Das KLIWA-Ensemble



KLIWA-Berichte

Heft 25

KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

KLIWA Partner

Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

RheinlandPfalz
MINISTERIUM FÜR
LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU,
UMWELT UND FORSTEN

HESSEN
Hessisches Ministerium
für Landwirtschaft und
Umwelt, Weinbau, Forsten,
Jagd und Heimat

Ministerium für Umwelt,
Klima, Mobilität, Agrar
und Verbraucherschutz
SAARLAND

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

Impressum

Herausgeber	Kooperation KLIWA – www.kliwa.de
	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)
	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern)
	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU Rheinland-Pfalz)
	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)
	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland (LUA SL)
	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Herausgabedatum	September 2026
Redaktionelle Bearbeitung	Christoph Müller und Dr. Matthias Zimmer (beide Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz)
Satz:	Tatjana Schollmayer (LfU Rheinland-Pfalz)

Digitalversion unter www.kliwa.de

Das KLIWA-Ensemble

KLIWA-Berichte

Heft 25

KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

Abkürzungsverzeichnis

BLfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (heute BMV)
BMV	Bundesministerium für Verkehr
CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CCLM	COSMO model in CLimate Mode
CEC	Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
CLMcom	Climate Limited-area Modelling Community
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CO2	Kohlenstoffdioxid
DJF	Dezember – Februar
DWD	Deutscher Wetterdienst
EC-EARTH	European community Earth-System Model
EPISODES	Empirisch-Statistische Downscaling-Methode, entwickelt durch den DWD
ESM	Earth System Model
EURO-CORDEX	Coordinated Downscaling Experiment – European Domain
GCM	Global Circulation Model – Globales Klimamodell
GWN	Grundwasserneubildung
GWN-BW	Grundwasserneubildung-Bodenwasserhaushalt (Bodenwasserhaushaltsmodell)
HadGEM	Hadley Centre Global Environmental Model
ICHEC	Irish Centre for High-End Computing
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JJA	Juni – August
KLIWA	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LARSIM	Large Area Simulation Model (Wasserhaushaltsmodell)
MAM	März – Mai
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
MOHC	Met Office Hadley Centre
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie
MQ	Mittlerer Abfluss
NUKLEUS	Nutzbare Lokale Klimainformationen für Deutschland
P99	99. Perzentil des täglichen Niederschlags
RACMO	Regional Atmospheric Climate Model
RCA	Rossby Centre – Regional Atmospheric Climate model
RCM	Regionales Klimamodell
RCP	Representative Concentration Pathways
ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
SMHI	Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut
SON	September – November
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
UDAG	Updating the Data basis for Adaptation to climate change in Germany
UHOH	Universität Hohenheim
WaSiM	Water Balance Simulation Model (Wasserhaushaltsmodell)
WETTREG	WETTerlagen-basierte REGionaliserungsmethode
WRF	Weather Research and Forecasting Model

Inhalt

1 Zusammenfassung 6

2 Einleitung 8

3 Methodik 9

3.1 Wesentliche Aspekte der Klimamodellierung 9

3.2 Das KLIWA-Ensemble 11
3.2.1 Projektionsauswahl / Ensemblezusammensetzung 11
3.2.2 Klimatische Parameter für die Wasserhaushaltsmodellierung 14

4 Ergebnisse nach Kennwerten 15

4.1 Temperatur und Temperaturkenntage 15
4.1.1 Mittlere Lufttemperatur 15
4.1.2 Länge der thermischen Vegetationsperiode 19

4.2 Gebietsniederschlag 21
4.2.1 Mittlere Niederschlagssumme 21
4.2.2 Tage mit Niederschlag (≥ 1 mm) 24
4.2.3 Maximaler Tagesniederschlag 26
4.2.4 99. Perzentil des täglichen Niederschlags 26
4.2.5 Anteil der Niederschlagssumme von Tagen mit ≥ P99 27

4.3 Meteorologisch berechenbare Indizes der Wasserbilanz 28
4.3.1 Potenzielle Verdunstung (Grasreferenzverdunstung) 28
4.3.2 Klimatische Wasserbilanz 29
4.3.3 Standardisierter Niederschlags-Verdunstungs-Index 31

