut in das Muster der SRES-Modelle, auch wenn die Modellanzahlen geringer sind.

Zwischen den beiden KLIWA-Zeiträumen erhöhen sich die Temperaturen durch den signifikanten Trend weiter, so dass sich für die Jahresmitteltemperatur aus allen Ensemblemitteln in KLIWA II (2071-2100) eine merklich stärkere maximale Änderung (RCP8.5) als für KLIWA I (2021-2050) ergibt. Gleichsam vergrößert sich die Spannweite zwischen minimalem und maximalem Änderungssignal - sowohl in den Ensemble-Mitteln als auch den einzelnen Modellen. Für die einzelnen Modelle gibt CSIRO-MK3 (B1) in KLIWA I und MPI-ESM-LR (run1: RCP2.6) in KLIWA II das geringste Änderungssignal an. Dagegen besitzt HadGEM2-ES (RCP8.5) in beiden Zeiträumen das stärkste Signal. Dies wird noch deutlicher im Sommer. Auch hier modelliert dieses Modell für KLIWA II die stärksten Temperaturzunahmen aller untersuchten Modelle mit z.B. +9,7°C im August. (vgl. Tab. A. 4, Tab. A. 5)

Tab. 14: Vergleich der Änderungssignale der Jahresmitteltemperaturen in den verschiedenen Antriebsszenarien bzw. einzelnen Modellen; Kriterien: linearer Trend und Änderungssignal in den KLIWA-Zeiträumen

	Betrachtungsebene	Änderungssignal [K] (Absolutwert oder Spannweite)
<b>Linearer Trend [K/100a]</b>		
Ensemble-Mittel (2000-2100)	SRES	+2,1 (B1) +3,9 (A1B) +4,5 (A2)
	RCP	+0,6 (RCP2.6) +2,2 (RCP4.5) +4,9 (RCP8.5)
<b>Spannweite Änderungssignal [K]</b>		
KLIWA I (2021-2050 vs. 1971-2000)	Ensemble-Mittel	+1,0 (B1) bis +1,7 (RCP8.5)
	Einzelmodelle (alle Läufe und Szenarien)	+0,2 (CSIRO-MK3: B1) bis +2,7 (HadGEM2-ES: RCP8.5)
KLIWA II (2071-2100 vs. 1971-2000)	Ensemble-Mittel	+1,0 (RCP2.6) bis +4,4 (RCP8.5)
	Einzelmodelle (alle Läufe und Szenarien)	+0,8 (MPI-ESM-LR, run1: RCP2.6) bis 6,3 (HadGEM2-ES: RCP8.5)

Für die jährliche **Niederschlagssumme** sind die Veränderungen mit  $\pm 10\%$  eher gering. Sie bilden sich dagegen deutlich im Jahresgang aus, besonders ausgeprägt im Sommer und Winter. Generell zeigen die Modelle im Sommer eine Abnahme und im Winter eine Zunahme (Tab. 15). Für KLIWA I ergeben sich aus den Ensemblemitteln im Sommer geringe Abnahmen des Niederschlags. Für die einzelnen Modelle erhöht sich allerdings die Spannweite deutlich, auch in den Bereich von Zunahmen hinein (durch CNRM-CM5: RCP8.5). Im Winter geben in KLIWA I alle Ensemblemittel nahezu keine Veränderungen (A1B & A2) oder geringfügige Zunahmen (RCP4.5) wieder. Allerdings steigt auch hier die Spannweite erheblich bei Betrachtung der einzelnen Modelle (siehe auch Tab. A. 6).

Für KLIWA II ergaben sich insgesamt stärkere Veränderungen des Niederschlags in den Jahreszeiten. Die sommerlichen Änderungen in den SRES-Ensemblemitteln fallen wiederum höher aus als in den RCP-Ensemblemitteln (Tab. 15). Die Spannweite in den Änderungen aller einzelnen Modelle bewegt sich zwischen deutlichen Abnahmen (HadGEM2, run1: A1B und HadCM3C: A1B) und moderaten Zunahmen (CNRM-CM5: RCP4.5, siehe auch Tab. A. 7). Im Winter verdeutlichen sich die bereits in KLIWA I tendenziellen Zunahmen des Niederschlags. Auch hier sind die Signale der SRES-Ensemblemittel ausgeprägter als bei den RCP-Ensemblemitteln. Dies kann allerdings unter Umständen an der geringeren untersuchten Modellanzahl für die RCPs liegen. Über die einzelnen Modelle betrachtet, spannen sich die Änderungssignale für den Niederschlag im Winter zwischen IPSL-CM4

(A1B) und MPI-ESM-LR (run2: RCP8.5) auf. Auffällig ist hierbei, dass – obwohl die Ensembledaten generelle Tendenzen für die Jahreszeiten zeigen – verschiedene Globale Klimamodelle auch deutlich andere Veränderungen in den jeweiligen Jahreszeiten modellieren. Auch dies zeigt, dass in Regionalen Klimamodellen bewusst mehrere Globalmodellantriebe genutzt werden sollten, um ein nicht zu einseitiges Bild zu erhalten.

Tab. 15: Vergleich der Änderungssignale der Sommer- und Winterniederschlagssummen (meteorologische Quartale) in den verschiedenen Antriebsszenarien bzw. einzelnen Modellen

	Jahreszeit	Grenzen	Änderungssignal [%]	Szenario bzw. Modell
<b>KLIWA I (2021-2050 vs. 1971-2000)</b>				
Ensemble-Mittel	Sommer	Min	-4	A1B
		Max	-1	B1 & RCP8.5
	Winter	Min	±0	A1B & A2
		Max	+6	RCP4.5
Einzelmodelle (alle Läufe und Szenarien)	Sommer	Min	-19	HadGEM2, run2: A1B
		Max	+17	CNRM-CM5: RCP8.5
	Winter	Min	-9	IPSL-CM4: A2
		Max	+13	ECHAM5, run2: A1B HadGEM2-ES: RCP4.5
<b>KLIWA II (2071-2100 vs. 1971-2000)</b>				
Ensemble-Mittel	Sommer	Min	-7 bzw. -5	B1 bzw. RCP2.6
		Max	-21 bzw. -19	A1B bzw. RCP8.5
	Winter	Min	+25 bzw. +1	B1 bzw. RCP2.6
		Max	+31 bzw. +21	A1B bzw. RCP 8.5
Einzelmodelle (alle Läufe und Szenarien)	Sommer	Min	-39	HadGEM2, run1: A1B HadCM3C: A1B
		Max	+15	CNRM-CM5: RCP4.5
	Winter	Min	-7	IPSL-CM4: A1B
		Max	+27	MPI-ESM-LR, run2: RCP8.5

Für eine Auswahl von Globalmodellen, die man in ihren Modellketten weiter nutzen möchte, kann die in diesem Vergleich ermittelte Spannweite der Änderungssignale wichtig sein. Je nach Fragestellung kann, beispielsweise, das Maximum einer Veränderung in Temperatur oder Niederschlag interessieren oder ein Grund für das Ausklammern dieser Modelle sein. Je nach betrachtetem Zeitraum spielt hierbei natürlich auch das jeweilige Antriebsszenario (SRES oder RCP) eine Rolle. Dieser Vergleich bestätigte aber auch, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts die modellierten Verläufe noch relativ eng beieinander liegen und vordringlich vom gewählten Modell statt vom dem gewählten Antriebsszenario abhängig sind. Nach der Mitte des 21. Jahrhunderts spielt dagegen immer mehr das Antriebsszenario eine gewichtige Rolle. Insgesamt zeigte sich bei den SRES-Szenarien für die beiden KLIWA-Zeiträume, dass HadCM3 und IPSL-CM4 die größten Temperaturzunahmen und BCM2.0 die geringsten Veränderungen modellierten. Bei den Niederschlagsveränderungen ergaben HadCM3 und die ECHAM5-Läufe die größten sommerlichen Abnahmen sowie BCM2.0 und vor allem ECHAM5 Lauf 2 und 3 starke winterliche Niederschlagszunahmen. IPSL-CM4 weist für den Winterniederschlag in beiden Zeiträumen die größten Abnahmen aller Globalmodelle auf, allerdings bei verschiedenen SRES-Szenarien. Bei den RCP-Modellen zeigt sich HadGEM2-ES als das Modell mit dem größten Erwärmungstrend, während CNRM-CM5 einen eher geringen Trend modelliert. Im Sommer erzeugt vor allem HadGEM2-ES die größten Niederschlagsabnahmen, während CNRM-CM5 mit verschiedenen RCPs in KLIWA I + II die höchsten Zunahmen aller SRES und RCP-Modelle ergibt.

#### 4.3 Auswahl von Globalen Klimamodellen für die weitere Nutzung

Neben der reinen Charakterisierung von Globalmodellen liefert der vorliegende Vergleich ebenso Aussagen zu möglichen Schwächen von GCM, welche die Qualität der Regionalen Klimaprojektionen beeinflussen können. Obwohl ein Regionalmodell nicht alle Eigenschaften des Antriebs übernimmt

(vgl. [4]), können sich Über- oder Unterschätzungen von Klimakenngrößen wie Temperatur oder Niederschlag aus dem GCM im RCM wiederfinden. Somit können bekannte Schwächen bei Globalen Klimamodellen auch ein Kriterium für den Ausschluss von Regionalen Klimaprojektionen sein. Zumindest müssen Regionale Klimaprojektionen bei weiterer Nutzung daraufhin kritisch geprüft werden. Dies kann für diesen Vergleich nur beispielhaft durchgeführt werden. Für die beiden Regionalen Klimamodelle REMO (REMO-UBA; MPI i. A. des Umweltbundesamtes, 2006) sowie CLM 2.4.11 [14] wurden hierbei für die gleiche Fläche wie von ECHAM5 in dieser Untersuchung die Temperatur und der Niederschlag ausgewertet. Die jeweiligen Monatsmittelwerte für den Zeitraum 1971-2000 sind in Abbildung Abb. 27 und Abb. 28 gegenübergestellt.

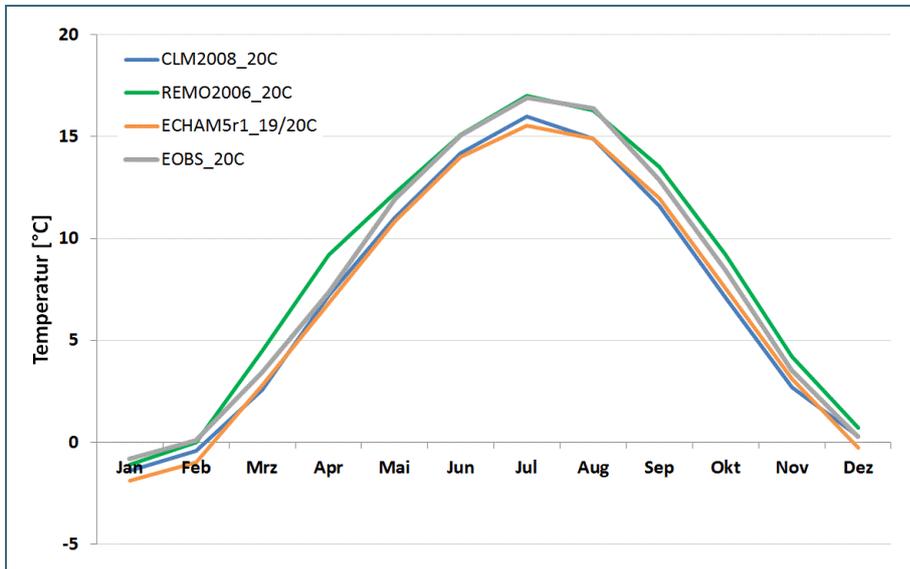


Abb. 27:  
Vergleich der mittleren Monatstemperaturen für den Zeitraum 1971-2000 (REMO, CLM) und 1871-2000 (ECHAM5r1)

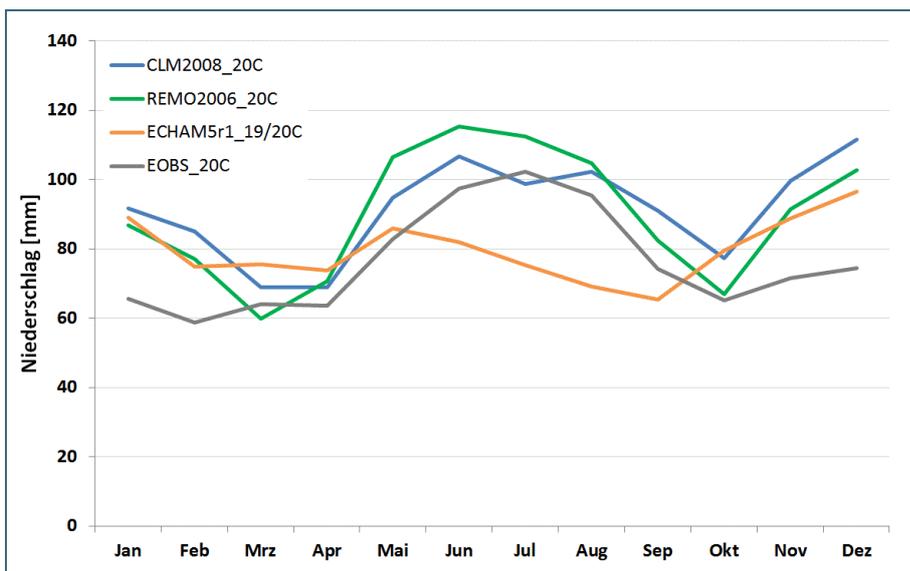


Abb. 28:  
Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlag für den Zeitraum 1971-2000 (REMO, CLM) und 1871-2000 (ECHAM5r1)

Deutlich erkennbar ist in Abbildung Abb. 27, dass der Jahresverlauf der Temperatur ähnlich ist, aber REMO-UBA die Temperatur gegenüber ECHAM5r1 überschätzt, während CLM 2.4.11 dies nicht zeigt. Deutlicher werden die Unterschiede zwischen GCM und RCM in Abb. 28. Während bei ECHAM5r1 das Niederschlagsmaximum im Winter liegt und der Sommerniederschlag unterschätzt wird, ändert sich dies bei den RCM. Der Sommerniederschlag ist deutlich höher. Der von  $E_{\text{obs}}$  gemessene Jahres-

gang mit einem Maximum im Sommer wird dadurch besser wiedergegeben. Dies zeigt deutlich den Einfluss, denn das in der Modellkette folgende RCM auf die Ergebnisse haben kann (vgl. auch [4]).

Bei dieser Betrachtung soll daher kein Globalmodell von vornherein ausgeschlossen werden. Vielmehr werden Hinweise gegeben, welche Modelle bei Verwendung durch die nachfolgende Modellkette als kritisch anzusehen sind und einer vertieften Prüfung bedürfen. Da aber einerseits das GCM nicht direkt die hier untersuchten Größen Temperatur und Niederschlag an das Regionalmodell übergibt und andererseits auch die Regionalmodelle ihre eigene Charakteristik besitzen, können deren Resultate trotz kritischem Globalmodell durchaus plausibel sein. Es bedarf daher zusätzlich der Prüfung auf der gesamten Modellkette, d.h. im Regional- bzw. sogar Wasserhaushaltsmodell. Die endgültige Entscheidung, ob eine auf einem kritischen Globalmodell aufbauende Klimaprojektion für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen geeignet ist, kann daher erst nach einer solchen Prüfung gefällt werden.

Hinweise auf kritisches Verhalten eines GCM sind:

- a) starke Abweichungen von Temperatur und/oder Niederschlag im Niveau oder Jahregang zwischen Beobachtung und simulierter Vergangenheit
- b) unplausible Zusammenhänge zwischen den Änderungssignalen von Temperatur und Niederschlag
- c) Trends und Änderungssignale, die dem übrigen Ensemble der GCM gegenläufig sind

Tab. 16 fasst die möglichen Schwachpunkte der einzelnen GCM entsprechend den zuvor aufgeführten Kriterien zusammen. Die Abwägung der Eignung aufgrund des Regimes der Vergangenheit geschah überwiegend qualitativ. Zur Abschätzung, ob ein zukünftiges Änderungssignal als hoch oder niedrig zu werten ist, wurden für die beiden KLIWA-Zeiträume das 15- und das 85%-Quantil aus den Änderungssignalen aller Realisationen (d.h. allen vorliegenden Kombinationen aus Modellläufen und Szenarien) des jeweiligen Zeitraums gebildet. Änderungen, die das 85%-Quantil überschreiten, wurden als „besonders hoch“ eingestuft, Änderungen, die das 15%-Quantil unterschreiten als „besonders niedrig“. Für die Temperatur erschienen die Signale der Jahresmitteltemperatur als ausreichend. Für den Niederschlag fiel die Entscheidung auf eine Unterscheidung in die meteorologischen Jahreszeiten Sommer und Winter, da die Signale im Jahresmittel wenig Aussagekraft besitzen.

zu a) Wie bei den Auswertungen zu der simulierten Vergangenheit gezeigt, unterscheiden sich die untersuchten Globalmodelle in ihrem Ausgangsniveau, d.h. dem Mittelwert in der Vergangenheit, teilweise bereits erheblich voneinander bzw. vom Niveau der Beobachtungsdaten. Auch wird das Regime der Beobachtung, d.h. die Höhe und Verteilung der Temperaturen oder Niederschlagsmengen innerhalb des Jahres, nicht von allen Modellen hinreichend plausibel erfasst. Die alleinige Nutzung einzelner Globalmodelle für die Angabe absoluter zukünftiger Werte oder für die Weiterverwendung in Modellketten zur Wasserhaushaltsmodellierung ist daher nicht empfehlenswert. Eine Übersicht über die qualitativen Abweichungen gibt Tab. 16.

Im Ensemble der mit SRES angetriebenen Globalmodelle ist das sehr kalte, aber sehr trockene CGCM3.1-T47 ein Beispiel für ein Globalmodell, das in der weiteren Modellkette über Regionale Klimamodelle und der Wasserhaushaltsmodellierung im Winter zu Problemen führen kann. Einige Modelle sind dagegen sehr warm und gleichzeitig besonders im Sommer eher trocken: CCSM3, HadCM3C und HadGEM2. Dadurch sind in der Wasserhaushaltsmodellierung ebenfalls sehr trockene Verhältnisse zu erwarten, wenn darauf aufsetzende Regionale Klimamodelle diese so in ihre Projektionen mitnehmen. CCSM3 besitzt die geringste Amplitude des Gesamtensembles aus SRES und RCP und verzeichnet als einziges aller Globalmodelle keine negativen mittleren Monatstemperaturen. Bezogen auf die Nachbildung des Jahregangs des Niederschlags zeigen drei der SRES-Globalmodelle ein Niederschlagsmaximum im Winter (CCSM3,

ECHAM5, IPSL-CM4). Bei unplausiblen Regime ist eine kritische Auswahl oder ein Ausschluss solcher Modellläufe entsprechend der Fragestellung nötig. IPSL-CM4 besitzt dabei die höchsten Niederschlagsmengen aller SRES-Globalmodelle. ECHAM5 zeigt sich insgesamt etwas zu kühl sowie beim Niederschlag im Winter zu feucht und im Sommer zu trocken. Verhältnismäßig gut schneiden hingegen CSIRO-Mk3.0, HadCM3 und HadGEM ab.

Bei den mit RCPs angetriebenen Modellen ist HadGEM2-ES zusammen mit HadCM3C und HadGEM2 aus dem SRES-Ensemble das wärmste Modell. Es besitzt die geringste Niederschlagsmenge aller RCP-Modelle und ist dementsprechend im Sommer sehr trocken. Das Gegenteil dazu bildet CNRM-CM5, das generell eher zu kühl und zu feucht ist, mit größeren Überschätzungen im Niederschlag von Mai bis Oktober. MPI-ESM-LR ist insgesamt bei der Temperatur etwas kühl, liegt aber beim Niederschlag ziemlich gut. Insgesamt wird der Jahresgang beim Niederschlag von allen drei der hier betrachteten CMIP5-Modelle mit einem Maximum im Sommer wiedergegeben.

- zu b) Für Süddeutschland zeigten die Trends von Temperatur und Niederschlag in der Vergangenheit zumindest für den Winter den Zusammenhang: Temperaturzunahme bei gleichzeitiger Niederschlagszunahme ([15]). Ein solches Trendverhalten wird von den meisten Modellen auch für den zukünftigen Winter (2000-2100) wiedergegeben. Abweichungen von dieser Beziehung in Form von Niederschlagsabnahmen treten für die Modelle ECHAM5 (Lauf 1 B1), IPSL-CM4 (B1, A1B, A2) und CNRM-CM5 (RCP8.5) auf.
- zu c) Die Wahl einzelner Modelle für die Angabe von zukünftigen Änderungssignalen bei unsicheren Größen (z. B. Herbstniederschlag) kann zu einer Fehlinterpretation der Modellergebnisse führen, da diese je nach gewähltem Modell zufällig in die eine oder andere klimatische Richtung weisen können. Aus diesem Grund ist es gängige Praxis, die Robustheit eines Parameters bzw. einer Modellaussage anhand der gesamten Bandbreite bzw. des gesamten Unsicherheitsbereichs mehrerer Modelle einzuordnen (Ensemble-Methode). Allgemein gilt: Modellerte Veränderungen, die von der Mehrzahl der Modelle einheitlich wiedergegeben werden (z.B. Niederschlag: Sommer → Abnahmen; Winter → Zunahmen) gelten dabei als robuster, also verlässlicher, als die uneinheitlichen Tendenzen in den Übergangsjahreszeiten. Darüber hinaus lässt sich bei ausreichender Anzahl von Modellen die Bandbreite in Quantile einteilen. Modellaussagen außerhalb definierter Quantilgrenzen (siehe auch Tab. 16) können damit als unsicherer angesehen und demnach ggf. ausgeschlossen werden. Schwache Temperaturzunahmen zeigt insbesondere CSIRO-Mk3.0. Modelle mit sehr starken Temperatur-Änderungssignalen sind HadCM3C, HadGEM2 sowie HadGEM2-ES. Diese Modelle besitzen auch im Niederschlag Werte außerhalb der 15- bzw. 85%-Quantilgrenzen, sind also eher für Extrembetrachtungen geeignet. Zudem ist vor allem CNRM-CM5 (RCP8.5) auffällig, da bei diesem die Sommerniederschläge zunehmen, während alle anderen Modelle eine Abnahme anzeigen.

Als Zwischenfazit können also die unter a bis c genannten Ausschlusskriterien für einzelne Globalmodellläufe also eine geringere Plausibilität von deren Ausgangsniveau beziehungsweise des klimatischen Regimes sein oder klare Auffälligkeiten im Trendverhalten. Sofern diese Modelle jedoch plausible Trends wiedergeben, ist die Verwendung zumindest für Änderungssignale durchaus legitim. Kritisch zu betrachten sind dagegen GCMs, die völlig gegenläufige Entwicklungen anzeigen als alle anderen Modellläufe.

Ein zusätzlicher Punkt, der bei der weiteren Verwendung der Globalen Klimamodelle berücksichtigt werden sollte, ist die Auflösung der verfügbaren Klimamodelle. Diese Fragestellung wurde in diesem Vergleich nicht weiter untersucht, soll aber nicht unerwähnt bleiben: Für diesen Vergleich für Süddeutschland wurden die Ergebnisse von 14 GCMs auf ein einheitliches Raster aus 12 Gitterpunkten räumlich interpoliert. Dabei stellt sich die Frage nach der Eignung der Modelle, deren ursprüngliche

Auflösung im Untersuchungsgebiet deutlich unter diesen 12 Gitterpunkten liegt. In der Tab. 16 sind die Globalen Klimamodelle markiert, die weniger als 6 Gitterpunkte in dem Untersuchungsgebiet besitzen. Dies betrifft die Globalmodelle BCM2.0, CGCM3.1-T47, CNRM\_CM3.3, HadCM3 sowie HadCM3C.

Zusammenfassend lässt sich aus dem Vergleich der simulierten Vergangenheit ermitteln, dass viele Globalmodelle für das Untersuchungsgebiet Schwächen aufzeigen. Besonders auffällig sind dabei CGCM3.1 und CCSM3 sowie verschiedene sehr trockene und warme Hadleymodelle (HadCM3C, HadGEM2, HadGEM2-ES). Daher ist hier eine weitere Verwendung besonders zu prüfen, wenn auf deren Basis Regionale Klimaprojektionen zur Verfügung stehen. Nur wenige GCMs weisen das Kriterium eines unplausiblen Zusammenhangs zwischen den Änderungssignalen von Temperatur und Niederschlag auf: Hier ergeben sich für CNRM-CM5 Schwächen, da es bei den zukünftigen Sommerniederschlägen als einziges der verglichenen Globalmodelle eine Zunahme projiziert. Daher erscheint auch dieses GCM für weitere Betrachtung ungeeignet.

Eher geeignet für eine weitere Verwendung in der Modellkette sind gemäß diesem Vergleich die Globalmodelle **CSIRO-MK3.0**, **HadCM3**, **HadGEM** und **MPI-ESM-LR** sowie **ECHAM5**. Das Beispiel von ECHAM5, zu dem in Deutschland viel Erfahrung als Antrieb für Regionale Klimamodelle vorliegt, zeigt dabei aber auch deutlich, dass sich Auffälligkeiten, zum Beispiel im Jahresgang, unterschiedlich in den Regionalen Klimamodellen wiederfinden können.