4.4 Weitere Parameter 32
4.4.1 Luftfeuchte 32
4.4.2 Globalstrahlung 34
4.4.3 Windgeschwindigkeit 36

5 Weiterführende Ergebnisse 37

5.1 Abfluss 37

5.2 Grundwasserhaushalt 38

5.3 Konvektiver Starkregen 40

6 Literatur 41

A Anhang 44

A.1 Einordnung des KLIWA-Ensembles in Bezug auf das DWD Referenzensemble 44

A.2 Ergänzendes Informationsmaterial – KLIWA-Gebiete und Regionen 46

Endnoten 48

1 Zusammenfassung

Die KLIWA-Ensembles auf Basis des Emissionsszenarios RCP8.5 wurden mit dem Ziel erstellt, innerhalb von KLIWA eine gemeinsame Datengrundlage zur Untersuchung zukünftiger Veränderungen des Klimas und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt zu schaffen. Im vorliegenden KLIWA-Heft 25 werden die Entstehung des KLIWA-Ensembles bzw. des erweiterten KLIWA-Ensembles sowie die klimatischen Veränderungen, die aus diesen Ensembles abgeleitet werden können, beschrieben.

Die regionalen Klimaprojektionen der KLIWA-Ensembles basieren auf den Modellen des CMIP5. Mit Ausnahme der mithilfe von EPISODES erzeugten Klimaprojektionen wurden sie im Rahmen der Projekte EURO-CORDEX und ReKliEs-De erstellt. Das KLIWA-Ensemble umfasst nur einen Teil der von CMIP5 bereitgestellten regionalisierten Projektionen, da alle zu einem Stichtag in EURO-Cordex/ReKliEs-De verfügbaren regionalen Klimasimulationen des Emissionsszenarios RCP8.5 einer mehrstufigen Qualitätsprüfung unterzogen wurden.

Dabei wurden zunächst mittels einer Literaturstudie diejenigen Projektionen identifiziert, die als plausibel beschrieben wurden. Diese wurden anschließend in einem Audit auf ihre Fähigkeit überprüft, die zeitlichen und räumlichen Temperatur- und Niederschlagsmuster im Bezugszeitraum 1971–2000 in den Naturräumen[1] des KLIWA-Gebiets (Kapitel A2) zu reproduzieren. Die zugrundeliegende Methodik des Audits wurde am Bayerischen Landesamt für Umwelt entwickelt, umgesetzt und publiziert. Bei den nach dem Audit verbliebenen regionalen Klimaprojektionen wurde die Verfügbarkeit aller für die (Boden-) Wasserhaushaltsmodellierung benötigten klimatologischen Variablen geprüft. Waren diese nicht vollständig verfügbar, wurden die entsprechenden Klimasimulationen nicht in die KLIWA-Ensembles aufgenommen. Am Ende dieses Prozesses standen das KLIWA-Ensemble, bestehend aus 9 und das erweiterte KLIWA-Ensemble aus 13 regionalen Klimaprojektionen. Diese Projektionen wurden anschließend mittels einer Bias-Adjustierung und einer Regionalisierung durch den DWD für die Wasserhaushaltsmodellierung (KLIWA-Ensemble) und Bodenwasserhaushaltsmodellierung (erweitertes KLIWA-Ensemble) nutzbar gemacht.

Die klimatische Auswertung des KLIWA-Ensembles zeigt, dass für das KLIWA-Gebiet zukünftig bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit weitreichenden Veränderungen gerechnet werden muss:

Temperatur

- Die Lufttemperatur wird in allen KLIWA-Regionen und Jahreszeiten weiterhin ansteigen.
- Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts beträgt der Anstieg der Lufttemperatur 3 bis 4 °C gegenüber 1971–2000 (d.h. 4 bis 5 °C gegenüber der frühindustriellen Zeit).

Niederschlag

- Für das Winterhalbjahr ist mit höheren Niederschlagssummen zu rechnen.
- Die Tage mit Niederschlag gehen insgesamt zurück – besonders im Sommerhalbjahr.
- Besonders im Sommer ist mit selteneren, aber intensiveren Niederschlagstagen zu rechnen.

Weitere Kenngrößen

- Der Anstieg der potenziellen Verdunstung und der Rückgang in der klimatischen Wasserbilanz können Wasserknappheitsphasen begünstigen.
- Der standardisierte Niederschlagsverdunstungsindex (SPEI) zeigt im Sommerhalbjahr Abnahmen – vor allem gegen Ende des 21. Jahrhunderts.