Tab. 16: Eingrenzung tendenziell (un-)geeigneter Globaler Klimamodelle für Süddeutschland und die angelegten Bewertungskriterien; KLIWA-Zeiträume: KLIWA I (2021-2050), KLIWA II (2071-2100)

Modell mit Einschätzung auf- grund des Modellver- gleichs	Hohe Abweichungen Regime Vergangenheit		Anzahl Gitterpunkte <6	Starke Abweichung zukünftiger Änderungssignale					
	Temperatur	Niederschlag		Temperatur Jahreswerte		Niederschlag Jahreszeiten			
				↑ = besonders hoch ↓ = besonders niedrig		↑ = besonders hoch ↓ = besonders niedrig		KLIWA I	
				KLIWA I	KLIWA II	KLIWA I		KLIWA II	
				15%-Quantil: +0,9 K 85%-Quantil: +1,9 K	15%-Quantil: +1,9 K 85%-Quantil: +4,3 K	Sommer 15%-Quantil: -9 mm 85%-Quantil: +5 mm	Winter 15%-Quantil: -2 mm 85%-Quantil: +9 mm	Sommer 15%-Quantil: -30 mm 85%-Quantil: -2 mm	Winter 15%-Quantil: +3 mm 85%-Quantil: +18 mm
<b>BCM2.0</b> (ungeeignet)	Kühles Frühjahr	Feuchter Herbst					↑ +12 mm (B1)	↑ -1 mm (B1)	↑ +20 mm (B1)
<b>CCSM3</b> ungeeignet	Geringste Amplitude im Ge- samtensemble, insgesamt sehr warm, als einziges keine Minustemperaturen bei middle- rer Monatstemperatur	Sehr trocken (Sommer), Nieder- schlagsmaximum im Winter		↑ + 2,0 K (A1B)	↓ +1,8 K (B1)	↓ -13 mm (B1) ↑ +6 mm (A1B)		↑ +6 mm (B1)	
<b>CGCM3.1-T47_(med-res)</b> ungeeignet	Kühlestes Modell im Gesamt- ensemble	Geringste Mengen der SRES- Modelle, besonders trocken im Winter	X			↓ -10 mm (A1B)			↑ +22 mm (A1B)
<b>CNRM_CM3.3</b> <b>(Lauf 1)</b> (ungeeignet)		Nass (Mai - Juli)	X	↓ +0,7 K (A1B)					
<b>CNRM-CM5</b> <b>(Lauf 1)</b> ungeeignet	Kalt (Feb bis Juni)	Generell zu feucht, sehr nass (Mai – Okt), Maximale Menge der RCP-Modelle, sommerliche Nie- derschlagszunahme				↑ +15 mm (RCP4.5) ↑ +17 mm (RCP8.5)		↑ +15 mm (RCP4.5) ↑ +22 mm (RCP8.5)	

<b>CSIRO-Mk3.0</b> geeignet	Kalt (Sommer)			↓ +0,2 K (B1) ↓ +0,7 K (A1B)	↓ +1,1 K (B1) ↓ +1,6 K (A1B)		↓ -3 mm (A1B)	↑ +4 mm (B1) ↑ +10 mm (A1B) ↑ +4 mm (A2)	
<b>ECHAM5/MPI-OM*</b> (Lauf 1, 2, 3) (geeignet)	Generell zu kühl	Niederschlagsmaximum im Winter, trocken im Sommer		↓ +0,8 K (L1, B1) ↓ +0,7 (L3, B1; L2, A2)		↑ +10 mm (L1, B1) ↑ +5 mm (L2, A1B)	↑ +9 mm (L1, B1) ↑ +13 mm (L2, A1B) ↓ -3 mm (L3, A2) ↑ +10 mm (L3, A2)		↑ +20 mm (L2, A2)
<b>MPI-ESM-LR*</b> („ECHAM6“) (Lauf 1, 2, 3) geeignet	Kühl im Sommer				↓ +0,8-1,3 K (L1-3, RCP2.6) ↓ +1,7 K (L1, RCP4.5)		↑ +9 mm (L2, RCP2.6) ↓ -4 mm (L1, RCP8.5)	↓ -30 mm (L3, RCP8.5)	↓ +3 mm (L1, RCP2.6) ↑ +27 mm (L2, RCP8.5)
<b>HadCM3</b> geeignet			X	↓ +0,8 K (B1)					
<b>HadCM3C</b> (Lauf 1, 2) (ungeeignet)	1 von 3 wärmsten Modellen Gesamtensemble, Sehr warm (Sommer), hohe Amplitude	Sehr trocken (Sommer)	X	↑ +2,4 K (L2, A1B)	↑ +4,4 K (L1, A1B) ↑ +5,4 K (L2, A1B)	↓ -12 mm (L2, A1B)		↓ -39 mm (L2, A1B)	↑ +19 mm (L1, A1B)
<b>HadGEM</b> geeignet						↓ -10 mm (A1B)		↓ -34 mm (A2)	
<b>HadGEM2</b> (Lauf 1, 2, 3) ungeeignet	1 von 3 wärmsten Modellen Gesamtensemble, sehr warm (Mai – Juli)				↑ +4,8 K (L3, A1B)	↓ -19 mm (L2, A1B) ↓ -10 mm (L3, A1B)	↓ -3 mm (L2, A1B)	↓ -33 – bis -39 mm (L1-3, A1B)	↓ +2 mm (L2, A1B) ↓ 0 mm (L3, A1B)

<b>HadGEM2-ES (Lauf 1)</b> (ungeeignet)	1 von 3 wärmsten Modellen Gesamtensemble	Trocken im Sommer, geringste Menge RCP-Modelle		↑ +2,5 K (RCP4.5) ↑ +2,7 K (RCP8.5)	↑ +6,3 K (RCP8.5)	↓ -12 mm (RCP4.5)	↑ +13 mm (RCP4.5) ↑ +10 mm (RCP8.5)	↓ -36 mm (RCP8.5)	↑ +21 mm (RCP8.5)
<b>IPSL-CM4</b> ungeeignet		höchste Menge SRES-Modelle, Nass (Winter), da Niederschlags- maximum im Winter					↓ -9 mm (A1B) ↓ -4 mm (A2)		↓ -3 mm (B1) ↓ -7 mm (A1B) ↓ -3 mm (A2)

## 5 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht sind die wesentlichen Ergebnisse der Globalmodellvergleiche für Bayern und umliegende Gebiete, die im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) durchgeführt wurden ([3], [19], [20]), zusammengestellt. Betrachtet wurden insgesamt 16 Globalmodellläufe, die in der Mehrzahl auf den SRES-Szenarien des 4. IPCC Berichts [7], aber auch auf den neuen RCP-Szenarien des 5. IPCC-Berichts [8] beruhen. untersucht und dargestellt wird das Verhalten der klimatologischen Parameter Temperatur und Niederschlag in ihrem Jahresverlauf sowie ihrer zeitlichen Entwicklung in den Zeiträumen 1871-2000 und 2001-2100. Weiterhin enthält der Bericht die Einordnung der Globalen Klimaprojektionen von ECHAM5 und MPI-ESM-LR („ECHAM6“) in den Kontext des betrachteten Globalmodellensembles.

Es konnte gezeigt werden, dass die **Temperatur**änderung in allen Modellen, auch der auf RCP-Szenarien basierenden neuen Modelle, in der Richtung sehr einheitlich ist. Die Temperatur im Untersuchungsgebiet steigt überwiegend hoch signifikant an, wobei der Änderungsbetrag abhängig vom jeweiligen SRES- oder RCP-Szenario ist. Die Bandbreite der Änderungssignale der Jahresmitteltemperatur in KLIWA I (2021-2050) liegt für die einzelnen Modelle zwischen +0,2 K und +2,7 K, in KLIWA II (2071-2100) zwischen +0,8 K und +6,3 K. Die RCP-Modelle passen gut in das Muster der SRES-Modelle, führen aber auch zu neuen minimalen und maximalen Trends innerhalb des Ensembles.

Die Ergebnisse für den **Niederschlag**, sowohl in Hinblick auf die simulierte Niederschlagshöhe als auch die Niederschlagsverteilung und die Trends, verhalten sich deutlich weniger einheitlich als für die Temperatur. Trotzdem ist ein Muster erkennbar, das fast alle ausgewerteten Modelle zeigen: Der Niederschlag sinkt tendenziell im Sommer und steigt im Winter. Die Änderungssignale der einzelnen Modelle bewegen sich dabei in KLIWA I zwischen -19 % und +17 % (Sommer) sowie -9 % und +13 % (Winter). In KLIWA II beträgt die Spannweite -39 % bis +15 % (Sommer) und -7 % bis +27 % (Winter). In der Jahressumme gleichen sich die Veränderungen meist weitgehend aus. Die neu hinzugefügten Modelle mit den neuen RCP-Szenarien fügen sich sehr gut in dieses Muster ein.

Beim Vergleich der Klimaänderungssignale durch die Antriebsszenarien SRES und RCP zeigte sich: Die Zusammensetzung eines Modellensembles, das heißt, die Anzahl und Charakteristik der eingehenden Globalen Klimaprojektionen, hat zum Teil größeren Einfluss auf die Bandbreite des Klimaänderungssignals als die Antriebsszenarien selbst. Dies belegt die Änderungssignale mit einer zusätzlichen Unschärfe.

Aufgrund der durchgeführten Globalmodellvergleiche konnten die Kenntnisse um die verfügbaren Globalen Klimamodelle und deren Schwächen für das Untersuchungsgebiet Bayern vertieft werden. Somit ist für die in der Modellkette folgende Regionale Klimamodellierung ableitbar, bei welchen GCM-Antrieben besondere Vorsicht oder weitere intensive Prüfungen vor einer weiteren Verwendung notwendig sind. Dabei gilt natürlich auch zu beachten, dass Regionale Klimamodelle eigene Charakteristika auf die jeweiligen Kenngrößen aufprägen können. Dennoch erlaubt die vergleichende Betrachtung der Jahresgänge (Unter-/ Überschätzungen) und der Änderungssignale im GCM-Ensemble, mögliche Schwächen zu identifizieren. Es zeigte sich, dass verschiedene Globalmodelle für das Untersuchungsgebiet „Bayern und umliegende Gebiete“ zumindest zeitweise deutlich zu kühl oder zu warm sind oder den Niederschlag deutlich über- oder unterschätzen. Ebenso wiesen drei Globale Modelle mit einem Niederschlagsmaximum im Winter anstatt im Sommer ein anderes Niederschlagsregime auf als im Mittel für das Untersuchungsgebiet üblich.

Letztlich kann eine Bewertung nur durch die Berücksichtigung mehrerer Kriterien getroffen werden. Mit den aus dem untersuchten Ensemble gewonnenen Klimasignalen, der dazugehörigen Bandbreite sowie den ermittelten Schwächen ergibt sich eine wichtige Grundlage für eine gezielte Auswahl von Globalmodellen für darauf aufbauende Modellketten mit nachfolgenden Regionalen Klima- und Was-

serhaushaltsmodellen in Bayern. Eine endgültige Entscheidung zur Verwendung der so erstellten Projektionen für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen kann aber erst nach einer Prüfung der Ergebnisse der Regionalen Klimamodelle und der Wasserhaushaltsmodelle gefällt werden. Teilweise gehen hier auch weitere Kenngrößen mit in die Modellierungsergebnisse mit ein, die in dieser Untersuchung nicht betrachtet wurden.