Die klimatischen Veränderungen haben weitreichende Folgen für den Wasserhaushalt. Dies zeigen die Ergebnisse der Wirkmodellierung in den Bereichen „Abfluss“ (Kapitel 5.1) und „Grundwasserhaushalt“ (Kapitel 5.2). Im KLIWA-Gebiet muss insgesamt mit höheren Hochwasserabflüssen und geringeren

Niedrigwasserabflüssen gerechnet werden. Die Grundwasserneubildung im KLIWA-Gebiet hat durch die höhere Verdunstung und eine geringere Schneespeicherung bereits in der jüngeren Vergangenheit einen Rückgang gezeigt. Diese Entwicklung dürfte sich aufgrund des klaren positiven Temperatursignals in Zukunft verstärkt fortsetzen.

2 Einleitung

Seit 1999 untersucht KLIWA[2] die Veränderungen des Klimawandels in Süddeutschland und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft. Im Jahr 2024 wurde die Kooperation der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie dem DWD um die beiden Bundesländer Hessen und Saarland erweitert. Neben der Analyse von meteorologischen und hydrologischen Messdaten und deren Langzeitverhalten (Bereich M: Monitoring) ist die Abschätzung künftiger klimatischer Veränderungen und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt ein zentraler Arbeitsbereich in KLIWA (Bereich S: Szenariorechnungen). Die Abschätzung künftiger klimatischer und hydrologischer Veränderungen spielt wiederum eine zentrale Rolle bei der Entwicklung und Dimensionierung von Anpassungsmaßnahmen (Bereich A: Anpassung).

Die Methoden und Datengrundlagen werden in KLIWA kontinuierlich weiterentwickelt und fortgeschrieben, um sicherzustellen, dass die daraus abgeleiteten Aussagen dem aktuellen Erkenntnisstand entsprechen. Angelehnt an die Zyklen der Sachstandsberichte des IPCC werden auch die Datengrundlagen im Bereich S etwa alle sieben Jahre aktualisiert. Die Datengrundlage für den aktuellen Zyklus stellen das sogenannte KLIWA-Ensemble bzw. das erweitere KLIWA-Ensemble dar. Hierbei handelt es sich um ein Klimaprojektionsensemble bestehend aus neun bzw. aus 13 Klimaprojektionen. Das KLIWA-Ensemble stellt einen Meilenstein dar, da in den Bundesländern erstmals eine gemeinsame Datengrundlage auf Ebene der Klimaprojektionen in KLIWA geschaffen wurde. Im Folgenden sollen das (erweiterte) KLIWA-Ensemble und dessen Ergebnisse beschrieben und dargestellt werden.

In diesem Heft sollen den Lesenden die verschiedenen Aspekte der Klimamodellierung vermittelt werden (Kapitel 3.1). Außerdem wird anhand der Erstellung der KLIWA-Ensembles beschrieben, welche Arbeitsschritte notwendig sind, um eine (Boden-)Wasserhaushaltsmodellierung durchführen zu können und welche Kennwerte und Parameter für die (Boden-)Wasserhaushaltsmodellierung relevant sind (Kapitel 3.2).

In Kapitel 4 werden die projizierten Veränderungen der klimatischen Parameter auf Basis des KLIWA-Ensembles dargestellt und beschrieben. Kapitel 4.1 beschreibt die Veränderungen der bodennahen Lufttemperatur sowie der thermischen Vegetationsperiode, Kapitel 4.2 Veränderungen verschiedener Niederschlagskennwerte. In Kapitel 4.3 werden die Veränderungen von Indizes im Zusammenhang mit der klimatischen Wasserbilanz beschrieben. Die Veränderungen der übrigen für die (Boden-)Wasserhaushaltsmodellierung relevanten Größen werden in Kapitel 4.4 beschrieben. In Kapitel 5 wird auf weiterführende Arbeiten verwiesen, die auf regionalen Klimaprojektionsergebnissen basieren, welche im Rahmen der KLIWA-Ensembles erstellt wurden und über die vorliegende Untersuchung hinausgehen. Auch werden Hinweise zu Publikationen in den Bereichen Abfluss, Grundwasser und Starkregen gegeben. In Anhang A.1 wird das KLIWA-Ensemble in Bezug zu dem DWD-Referenzensemble gesetzt. Außerdem sind dort eine Karte und Auflistung der KLIWA-Untersuchungsgebiete und -regionen zu finden.

3 Methodik

3.1 Wesentliche Aspekte der Klimamodellierung

Das aktuelle Wissen zum weltweiten Klimawandel wird circa alle sieben Jahre durch den Weltklimarat (IPCC) zusammengetragen und fließt in die Gestaltung klimapolitischer Ziele ein.

In den IPCC-Berichten werden Klimaszenarien gegenübergestellt, die unterschiedliche Erfolge im Klimaschutz repräsentieren. Es ist unklar, wie sich die Treibhausgaskonzentrationen der Atmosphäre in Zukunft entwickeln werden, da dies maßgeblich von politischen und gesellschaftlichen Entscheidungen sowie technischen Entwicklungen abhängt. Aus diesem Grund beschreiben die Szenarien denkbare Entwicklungen der menschengemachten Rahmenbedingungen. Dabei wird in verschiedenen Abstufungen von Hochemissionsszenarien bis Klimaschutzszenarien unterschieden. Diese Szenarien werden ständig weiterentwickelt und tragen technische Kürzel wie SRES (IPCC 2007), RCP (IPCC 2013) oder SSP (IPCC 2021).

Im Rahmen des fünften IPCC-Sachstandsberichts (IPCC 2013) wurden die RCP-Szenarien genutzt, um mögliche zukünftige Entwicklungen von atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen (van Vuuren et al. 2011) zu beschreiben. Diese werden aktuell von KLIWA verwendet. Sie integrieren dabei viele Faktoren, von den Treibhausgasemissionen bis zu den Landnutzungsänderungen. Verfügbare RCP-Szenarien sind RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5. Je größer die Zahl, desto höher ist der zusätzliche durch anthropogene Emissionen erzeugte Strahlungsantrieb im jeweiligen Szenario (DWD 2025).

Alle Emissionsszenarien stellen eine einzelne denkbare Entwicklung der Treibhausgasemissionen dar. Das Szenario RCP2.6 beschreibt eine Entwicklung mit erfolgreichem Klimaschutz und einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Klima. Im Sinne des Vorsorgegedankens und um die potenziell möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt abschätzen zu können, hat sich KLIWA entschieden, den Schwerpunkt auf die Betrachtung von RCP8.5[3] zu legen. Dieses Szenario beschreibt eine Entwicklung mit hohem Einsatz fossiler Energieträger und damit weiterhin stark ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen. Bis zuletzt lagen die gemessenen CO2-Emissionen in etwa im Bereich des Szenarios ohne Klimaschutz (RCP8.5), obwohl sich bei den Treibhausgasemissionen in jüngster Vergangenheit ein Plateau auszubilden scheint (Global Carbon Budget 2024). Im Rahmen der Vorbereitung des 7. Sachstandsberichts des IPCC, der für 2027/2028 erwartet wird, wurden neue Emissionsszenarien veröffentlicht (van Vuuren et al. 2026). Darin wird das Eintreten des Szenarios RCP8.5 als unplausibel eingestuft, weshalb es künftig nicht mehr für globale Klimaprojektionen verwendet werden soll. Die Aussagen dieses Szenarios hinsichtlich der klimatischen Veränderungen bleiben jedoch für einen großen Teil der Anwendungen weiterhin nutzbar (DAS-Basisdienst 2026), da sich die Auswirkungen der verschiedenen Klimaszenarien in den kommenden Jahrzehnten nur geringfügig unterscheiden. Für Anpassungsfragen zählen zudem die regionalen, klimatischen Auswirkungen (Temperatur, Niederschlag) – diese bleiben aus heutiger Sicht verlässlich abzuleiten. Der Temperaturverlauf der letzten Jahre liegt im KLIWA-Gebiet aktuell eher am oberen Rand der vom RCP8.5 projizierten Entwicklung. Für mittelfristige Planungen ist die Wahl des Szenarios daher von untergeordneter Bedeutung. Zudem ist zu erwarten, dass die unter RCP8.5 simulierten Veränderungen der Lufttemperatur für das Ende des 21. Jahrhunderts unter dem stärksten Emissionsszenario des 7. Sachstandsberichts des IPCC einige Jahrzehnte später eintreten werden.