Bei der gezielten Auswahl einzelner Globalmodelle anhand der ermittelten Bandbreite der Klimaveränderung ist diese auch sehr stark abhängig von der Fragestellung (z.B. maximaler Temperaturtrend, maximale Niederschlagsabnahme im Sommer). Die vorliegende Untersuchung bildet eine wichtige Ausgangsbasis für ein zweckmäßiges Vorgehen. Zu berücksichtigen ist dabei auch, dass ein Teil der betrachteten Modelle zudem über eine geringe Modellauflösung mit nur wenigen Gitterpunkten im Untersuchungsgebiet verfügt. Daher ist hier eine weitere Verwendung besonders dann zu prüfen, wenn darauf aufbauende Regionale Klimaprojektionen zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend lässt sich aus dem Vergleich der simulierten Vergangenheit ermitteln, dass verschiedene Globalmodelle für das Untersuchungsgebiet Schwächen aufzeigen. Daher werden einige GCMs als mehr, andere als weniger plausibel und geeignet für das Gebiet Bayerns eingeschätzt: Das in Deutschland häufig verwendete Globalmodell ECHAM5 des MPI sowie sein Nachfolger MPI-ESM-LR („ECHAM6“) erwiesen sich als durchaus brauchbare Grundlage für weiterführende Projektionen für Bayern und umliegende Gebiete. Das Beispiel von ECHAM5, für das in Deutschland viel Erfahrung mit darauf aufbauenden Regionalen Klimaprojektionen vorliegt, zeigt aber auch, wie sich kleinere Auffälligkeiten, zum Beispiel im Jahresgang, unterschiedlich in den Regionalen Klimaprojektionen auswirken können. Um die notwendige Bandbreite an Klimaänderungssignalen in den nachfolgenden Wasserhaushaltsmodellierungen als Grundlage für darauf aufbauende Anpassungsmaßnahmen abzudecken, wäre eine Erweiterung des bestehenden bayerischen Projektions-Ensembles um zusätzliche GCMs wünschenswert. Dazu gehören nach den Erkenntnissen dieser Untersuchung insbesondere CSIRO-MK3.0 (entwickelt durch CAWCR, Australien), HadCM3 sowie gegebenenfalls auch HadGEM (jeweils entwickelt durch Hadley Centre, Großbritannien). diese werden – neben den Globalmodellen des MPI für Meteorologie – als besonders interessant für eine nähere Betrachtung in weiterführenden Modellketten erachtet.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] AHLFELD, D. P. (2006): Comparison of Climate Model Precipitation Forecasts with North American Observations. *Proceedings of the XVI International Conference on Computational Methods in Water Resources*, edited by Philip J. Binning Peter Engesgaard, Helge Dahle, George F. Pinder and William G. Gray. Copenhagen, Denmark, 2006.
- [2] DÉQUÉ, M. (2004): Uncertainties in PRUDENCE simulations: Global high resolution models. Published on: <http://prudence.dmi.dk>.
- [3] FESKE, N. (2009): Vergleichende Analyse globaler Klimamodellerggebnisse für Süddeutschland und umliegende Gebiete. *Abschlußbericht*. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- [4] FELDMANN, H., FRÜH, B., SCHÄDLER, G., PANITZ, H.-J., KEULER, K., JACOB, D., LORENZ, P. (2008): Evaluation of the precipitation for South-western Germany from high resolution simulations with regional climate models in *Meteorologische Zeitschrift* Vol 17, No. 4, 455-465, Berlin - Stuttgart
- [5] IPCC (2000): Summary for Policymakers. In: Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. et al., (2000): *Special Report on Emissions Scenarios*, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- [6] IPCC (2001): *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Watson, R.T. and the Core Writing Team (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [7] IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*, [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor und H.L. Miller, (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin.
- [8] IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the IPCC Fifth Assessment Report*
- [9] JONES, P. W. (1998): First- and Second-Order Conservative Remapping Schemes for Grids in Spherical Coordinates. *Monthly Weather Review* 127: 2204-2210.
- [10] KENDALL, M. G. (1970): *Rank correlation methods*. Griffin, London, 4th ed.
- [11] KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland bis Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Arbeitskreis KLIWA. *KLIWA-Berichte* 9.
- [12] KLIWA (2008): Klimawandel in Süddeutschland bis Veränderung der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss. Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- [13] KNMI (Stand 2011): Datenquelle des E<sub>obs</sub> Datensatzes, <http://eca.knmi.nl/download/ensembles/ensembles.php>
- [14] LAUTENSCHLAGER, M., KEULER, K., WUNRAM, C., KEUP-THIEL, E., SCHUBERT, M., WILL, A., ROCKEL, B., BOEHM, U. (2009): *Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD*. World Data Center for Climate. doi:DOI:10.1594/WDCC/CLM\_C20\_1\_D3
- [15] LFU (2012): "Der Klimawandel in Bayern – Klimabericht Bayern", Bayerisches Landesamt für Bayern, 22 S., [www.bestellen-bayern.de](http://www.bestellen-bayern.de)
- [16] MANN, H. B. (1945): Nonparametric test against trends. *Econometrica* 13: 245-259.

- [17] NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., DAVIS, G., DE VRIES, B., FENHANN, J., GAFFIN, S., GREGORY, K., GRIIBLER, A., JUNG, T.Y., KRAM, T., LA ROVERE, E.L., MICHAELIS, L., MORI, S., MORITA, T., PEPPER, W., PITCHER, H., PRICE, L., RIAHI, K., ROEHL, A., ROGNER, H., SANKOVSKI, A., SCHLESINGER, M., SHUKLA, P., SMITH, S., SWART, R., VAN ROOIJEN, S., VICTOR, N., DADI, Z. (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- [18] PCDMI (Stand November 2002): Projektbeschreibung CMIP-Projekt; [http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/cmip/ann\\_20c3m.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/cmip/ann_20c3m.php)
- [19] PÖHLER, H., SCHULTZE, B., SCHERZER, J. (2011): Vorhaben KLIWA, Klimaveränderung und Wasserwirtschaft, hier: Erweiterung der vergleichenden Auswertung von Globalmodellen für Süddeutschland. Interner Bericht, Büro UDATA – Umweltschutz und Datenanalyse
- [20] PÖHLER, H., SCHULTZE, B., SCHERZER, J. (2012): Vorhaben KLIWA – Klimaveränderung und Folgen für die Wasserwirtschaft, hier: Vergleichende Analyse der neuen globalen Klimaprojektionen aus CMIP5 für Süddeutschland. Interner Bericht, Büro UDATA – Umweltschutz und Datenanalyse
- [21] RAPP, J., SCHÖNWIESE, C.D. (1995/1996): Atlas des Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B, 5.
- [22] ROECKNER, E., UND JAKOB, D. (2008): Der Klimawandel ist voll im Gange: Ein Überblick. In: Lozán, J.L. et al. (2008): Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken bis Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen bis Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg.
- [23] VAN VUUREN, D.P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K.; THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G.C., KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J., MASUI, T., MEINSHAUSEN, M., NAKICENOVIC, N., SMITH, S.J., ROSE, S.K. 2011. Representative Concentration Pathways: An overview. Climatic Change (2011) 109:5–31

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Schematische Darstellung der Modellkette zur Erstellung regionaler Wasserhaushaltsprojektionen	5
Abb. 2:	Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes mit den verwendeten Gitterpunkten T63 von ECHAM5 (aus: [3])	6
Abb. 3:	Weltweiter anthropogen verursachter Strahlungsantrieb in SRES- und RCP-Szenarien	7
Abb. 4:	Vergleich der mittleren Temperaturjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 11 Modelle mit 20C3M-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 11 Modelle	15
Abb. 5:	Vergleich der mittleren monatlichen Temperaturabweichungen zwischen den Modellen und dem Bezugsdatensatz ( $E_{obs}$ 1971-2000) im Jahresgang –Zeitraum 19/20C; die Zahlen im Diagramm geben die Spannweite der Modelle in K an.	15
Abb. 6:	Vergleich der Niederschlagsjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 11 Modelle mit 20C3M-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 11 Modelle	16
Abb. 7:	Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlagsabweichungen zwischen den Modellen und dem Bezugsdatensatz ( $E_{obs}$ 1971-2000) im Jahresgang –Zeitraum 19/20C; die Zahlen im Diagramm geben die relative Spannweite der Modelle in % an.	17
Abb. 8:	Verläufe der Jahresmitteltemperatur (30-jähriges gleitende Mittel der Ensemble-Mittelwerte) in der Vergangenheit (20C3M) und den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 inkl. Ensemble -Bandbreite in KLIWA I und II sowie 20C (nur ein Antrieb aber unterschiedliche Kombination von Modellläufen)	18
Abb. 9:	Verläufe der Jahresniederschlagssumme (30-jährige gleitende Mittel der Ensemble-Mittelwerte) in der Vergangenheit (20C3M) und den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 inkl. Ensemble-Bandbreite in KLIWA I und II sowie 20C (nur ein Antrieb aber unterschiedliche Kombination von Modellläufen)	19
Abb. 10:	Temperaturänderungssignal in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen mit SRES-Antrieb	20
Abb. 11:	Niederschlagsänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der Mittelwerte der KLIWA-Zeiträume, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen mit SRES-Antrieb	22
Abb. 12:	Vergleich der Temperaturjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 5 Modellläufe mit „RCP historical“-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe (20C3M+RCP historical)	23
Abb. 13:	Vergleich der Niederschlagsjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind die 5 Modellläufe mit „RCP historical“-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe (20C3M+RCP historical)	24
Abb. 14:	Verläufe der absoluten Jahresmitteltemperatur (30-jähriges gleitendes Mittel) in der Vergangenheit (RCPhist) und die Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 inkl. Ensemble - Bandbreite in KLIWA I und II sowie 20C (ein Antrieb)	25

Abb. 15: Verläufe der absoluten Jahresniederschlagssumme (30-jähriges gleitendes Mittel) in der Vergangenheit (RCPHist) und die Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 inkl. Ensemble - Bandbreite in KLIWA I und II sowie Vergangenheit (ein Antrieb)	26
Abb. 16: Temperaturänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensemble aus fünf Modellläufen mit RCP-Antrieb, RCP2.6: drei Modellläufe MPI-ESM_LR	27
Abb. 17: Niederschlagsänderungen gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100; Ensemble aus 5 Modellläufen mit RCP-Antrieb, RCP2.6: drei Modellläufe MPI-ESM_LR	29
Abb. 18: Vergleich der Temperaturjahresgänge im Zeitraum 19/20C-Läufe (1871-2000), dargestellt sind 11 Modellläufe mit 20C3M-Antrieb, 5 Modellläufe mit RCP-historical-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe	31
Abb. 19: Vergleich der Niederschlagsjahresgänge im Zeitraum 19/20C (1871-2000), dargestellt sind 11 Modellläufe mit 20C3M-Antrieb, 5 Modellläufe mit RCP-historical-Antrieb, die Referenz (ENSEMBLE_obs ( $E_{obs}$ ) 1971-2000), das Modellensemble-Mittel und die Bandbreite aller 16 Modellläufe	32
Abb. 20: Temperaturänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensembles aus verschiedenen Anzahlen von Modellläufen (s. Text); Sternchen/ Kreise: Ausreißer	33
Abb. 21: Niederschlagsänderungssignale in den Jahreszeiten gegenüber 20C (1971-2000), Vergleich der KLIWA-Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, Ensembles aus verschiedenen Anzahlen von Modellläufen (s. Text), Sternchen/ Kreise: Ausreißer	34
Abb. 22: Temperatur- und Niederschlagstrends für den Sommer; Kombinierte Darstellung für alle untersuchten Modellläufe, grau: Modellläufe auf Grundlage von SRES-Szenarien. Farbige abgesetzt: Modelle auf Grundlage von RCP-Szenarien. Gestrichelte Linie: linearer Trend aller Werte	35
Abb. 23: Temperatur- und Niederschlagstrends für den Winter; Kombinierte Darstellung für alle untersuchten Modellläufe, grau: Modellläufe auf Grundlage von SRES-Szenarien. Farbige abgesetzt: Modelle auf Grundlage von RCP-Szenarien. Gestrichelte Linie: linearer Trend aller Werte	36
Abb. 24: Verläufe der Jahresmitteltemperatur im 30-jährigen gleitenden Mittel für die Läufe 1-3 von ECHAM5 und MPI-ESM-LR im Vergleich zu Mittelwert, Minimum und Maximum aller Modelle (Ensemble) sowie dem Bezugsdatensatz $E_{obs}$	38
Abb. 25: Verläufe der Jahresniederschlagssumme im 30-jährigen gleitenden Mittel für die Läufe 1-3 von ECHAM5 und MPI-ESM-LR im Vergleich zu Mittelwert, Minimum und Maximum aller Modelle (Ensemble) sowie dem Bezugsdatensatz $E_{obs}$	38
Abb. 26: Schema der Zunahme der Unsicherheiten von Modellergebnissen (Knotenpunkte) am Beispiel der Modellkette für Wasserhaushaltsmodellierungen	41
Abb. 27: Vergleich der mittleren Monatstemperaturen für den Zeitraum 1971-2000 (REMO, CLM) und 1871-2000 (ECHAM5r1)	45
Abb. 28: Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlag für den Zeitraum 1971-2000 (REMO, CLM) und 1871-2000 (ECHAM5r1)	45