Eine wesentliche Informationsquelle, wie sich die unterschiedlichen Emissionsszenarien u.a. auf die Oberflächentemperatur der Erde auswirken, sind globale Klimamodelle. Sie berechnen das Klima weltweit mit einer räumlichen Auflösung von meist über 100 km x 100 km. Deshalb können die globalen Modelle subskalige Prozesse nicht oder nur näherungsweise darstellen. Daher werden zusätzlich regionale Klimamodelle herangezogen, die die Daten der globalen Klimamodelle für einen räumlichen Ausschnitt (z. B. Europa) über ein Regionalisierungsverfahren verfeinern. Dadurch haben die Klimamodelle eine höhere räumliche Auflösung und simulieren somit auch die kleinräumigen Prozesse realistischer (s. Abbildung 1) (DWD 2025).

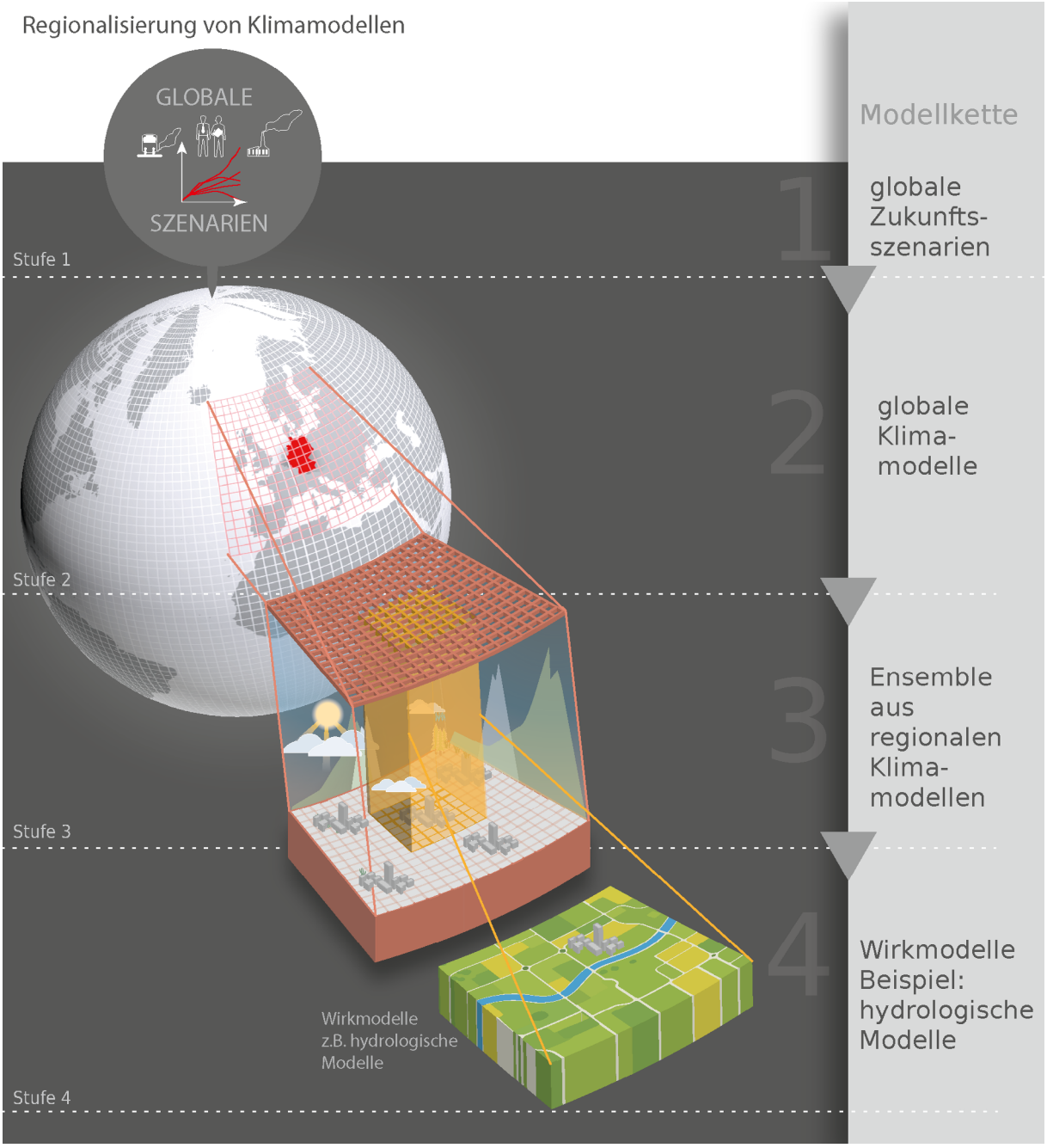


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Modellkette vom globalen Klimamodell zum regionalen Klimamodell und letztlich die Wirkmodelle. Durch diese Anordnung können Regionen differenziert ausgewertet werden (Quelle: DWD).

Bei regionalen Klimamodellen kann zwischen statistischen und dynamischen Regionalisierungsverfahren unterschieden werden. Statistische Regionalisierungsverfahren stellen einen Zusammenhang zwischen großräumigen meteorologischen Mustern aus Klimamodelldaten und Beobachtungsdaten her, um zukünftige regionale Klimazustände zu generieren (Rechid et al. 2023). Beispiele für statistische Regionalisierungsverfahren für Deutschland sind EPISODES (Kreienkamp et al. 2018) und WETTREG (Kreienkamp et al. 2013, Enke et al. 2005). Dynamische Regionalmodelle simulieren wie globale Klimamodelle den physikalischen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Komponenten des Klimasystems. Die Randbedingungen für die regionalen Klimamodelle stammen dabei aus einem Globalmodell (DWD 2025).

Die Klimaprojektionen weisen aufgrund verschiedener Randbedingungen und Modellansätze Unterschiede in ihren Ergebnissen auf. Dies ist darin begründet, dass nicht alle klimarelevanten Prozesse sowie die natürliche Variabilität vollständig erforscht und verstanden sind und somit in den Modellen nur teilweise abgebildet werden können. Zudem stellen Modelle zwangsläufig immer eine Vereinfachung der Realität dar. Da nicht bekannt ist, welche Klimaprojektion der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung am nächsten kommt, sollten verschiedene Simulationen zu einem Ensemble zusammengefasst werden. Dieser Ansatz erlaubt die Bandbreite möglicher Entwicklungen abzuschätzen. Daher werden in KLIWA mehrere Projektionen in einem Ensemble gemeinsam verarbeitet und ausgewertet (Linke et al. 2024).