## 8 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht über die verwendeten Globalen Klimamodelle, farbig hinterlegt: Modellläufe mit RCP-Szenarien, * = mehrere Vergangenheits-Läufe	8
Tab. 2:	Zeitliche Aggregierungsstufen der Modelldaten	10
Tab. 3:	Zeiträume für unterschiedliche statistische Auswertungen; „20C“ = „20 <sup>th</sup> Century“	10
Tab. 4:	Lineare Trends der Jahresmitteltemperatur [K/130a] (Vergangenheit) bzw. [K/100a] (Zukunft) der Modell-Läufe des ENSEMBLES-Projekts/IPCC4 im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (absoluter Abstand zwischen minimalen und maximalen projizierten Trends) der Modelle	18
Tab. 5:	Lineare Trends der Jahresniederschlagssumme [%/130a] (Vergangenheit) bzw. [%/100a] (Zukunft) der Modellläufe des ENSEMBLES-Projekts/IPCC4 im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (minimaler und maximaler projizierter Trend) der Modelle	19
Tab. 6:	Für SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 gemeinsam verfügbare Globalmodellläufe	20
Tab. 7:	SRES-Szenarien – Mittlere Veränderung der Temperatur in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderungen, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen; gelb: 0 bis +2 K, hellorange >+2 bis +4 K, orange: >+4 K	21
Tab. 8:	SRES-Szenarien – Mittlere Veränderung des Niederschlags in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderung, Ensemble aus acht verschiedenen Modellen; keine Farbe: Änderung <±10 %, gelb: <-10 bis -20 %, hellblau: >=+10 bis +20 %	22
Tab. 9:	Lineare Trends der Jahresmitteltemperatur [K/130a] (Vergangenheit) bzw. [K/100a] (Zukunft) der Modell-Läufe des CMIP5-Projekts im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (absoluter Abstand zwischen minimalen und maximalen projizierten Trends) der Modelle; 3 Modelle (5 Modellläufe), RCP2.6: Nur ein Model (3 Modellläufe)	26
Tab. 10:	Lineare Trends der Jahresniederschlagssumme [%/130a] (Vergangenheit) bzw. [%/100a] (Zukunft) der Modell-Läufe des CMIP5-Projekts im Zeitraum 1871-2000 bzw. 2001-2100: Ensemble-Mittelwerte sowie Ensemble-Spannweite (absoluter Abstand zwischen minimalen und maximalen projizierten Trend); 3 Modelle (5 Modellläufe), RCP2.6: Nur ein Model (3 Modellläufe).	27
Tab. 11:	RCP-Szenarien – Mittlere Veränderung der Temperatur in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderungen, Ensemble aus fünf (bzw. drei) Modellläufen, gelb: 0 bis +2 K, hellorange >+2 bis +4 K, orange: >+4 K	28
Tab. 12:	RCP-Szenarien – Mittlere Veränderung des Niederschlags in den KLIWA-Zeiträumen sowie Spannweiten der Veränderungen, Ensemble aus fünf (bzw. drei) Modellläufen; keine Farbe: Änderung <±10 %, gelb: <-10 bis -20 %, hellblau: >=+10 bis +20 %	29
Tab. 13:	Lineare Trends von Temperatur und Niederschlag von ECHAM5/ MPI-ESM-LR sowie zum Vergleich lineare Trends der Ensembles aller Modelle und Szenarien in 19/20C (1871-2000) und 21C (2001-2100)	40
Tab. 14:	Vergleich der Änderungssignale der Jahresmitteltemperaturen in den verschiedenen Antriebsszenarien bzw. einzelnen Modellen; Kriterien: linearer Trend und Änderungssignal in den KLIWA-Zeiträumen	43

Tab. 15: Vergleich der Änderungssignale der Sommer- und Winterniederschlagssummen in den verschiedenen Antriebsszenarien bzw. einzelnen Modellen	44
Tab. 16: Eingrenzung tendenziell (un-)geeigneter Globaler Klimamodelle für Süddeutschland und die angelegten Bewertungskriterien; KLIWA-Zeiträume: KLIWA I (2021-2050), KLIWA II (2071-2100)	49

## 9 Abkürzungsverzeichnis

19/20C – Zeitraum 1871-2000

20C – Zeitraum 1971-200

21C – Zeitraum 2001-2100

AR4 bzw. AR5 – Assessment Report 4 bzw. 5 des IPCC

CLM – Climate Local Model, Entwicklung mehrerer europäischer Forschungsgruppen

CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

DWD – Deutscher Wetterdienst

E<sub>obs</sub> – Beobachtungsdatensatz "ENSEMBLE\_obs"

GCM – Global Climate Model bzw. General Circulation Model

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

KLIWA – KLImaveränderung und Wasserwirtschaft (Projekt)

LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt

RCM – Regional Climate Model

RCP – Representative Concentration Pathway

REMO – REgionalMOdell des Max-Planck-Instituts Hamburg

SRES – Special report on Emission Scenarios

## 10 Anhang

Tab. A. 1: Übersicht über die aufbereiteten Modellergebnisse (jeweils monatliche Temperatur- und Niederschlagswerte)

Modell	ausführliche Bezeichnung	Modellbetreibende Institution	Land	Gitterpunkte im Untersuchungsgebiet		Zeitraum für Trendanalysen	Zeiträume für Mittelwertvergleiche (KLIWA)	Emissions-szenarien
				Ursprünglich	nach Remapping			
BCM2.0	Bergen Climate Model	Bjerknes Centre for Climate Research (BCCR)	Norwegen	6	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: 2000-2099	20C: 1970-1999 2021-2050 2070-2099	20C, A1B, A2, B1
CCSM3	Community Climate System Model	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	USA	18	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: 2000-2099	20C: 1970-1999 2021-2050 A1B, A2: 2070-2099, B1: 2071-2100	20C, A1B, A2, B1
CGCM3.1-T47_(med-res)	Coupled Global Climate Model (Medium Resolution)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Kanada	2	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: 2001-2100	20C: 1971-2000 2021-2050 2071-2100	20C, A1B
CNRM_CM3.3		Centre National de Recherches Météorologiques	Frankreich	4	12	19/20C : 1871-2000 SRES-Läufe: 2001-2100	20C : 1971-2000 2021-2050 2071-2100	20C, A1B
CNRM_CM5		Centre National de Recherches Météorologiques	Frankreich	18	12	19/20C: 1871-2000 SRES/RCP-Läufe: 2001-2100	20C: 1971-2000 2021-2050 2071-2100	20C, A1B, A2, B1; RCP4.5, 8.5
CSIRO-Mk3.0	Mark 3 Coupled Climate Model	Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australien	12	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: 2001-2100	20C: 1971-2000 2021-2050 2071-2100	20C, A1B, A2, B1
ECHAM4	European Centre Hamburg Model 4	Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)	Deutschland	6	12	SRES-Läufe: 2001-2100	keine 20C-Daten 2021-2050 2071-2100	A2, B2
ECHAM5/MPI-OM (Lauf 1, 2, 3)	European Centre Hamburg Model 5	Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)	Deutschland	12	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: 2001-2100	20C: 1971-2000 2021-2050 2071-2100	20C, A1B, A2, B1
MPI-ESM-LR	European Centre Hamburg Model 6	Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)	Deutschland	12	12	19/20C: 1871-2000 SRES/RCP-Läufe: 2001-2100	20C: 1971-2000 2021-2050 2071-2100	20C, A1B, A2, B1; RCP2.6, 4.5, 8.5
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model 3	Met Office (METO)	Großbritannien	4	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: 2000-2099	20C: 1970-1999 2021-2050 A2: 2070-2099, A1B, B1: 2071-2100	20C, A1B, A2, B1
HadCM3C	Hadley Centre Coupled Model 3 with Carbon Cycle Component	Met Office (METO)	Großbritannien	4	12	19/20C : 1871-1999 SRES-Läufe: 2000-2099	20C : 1970-1999 2021-2050 2070-2099	20C, A1B
HadGEM	Hadley Centre Global Environmental Model (version 1)	Met Office (METO)	Großbritannien	16	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: A1B: 2000-2099, A2: 2000-2098	20C: 1970-1999 2021-2050 A2: 2069-2098, A1B: 2071-2099	20C, A1B, A2

Tab. A. 1 (Fortsetzung)

Modell	ausführliche Bezeichnung	Modellbetreibende Institution	Land	Gitterpunkte im Untersuchungsgebiet		Zeitraum für Trendanalysen	Zeiträume für Mittelwertvergleiche (KLIWA)	Emissions-szenarien
				Ur-sprünglich	nach Remap-ping			
HadGEM2	Hadley Centre Global Environmental Model (version 2 / AO)	Met Office (METO)	Großbritannien	16	12	19/20C : 1871-1999 SRES-Läufe: A1B: 2000-2099	20C : 1970-1999 KLIWA I: 2021-2050 KLIWA II: 2071-2099	20C, A1B
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model (version 2 / AO) - Earth System	Met Office (METO)	Großbritannien	20	12	19/20C: 1871-2000 SRES/RCP-Läufe: 2001-2100	20C: 1971-2000 KLIWA I: 2021-2050 KLIWA II: 2071-2100	20C, A1B, A2, B1; RCP4.5, 8.5
IPSL-CM4	Institute Pierre Simon Laplace Climate Model (Version 4)	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	Frankreich	4	12	19/20C: 1871-1999 SRES-Läufe: 2001-2100	20C: 1971-2000 KLIWA I: 2021-2050 KLIWA II: 2071-2100	20C, A1B, A2, B1

Tab. A. 2: Übersicht über die in FESKE (2009) [3] und PÖHLER et al. (2011, 2012) [19, 20] durchgeführten Auswertungen

Art der Auswertung	betrachteter Zeitraum	Antriebs-Szenarien	Modelle	Parameter	jahreszeitliche Auflösung				in Bericht			Dargestellt als	
					Jahr	Halbjahr	Jahreszeiten	Monat	FESKE 2009	PÖHLER et al. 2011	PÖHLER et al. 2012	Diagramm	Tabelle
statistische Beschreibung der einzelnen Modelle	1871-2100	20C3M, SRES	alle	T, N	X		X	X	X	X			X
	1871-2100	RCP hist., RCP	alle	T, N	X		X	X			X		X
Mittelwerte Zeiträume	1971-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N	X		X	X		X	X	X	X
30-jähriges gleitendes Mittel	1871-2100	20C3M, RCP hist.; SRES+RCP	je alle Modelle eines Szenarios	T, N			X			X	X	X	
Jahresgang der Monatsmittelwerte	1871-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N							X	X	
	1971-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N							X	X	
	1871-2000	20C3M	nur SRES-Modelle	T, N						X		X	
	1971-2000	20C3M	nur SRES-Modelle	T, N						X		X	
	1871-2000	RCP hist.	nur RCP-Modelle	T, N							X	X	X
Jahresgang	1971-2000	RCP hist.	nur RCP-Modelle	T, N							X	X	
Jahresgang - Differenz zwischen wärmstem und kältestem Monat	1871-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T						X	X		X
Jahresgang - Differenz Jahresmitteltemperatur Klimamodell-E <sub>obs</sub>	1971-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N							X		X
Jahresgang - Vergleich versch. Referenzreihen	1961-1990 bzw. 1971-2000		Beobachtungsdatensätze	T, N	X		X	X		X		X	X
Jahresgang - Mittelwert Referenzreihe	1971-2000		Beobachtungsdatensatz DWD-Stationen	T, N	X		X	X	X	X			X
Änderungssignal (linearer Trend), Einzelmodelle	1871-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N	X		X	X			X		X
	2001-2100	SRES+RCP	alle	T, N	X		X	X			X		X
	1871-2000	20C3M	nur SRES-Modelle	T, N	X		X	X	X	X			X
	2001-2100	SRES	nur SRES-Modelle	T, N	X		X	X	X	X			X

Tab. A. 2 (Fortsetzung)

Art der Auswertung	betrachteter Zeitraum	Antriebs-Szenarien	Modelle	Parameter	jahreszeitliche Auflösung				in Bericht			Darge-stellt als	
					Jahr	Halbjahr	Jahreszeiten	Monat	FESKE 2009	PÖHLER et al. 2011	PÖHLER et al. 2012	Diagramm	Tabelle
Änderungssignal (linearer Trend), Ensemblemittelwert	1871-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N	X		X				X		X
	2001-2100	SRES+RCP	alle	T, N	X		X				X		X
	1871-2000	20C3M	nur SRES-Modelle	T, N	X		X		X	X			X
	2001-2100	SRES	nur SRES-Modelle	T, N	X		X		X	X			X
Änderungssignal (linearer Trend), Spannbreite im Jahregang	1871-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N				X			X	X	
	2001-2100	SRES+RCP	alle	T, N				X			X	X	
Änderungssignal (linearer Trend), Spannbreite im Jahregang	1871-2000	20C3M	nur SRES-Modelle	T, N				X		X		X	
	2001-2100	SRES	nur SRES-Modelle	T, N				X		X		X	
	1871-2000	20C3M, RCP hist.	alle	T, N		X					X	X	
	2001-2100	SRES+RCP	alle	T, N		X					X	X	
Änderungssignal (linearer Trend), Boxplot aller Modelle im Jahregang	1871-2000	RCP hist.	nur RCP-Modelle	N				X			X	X	
	1871-2000	20C3M	nur SRES-Modelle	N				X			X	X	
	2001-2100	RCP	nur RCP-Modelle	N				X			X	X	
	2001-2100	SRES	nur SRES-Modelle	N				X			X	X	
Scatterplot T- + Ns-Trends	1871-2100	20C3M	nur SRES-Modelle	T, N			X			X		X	
	1871-2100	20C3M, RCP hist., SRES+RCP	alle	T, N			X				X	X	
Änderungssignal vs. 20C (Ensemblemittelwert) KLIWA-Zeiträume	2021-2050	SRES	nur SRES-Modelle	T, N	X		X			X			X
	2071-2100	SRES	nur SRES-Modelle	T, N	X		X			X			X
Änderungssignal vs. 20C je Modell KLIWA-Zeiträume	2021-2050	SRES	nur SRES-Modelle	T, N	X		X	X		X			X
	2071-2100	SRES	nur SRES-Modelle	T, N	X		X	X		X			X
	2021-2050	SRES+RCP	alle	T, N	X		X	X			X	X	X
	2071-2100	SRES+RCP	alle	T, N	X		X	X			X	X	X