3.2 Das KLIWA-Ensemble

3.2.1 Projektionsauswahl / Ensemblezusammensetzung

Um eine einheitliche und belastbare Grundlage für Aussagen zum Klimawandel sowie darauf aufbauende Wirkungsmodellierungen und Anpassungsmaßnahmen zu schaffen, wurde am BLfU eine Plausibilitätsprüfung regionaler Klimaprojektionen entwickelt, das Bayerische Klimaprojektionsaudit (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021). Dieses stellt eine transparente Methode zur Auswahl der Klimaprojektionen für ein Ensemble anhand objektiver Kriterien und gewählter Fragestellungen dar. Die darauf basierende Auswahl an dynamischen regionalen Klimaprojektionen wurde von KLIWA übernommen.

Vor der Auditierung werden die Klimaprojektionen einer zweistufigen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Als nicht plausibel werden Projektionen bewertet, deren zugrundeliegende Globalmodelle nicht in der Lage sind, die regionalen Zirkulationsmuster und klimatischen Prozesse abzubilden, wenn die physikalische Konsistenz des Datensatzes eines Globalmodells für den Antrieb eines Regionalmodells nicht gegeben ist, oder andere physikalische Prozesse, wie die Treibhausgasentwicklung, nicht ausreichend abgebildet wurden (McSweeney et al. 2015 & Jerez et al. 2018). Es werden ausschließlich diejenigen Klimaprojektionen zum Audit zugelassen, welche in der Literatur (z. B. Dalelane et al. 2018, Smiatek et al. 2016) oder durch Beurteilungen dritter Fachinstitutionen, wie dem DWD mit dem DWD-Referenzensemble 2018 und dem ReKliEs-De-Projekt, als plausibel eingestuft wurden. In der zweiten Stufe der Plausibilitätsprüfung werden die Modelldaten der regionalen Klimaprojektionen auf fehlerhafte oder extreme Werte untersucht. In diesem Schritt können systematische Fehler, wie das Überschreiten von plausiblen Grenzwerten (z. B. mittlere Tagestemperaturen unter -50 °C) identifiziert werden. Wird in diesem Schritt eine unplausible Projektion erkannt, wird die Projektion (vorerst) von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen.

Im Audit wird geprüft, ob die regionalen Klimaprojektionen in der Lage sind, die regionalen klimatischen Bedingungen verschiedener Naturräume (z. B. Saisonalität des Niederschlags, räumliche Niederschlagsverteilung) für Niederschlag und Temperatur wiederzugeben. Zur Beurteilung wird das simulierte Klima für den Bezugszeitraum 1971–2000 mit Messdaten desselben Zeitraums verglichen. Es wird angenommen, dass ein Modell, welches das vergangene Klima zuverlässig simuliert, dies auch in der Zukunft kann. Bewertungskriterien im Audit sind die folgenden vier Indikatoren jeweils für Temperatur und Niederschlag:

- Die Abweichung des jährlichen Durchschnittswertes (Quantitätsindikator),
- die Abweichung des monatlichen Durchschnittswertes (Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug),
- die Abweichung des Jahresgangs der durchschnittlichen monatlichen Werte (Saisonalitätsindikator) und
- die Abweichung der räumlichen Verteilung der jährlichen Durchschnittswerte (Musterindikator).

Die Zusammenfassung der vier Indikatoren zu einer Bewertungskennzahl pro Projektion und Klimavariable erleichtert die Einordnung einzelner Projektionen in die Gesamtheit der zur Verfügung stehenden

Projektionen. Die Bewertungskennzahl gibt einen generellen Hinweis auf eine auffällige Abweichung, die dann mit den einzelnen Indikatoren oder weiteren Methoden näher analysiert werden kann. Zudem findet eine Betrachtung der Änderungssignale statt. Die detaillierte Methodik kann der Veröffentlichung des Bayerischen Landesamts für Umwelt (2020) entnommen werden.

Insgesamt haben sich damit 10 dynamische regionalisierte Projektionen (siehe Tabelle 1), als für den süddeutschen Raum geeignet herausgestellt. Eine von ihnen konnte aufgrund fehlerhafter Globalstrahlungsdaten nicht weiterverwendet werden, weshalb das seit 2019 bestehende KLIWA-Ensemble aus 9 Projektionen besteht und in der Wasserhaushaltsmodellierung (Kapitel 5.1) eingesetzt wird (s. Tabelle 1).

Für das erweiterte KLIWA-Ensemble wurde das Klimaprojektionsaudit ebenfalls für die 60 WETTREG2018-Projektionen mit unterschiedlichen Globalmodellen als Antrieb durchgeführt. Trotz leichter Unterschiede zwischen den einzelnen WETTREG-Projektionen konnten keine besonders auffälligen Projektionen identifiziert werden. Alle WETTREG-Projektionen bestanden das Audit. Da es sich um jeweils 10 Realisationen einer Projektion handelt, sind die Änderungssignale sehr ähnlich. Die Verwendung von 60 statistischen zusammen mit den 9 dynamischen, regionalisierten Klimaprojektionen, würde das Änderungssignal zu Gunsten der statistischen regionalisierten Klimaprojektionen gewichten. Daher wurden mit Hilfe der Selektionsmethode nach Dalelane et al. (2018) zwei repräsentative WETTREG-Projektionen (MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_ CEC-WETTREG2018_v1-r1 & MPI_ESM_r1i1p1_CEC-WETTREG2018_v1-r1) für das erweiterte KLIWA-Ensemble ausgewählt.

Darüber hinaus liegen die WETTREG-Projektionen nur für das deutsche Bundesgebiet vor. Daher können sie nicht als Antrieb für die Wasserhaushaltsmodellierung verwendet werden, da zahlreiche Flüsse des KLIWA-Gebiets in anderen Staaten entspringen. Für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung sind Daten, die das KLIWA-Gebiet abdecken dagegen ausreichend. Nachträglich wurden dem erweiterten Ensemble für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung zudem zwei weitere statistisch regionalisierte Projektionen, die mit der Regionalisierungsmethode EPISODES erstellt wurden, hinzugefügt. Daher besteht das erweiterte Ensemble der Bodenwasserhaushaltsmodellierung (Kapitel 5.2) aus 13 Projektionen (Tabelle 1).

Bei der gemeinsamen Betrachtung von dynamischen und statistischen Projektionen, wie es bei der Bodenwasserhaushaltsmodellierung (Kapitel 3.2.2 und 5.2) der Fall ist, sind die unterschiedlichen Eigenschaften der Projektionen zu berücksichtigen. Beispielsweise können zukünftig Wetterphänomene auftreten, die in der Vergangenheit nicht aufgetreten sind. Dadurch stoßen die aus der Vergangenheit etablierten Zusammenhänge zwischen großräumigen meteorologischen Mustern und Beobachtungsdaten (Kapitel 3.1) womöglich an ihre Grenzen und die Ergebnisse aus den statistischen Projektionen werden, insbesondere bei fortschreitender Simulationsdauer unter RCP8.5, weniger belastbar. Dennoch können die statistischen Projektionen als Informationserweiterung angesehen werden, da sie im Fall des KLIWA-Ensembles die Bandbreite erweitern (siehe hierzu auch Anhang A.1).

Tabelle 1: Kombinationen aus globalen Klimamodellen (GCMs) und regionalen Klimamodellen (RCMs) in KLIWA für das Szenario RCP8.5, die die Plausibilitätsprüfung und das Audit bestanden haben. Die Namen der einzelnen Klimamodelle setzen sich aus dem betreibenden Institut/Gruppe und dem verwendeten Modell zusammen. Weitere Informationen in den Modellnamen sind die jeweilige Version des Modells und das jeweilig verwendete Member (Anfangsbedingungen der Modellläufe).[4]

Ensemble	Szenario	Globales Klimamodell (GCM)	Member	Regionales Klimamodell (RCM)	Quelle
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	KNMI-RACMO22E	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	SMHI-RCA4	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACMO22E	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	UHOH-WRF361H	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	SMHI-RCA4	Brienen et al. 2020
KLIWA-Ensemble & Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	UHOH-WRF361H	Brienen et al. 2020
Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CEC-WETTREG2018 (statistisch)	Enke et al. 2005
Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CEC-WETTREG2018 (statistisch)	Enke et al. 2005
Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r12p1	EPISODES (statistisch)	Kreienkamp et al. 2019
Erweitertes KLIWA-Ensemble	RCP8.5	CCCma-CanESM2	r1p1	EPISODES (statistisch)	Kreienkamp et al. 2019
Nicht verwendete Projektion:					
	RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	UHOH-WRF361H (Globalstrahlung nicht plausibel)	

Regionalisierung und Bias-Adjustierung

In die KLIWA-Ensembles wurden nur Klimaprojektionen aufgenommen, die die räumliche und jahreszeitliche Dynamik des Klimas im Bezugszeitraum 1971–2000 zufriedenstellend abbilden können (vgl. Audit). Dennoch wird das vergangene Klima im Bezugszeitraum niemals perfekt wiedergegeben. Beispielsweise unterschätzen manche Modelle in den Alpen ganzjährig die Temperatur. Eine solche Abweichung zwischen simulierten und beobachteten Daten wird Bias genannt. Folgt der Bias regelmäßigen Mustern, kann eine sogenannte Bias-Adjustierung sinnvoll durchgeführt werden. Diese reduziert die Abweichung, indem die Modelldaten anhand der gefundenen Muster an die Messdaten angeglichen werden. Falls die Muster

nicht regelmäßig sind, kann keine Bias-Adjustierung durchgeführt werden. Solche Modelle wurden nicht in das KLIWA-Ensemble aufgenommen.

Neben dem Bias in den Klimaprojektionen ist es auch notwendig, die Sensitivitäten der Wirkungsmodelle auf die verwendeten Klimavariablen zu kennen. Ergebnisse im Rahmen von KLIWA zeigen, dass die Wasserhaushaltsgrößen stark auf Veränderungen des Niederschlags reagieren, wohingegen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit einen geringeren Einfluss besitzen und im