Tab. A. 3: Mittlere Veränderung von Temperatur und Niederschlag gegenüber 20C (1971-2000) in den KLIWA-Zeiträumen, vollständige Ensembles aus verschiedenen Modellläufen; Temperatur: gelb: 0 bis +2 K, hellorange >+2 bis +4 K, orange: >+4 K, Niederschlag: keine Farbe: Änderung <±10 %, gelb: <-10 bis -20%, hellorange: <-20%, hellblau: >=+10 bis +20 %

Vergleich	Anzahl Modellläufe	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
Temperaturänderungssignal [K]						
KLIWA I (2021-2050)						
A1B-20C	16	+1,5	+1,4	+1,7	+1,6	+1,5
A2-20C	10	+1,3	+1,1	+1,4	+1,2	+1,3
B1-20C	8	+1,0	+0,8	+1,3	+1,1	+1,0
RCP2.6	3	+1,1	+0,8	+1,1	+1,1	+1,4
RCP4.5	5	+1,4	+1,0	+1,6	+1,4	+1,7
RCP8.5	5	+1,7	+1,3	+2,0	+1,8	+1,8
KLIWA II (2071-2100)						
A1B-20C	16	+3,6	+3,0	+4,2	+3,7	+3,4
A2-20C	10	+3,8	+3,2	+4,4	+3,8	+3,7
B1-20C	8	+2,2	+2,0	+2,4	+2,2	+2,3
RCP2.6	3	+1,0	+0,8	+1,0	+1,0	+1,7
RCP4.5	5	+2,4	+1,9	+2,8	+2,4	+2,7
RCP8.5	5	+4,4	+3,1	+5,4	+4,6	+4,6
Spannweite Temperaturänderung [K]						
KLIWA I (2021-2050)						
A1B-20C	16	1,3	1,4	1,4	1,6	1,3
A2-20C	10	1,2	1,7	1,2	1,5	1,2
B1-20C	8	1,7	1,3	2,5	1,5	1,7
RCP2.6	3	0,3	0,2	0,4	0,2	0,5
RCP4.5	5	1,5	1,6	2,2	1,5	1,1
RCP8.5	5	1,7	0,9	2,4	2	1,5
KLIWA II (2071-2100)						
A1B-20C	16	2,3	1,9	3	2,8	2,3
A2-20C	10	1,8	1,8	+3,6	2,2	1,8
B1-20C	8	1,8	1,9	2,2	2	1,8
RCP2.6	3	0,4	0,5	0,2	0,7	1,1
RCP4.5	5	1,9	1,4	2,7	2,2	1,6
RCP8.5	5	2,7	1,8	4,4	3	1,7
Niederschlagsänderungssignal [%]						
KLIWA I (2021-2050)						
A1B-20C	16	0	+5	-4	-3	+4
A2-20C	10	0	+1	-3	+1	+3
B1-20C	8	+1	+3	-1	+0	+3
RCP2.6	3	+2	+2	-3	+2	+7
RCP4.5	5	+3	+6	-4	+2	+7
RCP8.5	5	+3	+5	-1	+2	+5
KLIWA II (2071-2100)						
A1B-20C	16	-2	+6	-21	-6	+10
A2-20C	10	-2	-1	-17	-1	+11
B1-20C	8	+1	+2	-7	1	+8
RCP2.6	3	+1	+4	-5	0	+7
RCP4.5	5	+3	+7	-9	+3	+10
RCP8.5	5	+3	+12	-19	-1	+18
Spannweite der Niederschlagsänderung [%]						
KLIWA I (2021-2050)						
A1B-20C	16	16	15	12	22	16
A2-20C	10	10	13	19	13	10
B1-20C	8	21	23	23	14	21
RCP2.6	3	4	11	1	4	6
RCP4.5	5	9	19	27	16	12
RCP8.5	5	13	15	24	17	14
KLIWA II (2071-2100)						
A1B-20C	16	31	38	20	26	31
A2-20C	10	30	39	10	16	30
B1-20C	8	25	26	11	23	25
RCP2.6	3	1	6	6	10	11
RCP4.5	5	12	13	32	6	11
RCP8.5	5	21	11	58	24	18

Tab. A. 4: Temperaturänderung [K] des Zeitraumes 2021-2050 (KLIWA-I) im Vergleich zu 1971-2000 (20C).  
 Orange: Zunahme, Blau: Abnahme; heller Farbton: 0-2 K, mittlerer Farbton: >2-4 K, dunkler Farbton: >4 K

Modell	Vergleich	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	F	S	H	W
MPI-ESM-LR, run1	RCP2.6-20C	1,4	0,9	0,9	1,0	0,6	0,8	0,7	1,0	0,7	1,2	1,1	0,8	0,9	0,8	0,9	1,0	1,4
MPI-ESM-LR, run2	RCP2.6-20C	1,4	0,5	0,6	0,9	0,8	1,0	1,6	1,5	1,2	1,3	0,9	1,0	1,1	0,8	1,3	1,2	1,2
MPI-ESM-LR, run3	RCP2.6-20C	1,6	1,5	1,0	1,3	0,6	1,8	1,4	0,4	1,5	0,9	1,0	1,2	1,2	1,0	1,2	1,2	1,7
MPI-ESM-LR, run1	RCP4.5-20C	0,8	0,8	0,5	0,6	0,4	1,6	1,1	1,6	1,4	1,0	0,8	0,7	0,9	0,5	1,5	1,1	1,2
MPI-ESM-LR, run2	RCP4.5-20C	1,6	0,7	-0,1	0,7	0,7	0,4	1,7	1,1	1,3	1,2	1,5	2,4	1,1	0,5	1,0	1,4	1,8
MPI-ESM-LR, run3	RCP4.5-20C	1,6	0,9	0,7	1,6	0,4	2,2	0,9	0,6	1,4	0,5	0,8	1,1	1,1	0,9	1,3	0,9	1,5
CNRM-CM5	RCP4.5-20C	1,8	1,2	1,2	0,9	1,6	1,0	1,3	1,5	0,8	1,1	1,3	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	2,0
HadGEM2-ES	RCP4.5-20C	1,9	2,3	1,8	1,9	2,2	2,4	3,6	3,6	3,4	2,9	1,0	2,7	2,5	2,0	3,2	2,4	2,3
MPI-ESM-LR, run1	RCP8.5-20C	0,5	0,7	1,0	0,9	1,0	1,0	1,4	2,0	1,3	1,2	0,9	0,3	1,0	1,0	1,5	1,1	0,9
MPI-ESM-LR, run2	RCP8.5-20C	1,0	1,2	0,8	1,4	1,5	0,7	1,6	1,8	1,7	1,1	1,8	1,5	1,4	1,3	1,3	1,6	1,4
MPI-ESM-LR, run3	RCP8.5-20C	2,3	1,8	1,1	1,3	0,6	2,1	2,0	1,2	1,6	1,5	2,0	1,9	1,6	1,0	1,8	1,7	2,3
CNRM-CM5	RCP8.5-20C	2,0	2,4	1,0	1,5	2,0	1,5	1,8	1,5	1,1	1,4	1,5	1,0	1,6	1,4	1,6	1,4	2,3
HadGEM2-ES	RCP8.5-20C	1,8	2,8	1,9	1,8	1,8	3,1	3,6	4,2	3,9	3,1	2,3	2,2	2,7	1,8	3,7	3,1	2,3
BCM2.0	B1-20C	1,4	2,0	1,4	1,7	1,2	1,3	0,7	1,3	1,1	1,0	0,5	1,8	1,3	1,4	1,1	0,9	1,7
CCSM3	B1-20C	2,3	1,1	1,4	1,2	1,2	2,2	2,7	2,7	2,1	1,7	1,6	2,2	1,9	1,3	2,8	1,8	1,8
CSIRO-Mk3	B1-20C	-0,1	0,2	0,5	-0,6	0,3	0,2	0,2	0,2	0,5	0,7	-0,2	-0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0
ECHAM5	B1-20C	1,2	1,9	0,2	-0,4	0,7	1,1	0,7	0,7	0,7	1,4	1,0	0,9	0,8	0,1	0,9	1	1,3
ECHAM5, run2	B1-20C	0,3	0,9	0,9	1,1	0,7	1,3	1,8	1,3	1,1	1,1	1,8	1,3	1,1	0,9	1,5	1,3	0,8
ECHAM5, run3	B1-20C	0,3	0,7	0,7	0,6	0,3	0,8	1,3	1,3	0,5	0,3	0,5	0,8	0,7	0,5	1,1	0,4	0,6
HadCM3	B1-20C	0,2	0,8	0,4	0,3	1,0	0,5	1,7	1,7	1,1	1,2	1,1	0,3	0,8	0,6	1,2	1,1	0,5
IPSL-CM4	B1-20C	1,2	1,4	1,2	1,2	1,0	1,7	1,7	1,7	1,9	1,8	1,6	0,9	1,5	1,2	1,8	1,8	1,1
CNRM-CM33	A1B-20C	0,8	0,2	0,6	0,7	0,7	0,7	0,9	1,2	0,8	0,7	0,9	0,7	0,7	0,7	1	0,8	0,5
HadCM3C, run1	A1B-20C	1,4	1,3	1,8	1,4	1,4	1,6	2,3	2,0	2,1	2,2	1,3	1,0	1,6	1,5	2	1,9	1,3
HadCM3C, run2	A1B-20C	1,7	1,8	2,6	1,6	2,4	2,2	3,6	3,5	2,9	3,2	1,9	1,7	2,4	2,2	3,1	2,7	1,8
HadGEM2, run1	A1B-20C	1,8	2,1	2,4	1,6	1,3	0,7	2,3	2,1	2,1	2,0	1,6	2,8	1,9	1,8	1,7	1,9	1,9
HadGEM2, run2	A1B-20C	1,2	1,6	2,3	1,9	1,8	1,3	2,4	2,8	1,8	2,3	0,9	2,1	1,9	2	2,2	1,6	1,4
HadGEM2, run3	A1B-20C	1,1	1,7	1,7	1,5	1,6	1,6	2,4	3,0	2,5	2,6	1,9	1,6	1,9	1,6	2,3	2,3	1,4
BCM2.0	A1B-20C	1,5	1,8	2,3	1,9	0,8	1,1	0,7	0,2	0,8	0,7	1,4	1,9	1,2	1,6	0,7	1	1,7
CCSM3	A1B-20C	2,4	1,9	2,0	1,8	1,7	1,8	2,9	1,8	1,8	2,1	1,4	2,3	2	1,8	2,1	1,8	2,2
CGCM3.1-T47	A1B-20C	1,5	3,2	2,4	2,0	1,2	0,9	1,6	1,5	1,3	1,3	1,2	1,4	1,6	1,8	1,3	1,3	2,1
CSIRO-Mk3	A1B-20C	0,8	0,6	1,2	0,1	0,2	0,2	1,1	0,8	0,8	0,6	0,9	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7
ECHAM5	A1B-20C	1,2	2,2	0,6	-0,1	0,8	1,0	1,4	1,7	1,5	1,8	1,8	1,1	1,2	0,4	1,4	1,7	1,4
ECHAM5, run2	A1B-20C	2,0	1,4	0,5	0,9	0,8	0,8	1,2	1,5	1,4	0,9	1,5	1,1	1,2	0,7	1,1	1,3	1,5
ECHAM5, run3	A1B-20C	0,9	1,7	0,7	1,2	0,9	0,8	1,3	1,4	0,9	1,1	1,5	0,7	1,1	0,9	1,2	1,2	1,1
HadCM3	A1B-20C	0,6	1,5	1,2	0,8	1,2	1,4	1,7	2,5	2,0	1,9	1,3	1,8	1,5	1	1,9	1,7	1,4
HadGEM	A1B-20C	1,7	1,2	1,2	2,3	1,1	1,8	2,2	2,9	2,0	2,1	2,0	1,8	1,9	1,6	2,3	2	1,5
IPSL-CM4	A1B-20C	1,9	1,0	1,7	2,4	1,4	2,2	1,8	2,0	2,3	2,2	2,4	1,8	1,9	1,8	2	2,3	1,5
BCM2.0	A2-20C	1,8	1,6	1,9	2,3	1,4	1,1	0,6	0,9	0,6	0,1	0,6	1,7	1,2	1,9	0,9	0,4	1,6
CCSM3	A2-20C	2,2	1,6	2,1	1,5	1,5	1,3	2,2	2,0	2,1	2,1	1,6	2,1	1,9	1,7	1,8	1,9	1,9
CSIRO-Mk3	A2-20C	0,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,3	1,7	1,0	1,2	0,9	1,2	1,4	1	1	1	1,1	0,9
ECHAM5	A2-20C	1,6	1,4	0,1	-0,1	0,8	1,1	0,9	1,1	1,6	1,2	1,2	1,3	1	0,2	1,1	1,3	1,5
ECHAM5, run2	A2-20C	-0,6	0,3	0,6	1,1	0,3	0,5	1,7	1,6	0,9	0,3	1,2	1,1	0,7	0,6	1,2	0,8	0,3
ECHAM5, run3	A2-20C	1,4	0,6	1,1	1,3	0,2	1,0	1,5	1,2	0,6	0,1	1,1	1,1	0,9	0,9	1,2	0,6	1,0
HadCM3	A2-20C	0,6	1,4	0,9	0,7	0,7	0,8	1,1	2,0	1,6	1,0	0,9	1,1	1,1	0,8	1,3	1,2	1,1
HadGEM	A2-20C	1,7	1,8	1,6	2,1	1,3	1,8	2,2	2,2	1,8	1,2	2,0	1,4	1,8	1,7	2,1	1,7	1,6
IPSL-CM4	A2-20C	1,9	1,6	0,7	2,2	1,3	2,2	2,1	1,8	2,0	1,7	2,0	1,6	1,8	1,4	2,1	1,9	1,7

Tab. A. 5: Temperaturänderung [K] des Zeitraumes 2071-2100 (KLIWA II) im Vergleich zu 1971-2000 (20C).  
 Orange: Zunahme, Blau: Abnahme; heller Farbton: 0-2 K, mittlerer Farbton: >2-4 K, dunkler Farbton: >4 K

Modell	Vergleich	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	F	S	H	W
MPI-ESM-LR, run1	RCP2.6-20C	1,6	0,8	1,0	0,8	0,0	0,7	1,6	1,2	0,8	0,7	0,3	0,4	0,8	0,6	1,2	0,6	1,3
MPI-ESM-LR, run2	RCP2.6-20C	0,9	1,5	0,5	1,0	0,4	0,4	1,4	1,3	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0	0,7	1,0	1,3	1,4
MPI-ESM-LR, run3	RCP2.6-20C	2,3	1,6	1,3	1,6	0,5	1,4	1,2	0,3	1,2	0,7	0,9	2,0	1,3	1,2	1,0	1,0	2,3
MPI-ESM-LR, run1	RCP4.5-20C	2,3	1,7	1,2	1,3	1,4	2,0	2,0	2,8	2,1	1,8	1,3	0,8	1,7	1,3	2,3	1,7	2,0
MPI-ESM-LR, run2	RCP4.5-20C	1,5	1,5	1,2	2,1	1,3	1,4	2,5	2,4	2,7	2,1	2,6	2,4	2,0	1,6	2,1	2,5	2,0
MPI-ESM-LR, run3	RCP4.5-20C	2,3	2,9	1,6	1,6	1,3	2,6	2,3	1,9	2,0	1,4	1,8	2,0	2,0	1,5	2,3	1,8	2,7
CNRM-CM5	RCP4.5-20C	3,4	3,2	2,2	2,3	2,5	2,5	3,0	2,4	2,3	1,9	2,6	2,5	2,6	2,3	2,6	2,3	3,6
HadGEM2-ES	RCP4.5-20C	3,0	2,7	2,4	2,5	3,2	3,3	5,4	5,7	4,9	4,0	3,0	3,9	3,7	2,7	4,8	3,9	3,2
MPI-ESM-LR, run1	RCP8.5-20C	3,4	3,3	2,9	2,3	2,2	3,0	4,8	5,6	4,7	3,6	3,6	3,4	3,6	2,5	4,5	4,0	3,8
MPI-ESM-LR, run2	RCP8.5-20C	3,8	2,9	2,6	2,2	2,7	3,3	5,0	5,6	4,6	3,7	4,1	3,9	3,7	2,6	4,6	4,2	3,7
MPI-ESM-LR, run3	RCP8.5-20C	5,2	4,4	3,0	2,6	2,4	4,4	5,2	5,5	5,1	4,0	4,0	4,4	4,2	2,7	5,1	4,4	5,0
CNRM-CM5	RCP8.5-20C	5,2	5,2	3,3	3,5	3,8	3,9	4,4	4,3	3,8	3,3	4,5	4,2	4,1	3,5	4,2	3,9	5,4
HadGEM2-ES	RCP8.5-20C	5,2	5,0	4,1	3,9	5,0	6,8	9,3	9,7	8,9	7,0	4,6	5,5	6,3	4,3	8,6	6,8	5,2
BCM2.0	B1-20C	2,9	3,2	2,8	2,7	2,1	1,9	1,4	1,7	1,5	0,8	1,3	1,5	2	2,5	1,6	1,2	2,6
CCSM3	B1-20C	2,2	2,0	1,3	1,4	2,1	1,1	2,7	1,9	1,9	1,7	1,4	1,8	1,8	1,6	1,9	1,7	2
CSIRO-Mk3	B1-20C	0,8	1,4	1,4	0,8	1,2	0,5	1,3	1,0	1,5	0,7	1,0	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1
ECHAM5	B1-20C	3,8	2,5	1,5	1,5	1,4	2,4	2,4	3,6	3,1	3,2	2,5	2,6	2,5	1,5	2,8	2,9	3
ECHAM5, run2	B1-20C	1,5	2,4	2,2	2,6	2,1	2,2	2,9	3,3	2,5	1,9	2,9	2,3	2,4	2,3	2,8	2,5	2,1
ECHAM5, run3	B1-20C	2,7	2,4	1,8	2,3	1,9	2,3	3,2	3,4	3,0	1,8	2,8	2,4	2,5	2,0	3,0	2,5	2,5
HadCM3	B1-20C	2,0	2,3	1,5	1,6	2,2	2,1	2,5	3,6	2,8	2,9	2,6	3,2	2,5	1,8	2,8	2,8	2,6
IPSL-CM4	B1-20C	2,2	2,2	3,8	2,6	2,7	3,3	2,8	3,1	3,5	3,3	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,1	2,4
CNRM-CM33	A1B-20C	1,3	1,3	2,1	2,1	1,1	1,5	2,5	2,7	2,3	1,3	2,2	1,8	1,9	1,8	2,2	1,9	1,3
HadCM3C, run1	A1B-20C	3,1	4,7	4,0	3,3	3,6	4,5	5,9	6,4	5,4	4,9	3,6	3,4	4,4	3,6	5,6	4,6	3,9
HadCM3C, run2	A1B-20C	4,1	4,1	5,5	4,7	4,9	5,1	7,5	7,9	6,8	5,7	4,6	4,5	5,4	5	6,8	5,7	4,1
HadGEM2, run1	A1B-20C	3,4	4,8	3,8	3,6	3,1	3,3	5,9	7,1	5,3	4,3	3,4	3,8	4,3	3,5	5,4	4,3	4,1
HadGEM2, run2	A1B-20C	3,1	3,6	3,9	3,2	3,2	3,3	5,6	6,2	5,2	4,0	3,3	3,8	4	3,4	5	4,2	3,4
HadGEM2, run3	A1B-20C	4,1	4,2	4,5	3,8	3,1	4,4	6,1	7,1	6,3	5,1	3,5	4,7	4,8	3,8	5,9	5	4,2
BCM2.0	A1B-20C	2,8	3,4	4,2	3,8	2,5	2,8	2,2	2,7	2,5	2,1	2,6	3,2	2,9	3,5	2,6	2,4	3,1
CCSM3	A1B-20C	3,3	2,8	2,3	1,9	2,5	2,7	4,0	3,9	3,7	3,4	2,3	3,3	3	2,2	3,5	3,2	3,1
CGCM3.1-T47	A1B-20C	3,0	3,8	3,0	3,0	1,9	1,6	2,8	2,8	2,1	2,7	2,3	2,4	2,6	2,6	2,4	2,4	3
CSIRO-Mk3	A1B-20C	1,0	2,1	2,1	1,1	1,4	1,5	2,3	1,4	2,2	1,6	1,1	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6
ECHAM5	A1B-20C	4,8	4,3	2,1	1,4	2,7	3,4	4,2	4,9	4,3	4,2	3,8	4,4	3,7	2,1	4,2	4,1	4,5
ECHAM5, run2	A1B-20C	3,9	3,2	2,6	2,7	2,4	3,7	4,4	4,8	3,9	3,2	4,2	3,7	3,6	2,6	4,3	3,8	3,5
ECHAM5, run3	A1B-20C	3,1	3,1	2,1	2,0	2,5	3,3	4,2	4,3	3,3	3,0	3,7	3,6	3,2	2,2	3,9	3,3	3,2
HadCM3	A1B-20C	3,7	4,6	2,5	2,7	3,4	3,8	4,5	5,9	4,7	3,4	3,2	3,6	3,8	2,9	4,7	3,8	4,1
HadGEM	A1B-20C	3,3	3,3	3,8	4,2	2,6	4,1	5,0	5,6	5,0	3,6	3,4	2,8	3,9	3,5	4,9	4	3,1
IPSL-CM4	A1B-20C	3,7	2,6	2,9	3,6	3,9	4,2	4,5	4,1	5,1	4,3	3,9	4,1	3,9	3,5	4,2	4,4	3,5
BCM2.0	A2-20C	4,1	4,4	4,4	4,7	2,6	2,9	2,4	3,2	2,9	1,9	2,8	3,6	3,3	3,9	2,8	2,5	4
CCSM3	A2-20C	3,2	3,6	3,5	3,6	4,1	5,3	6,9	6,3	4,6	4,2	3,0	3,7	4,3	3,7	6,2	3,9	3,5
CSIRO-Mk3	A2-20C	2,8	3,1	3,1	2,1	2,1	2,1	3,3	2,5	3,4	2,5	2,9	2,5	2,7	2,4	2,6	2,9	2,8
ECHAM5	A2-20C	4,1	3,9	2,5	1,7	2,0	3,3	4,0	4,7	4,3	4,2	3,7	4,0	3,5	2,1	4	4,1	3,9
ECHAM5, run2	A2-20C	4,4	4,0	3,8	3,3	3,0	3,9	5,1	5,1	4,6	3,1	4,2	4,0	4,0	3,4	4,7	4,0	4,1
ECHAM5, run3	A2-20C	3,5	3,8	3,1	2,9	3,4	3,2	4,6	4,7	4,0	3,1	2,9	3,4	3,5	3,1	4,2	3,3	3,5
HadCM3	A2-20C	3,1	4,3	3,3	3,2	3,7	3,4	4,4	5,8	5,1	3,7	3,2	3,1	3,8	3,4	4,5	4	3,4
HadGEM	A2-20C	3,7	4,1	2,8	3,8	3,4	4,0	5,9	6,9	5,6	4,1	4,0	3,2	4,3	3,3	5,6	4,6	3,7
IPSL-CM4	A2-20C	4,4	3,5	4,1	4,9	4,1	4,8	4,3	4,8	5,3	4,2	4,4	4,6	4,5	3,4	4,6	4,7	4,2

Tab. A. 6: Niederschlagsänderung [%] im Zeitraum 2021-2050 (KLIWA I) im Vergleich zu 1971-2000 (20C).  
 Orange: Abnahme, Blau: Zunahme; heller Farbton: 10-20%, mittlerer Farbton: 20-40%, dunkler Farbton: >40%, keine Farbe: Veränderung <10%

Modell	Vergleich	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	F	S	H	W
MPI-ESM-LR, run1	RCP2.6-20C	2	2	-1	8	14	7	-13	0	1	3	9	17	4	8	-3	4	8
MPI-ESM-LR, run2	RCP2.6-20C	10	-2	21	-3	-7	2	-14	3	-4	7	0	16	2	2	-4	1	9
MPI-ESM-LR, run3	RCP2.6-20C	2	3	-10	4	-3	-1	-7	-3	-6	4	4	6	-1	-3	-3	1	4
MPI-ESM-LR, run1	RCP4.5-20C	-6	7	17	17	11	3	-8	-15	7	2	10	9	4	15	-6	6	4
MPI-ESM-LR, run2	RCP4.5-20C	1	-10	15	-4	-3	-2	-17	-7	-9	9	9	9	-1	2	-9	3	1
MPI-ESM-LR, run3	RCP4.5-20C	13	4	-12	-5	2	0	-11	-5	4	-3	9	10	1	-5	-5	4	9
CNRM-CM5	RCP4.5-20C	11	2	8	4	1	19	11	15	17	0	-3	8	8	4	15	5	7
HadGEM2-ES	RCP4.5-20C	29	9	2	18	18	-1	-15	-21	-20	-8	0	4	2	12	-12	-9	13
MPI-ESM-LR, run1	RCP8.5-20C	-8	2	5	6	1	10	-14	-16	-3	13	-1	-6	-1	4	-6	3	-4
MPI-ESM-LR, run2	RCP8.5-20C	12	13	19	-4	-8	-2	-13	-1	-6	5	14	-1	2	1	-6	5	8
MPI-ESM-LR, run3	RCP8.5-20C	11	-2	-5	1	-2	-6	-1	0	-6	-7	4	-3	-1	-2	-3	-3	2
CNRM-CM5	RCP8.5-20C	13	6	11	17	5	18	9	25	14	16	1	5	12	10	17	10	8
HadGEM2-ES	RCP8.5-20C	15	20	4	22	12	0	2	-25	-23	-11	14	-1	3	12	-7	-6	10
BCM2.0	B1-20C	9	13	12	19	-8	6	-1	-3	-8	-2	1	17	4	6	1	-3	12
CCSM3	B1-20C	-9	1	4	8	-3	-17	-15	-2	-14	-9	-10	-1	-5	3	-13	-11	-2
CSIRO-Mk3	B1-20C	-5	-3	0	10	-2	11	4	-6	5	-7	3	4	1	2	3	0	-2
ECHAM5	B1-20C	10	11	20	27	-6	-7	27	13	12	21	4	5	10	11	10	12	9
ECHAM5, run2	B1-20C	3	3	-17	-1	-12	-3	5	8	11	13	-10	6	0	-10	3	3	4
ECHAM5, run3	B1-20C	-1	-6	7	6	-4	3	-2	-13	13	10	-14	10	0	3	-4	1	1
HadCM3	B1-20C	1	-1	13	3	4	0	-9	-4	-2	-2	10	-4	0	6	-4	3	-1
IPSL-CM4	B1-20C	-1	0	-6	-4	10	-7	-5	-4	4	-4	-11	0	-3	0	-5	-5	0
CNRM-CM33	A1B-20C	21	-4	10	-2	-1	-4	-1	-8	-2	7	-14	2	-1	1	-4	-3	7
HadCM3C, run1	A1B-20C	4	4	7	9	18	8	-11	4	-1	-4	11	11	6	12	1	2	6
HadCM3C, run2	A1B-20C	8	-8	13	14	3	2	-29	-19	1	8	9	5	3	11	-12	6	3
HadGEM2, run1	A1B-20C	-7	16	-5	17	6	12	-13	-4	-5	-18	-15	4	-1	5	-1	-13	4
HadGEM2, run2	A1B-20C	-12	7	-5	18	3	-6	-23	-30	-12	-10	-25	-2	-8	4	-19	-17	-3
HadGEM2, run3	A1B-20C	-2	-1	9	5	8	10	-28	-14	-7	-9	-13	-5	-4	7	-10	-10	-2
BCM2.0	A1B-20C	-2	17	21	16	6	6	4	5	-2	-10	-2	14	5	13	5	-5	8
CCSM3	A1B-20C	0	12	-4	12	-1	-3	10	15	-1	-11	-5	2	1	2	6	-6	5
CGCM3.1-T47	A1B-20C	2	13	18	-3	9	-4	-12	-15	2	-11	4	7	-1	7	-10	-2	6
CSIRO-Mk3	A1B-20C	-2	-8	-4	12	-7	13	5	-6	-5	-1	5	2	0	0	4	0	-3
ECHAM5	A1B-20C	-1	1	22	19	-13	-16	5	-8	-1	8	10	0	2	7	-7	6	0
ECHAM5, run2	A1B-20C	9	0	9	14	-4	17	-6	4	13	-1	-7	25	6	6	5	0	13
ECHAM5, run3	A1B-20C	7	-3	-4	-2	-2	2	2	-4	30	4	-14	20	2	-3	0	3	9
HadCM3	A1B-20C	8	9	11	-2	-5	-8	-7	-13	-5	-2	8	2	-1	1	-9	1	6
HadGEM	A1B-20C	3	10	-1	-2	10	2	-9	-25	-6	7	-5	11	0	3	-10	-2	8
IPSL-CM4	A1B-20C	-19	-9	-8	-7	9	-3	0	3	8	-5	-9	4	-4	-3	0	-3	-9
CCSM3	A2-20C	0	8	-12	7	1	11	7	-7	-20	-13	-2	1	-1	-2	5	-10	4
CSIRO-Mk3	A2-20C	4	-8	0	0	11	5	7	3	6	20	0	9	5	4	5	9	2
ECHAM5	A2-20C	1	-20	15	15	-9	-16	8	-8	-3	21	-7	4	0	8	-6	3	-3
ECHAM5, run2	A2-20C	6	-7	-4	-5	6	-8	-7	-7	11	4	-9	9	-1	-1	-7	0	4
ECHAM5, run3	A2-20C	18	-17	-7	7	-4	3	-2	-4	19	5	-1	32	4	-2	-1	6	10
HadCM3	A2-20C	-3	4	9	9	-1	-3	-4	-13	1	8	5	2	0	0	-6	5	2
HadGEM	A2-20C	1	29	8	8	2	1	-10	-19	-7	28	-5	0	1	2	-8	4	8
IPSL-CM4	A2-20C	-5	-3	-5	-5	3	-14	-8	-5	-14	-2	-9	-3	-6	-4	-9	-8	-4

Tab. A. 7: Niederschlagsänderung [%] im Zeitraum 2071-2100 (KLIWA II) im Vergleich zu 1971-2000 (20C).  
 Orange: Abnahme, Blau: Zunahme; heller Farbton: 10-20%, mittlerer Farbton: 20-40%, dunkler Farbton: >40%, keine Farbe: Veränderung <10%

Modell	Vergleich	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	F	S	H	W
MPI-ESM-LR, run1	RCP2.6-20C	-3	2	-6	11	16	2	-19	-5	7	2	9	6	2	7	-7	6	3
MPI-ESM-LR, run2	RCP2.6-20C	21	1	12	0	-4	-7	-9	1	-13	-5	5	16	1	2	-5	-4	13
MPI-ESM-LR, run3	RCP2.6-20C	13	-6	4	7	-4	-2	-9	6	5	-9	-1	5	0	2	-2	-2	4
MPI-ESM-LR, run1	RCP4.5-20C	5	-1	12	0	11	3	-26	-22	-3	-8	11	8	-1	8	-15	0	5
MPI-ESM-LR, run2	RCP4.5-20C	12	13	21	-3	-5	-8	-24	-11	-6	1	8	22	1	3	-15	1	17
MPI-ESM-LR, run3	RCP4.5-20C	10	2	8	1	-7	-13	-10	-12	-9	6	18	5	0	0	-12	6	5
CNRM-CM5	RCP4.5-20C	15	9	22	12	6	29	9	7	7	5	-1	11	11	12	15	4	12
HadGEM2-ES	RCP4.5-20C	30	4	8	19	14	0	-18	-38	-15	5	15	8	3	14	-17	2	13
MPI-ESM-LR, run1	RCP8.5-20C	3	15	6	15	10	-18	-39	-29	-17	1	10	8	-3	10	-29	-1	9
MPI-ESM-LR, run2	RCP8.5-20C	34	27	35	22	-7	-9	-26	-26	-21	12	13	20	5	14	-20	2	27
MPI-ESM-LR, run3	RCP8.5-20C	19	7	9	23	-11	-23	-34	-34	-14	-14	9	13	-4	5	-30	-6	13
CNRM-CM5	RCP8.5-20C	11	29	21	16	9	35	13	19	18	13	9	16	17	14	22	13	18
HadGEM2-ES	RCP8.5-20C	46	5	18	24	9	-3	-48	-63	-38	-1	4	18	-1	17	-36	-11	21
BCM2.0	B1-20C	18	29	25	18	-7	3	-6	-1	-4	-2	2	13	6	10	-1	-1	20
CCSM3	B1-20C	0	13	2	14	-9	9	2	8	-4	-5	-6	-2	1	2	6	-5	5
CSIRO-Mk3	B1-20C	0	-7	5	11	-6	10	7	-4	-2	-1	8	14	3	2	4	2	3
ECHAM5	B1-20C	15	-9	32	34	-6	-21	-16	-24	-8	19	6	3	1	17	-20	6	5
ECHAM5, run2	B1-20C	10	5	-1	5	-8	-14	-8	-27	10	-3	0	19	-1	-2	-16	1	12
ECHAM5, run3	B1-20C	20	-2	-8	5	-16	-6	-13	-9	-1	15	-2	19	0	-7	-10	4	13
HadCM3	B1-20C	17	-1	14	6	7	-9	-20	-23	2	5	11	17	0	3	-17	6	12
IPSL-CM4	B1-20C	-3	-4	-17	-13	7	-9	-1	0	-6	-6	-3	1	-5	-8	-5	-5	-3
CNRM-CM33	A1B-20C	16	0	26	10	-7	-1	-7	-6	-4	4	2	-1	1	6	-5	0	4
HadCM3C, run1	A1B-20C	7	29	17	11	15	-10	-44	-46	-9	-2	13	23	4	14	-28	1	19
HadCM3C, run2	A1B-20C	25	9	36	8	15	-13	-63	-62	-34	-11	24	8	0	19	-39	-5	15
HadGEM2, run1	A1B-20C	3	7	0	6	7	-7	-61	-52	-29	-21	-11	-2	-12	4	-39	-19	4
HadGEM2, run2	A1B-20C	8	-6	7	7	3	-7	-57	-56	-32	-1	-24	2	-11	5	-38	-19	2
HadGEM2, run3	A1B-20C	-1	-7	-8	13	11	-9	-49	-47	-44	5	-18	2	-11	4	-33	-18	0
BCM2.0	A1B-20C	13	10	40	39	1	-4	-8	-13	-7	-5	4	25	6	23	-9	-2	16
CCSM3	A1B-20C	2	10	-6	18	-6	-12	-7	-11	-19	-14	5	8	-1	1	-10	-6	7
CGCM3.1-T47	A1B-20C	33	24	19	11	6	-3	-14	-19	4	-8	19	14	5	11	-11	4	22
CSIRO-Mk3	A1B-20C	0	-5	7	14	-9	18	14	-2	-9	-14	4	14	3	3	10	-6	3
ECHAM5	A1B-20C	14	2	24	40	-19	-17	-23	-40	-19	-8	12	12	-2	11	-26	-3	10
ECHAM5, run2	A1B-20C	9	12	3	7	-14	-20	-31	-31	0	-5	-3	27	-3	-2	-27	-3	16
ECHAM5, run3	A1B-20C	25	11	12	13	-12	-20	-16	-26	8	11	7	20	4	4	-20	9	19
HadCM3	A1B-20C	11	18	18	0	-6	-14	-32	-41	-20	-7	2	21	-5	3	-28	-7	17
HadGEM	A1B-20C	28	12	10	-6	11	-6	-41	-44	-39	12	7	14	-3	5	-29	-6	18
IPSL-CM4	A1B-20C	-12	-2	-9	-19	5	-8	-11	-14	-15	-9	-11	-4	-9	-8	-11	-11	-7
CCSM3	A2-20C	0	3	-13	-11	-18	-25	-16	-14	-18	-7	5	16	-6	-14	-19	-4	8
CSIRO-Mk3	A2-20C	0	5	4	14	-1	10	9	-8	-12	3	6	16	4	5	4	0	6
ECHAM5	A2-20C	20	5	26	32	-2	-23	-17	-35	-17	6	2	16	2	16	-25	-2	14
ECHAM5, run2	A2-20C	27	6	-8	-2	-14	-23	-30	-37	-13	8	-4	26	-4	-8	-30	-3	20
ECHAM5, run3	A2-20C	15	2	5	5	-21	-18	-29	-18	-10	21	-7	27	-2	-4	-22	1	16
HadCM3	A2-20C	18	8	28	6	-2	-10	-33	-45	-18	0	18	17	-2	9	-28	1	15
HadGEM	A2-20C	13	32	1	-3	-1	-12	-41	-53	-31	10	5	10	-6	-1	-34	-5	18
IPSL-CM4	A2-20C	3	-1	-12	-16	-5	-8	-2	-7	-5	-10	-3	-9	-6	-12	-6	-6	-3

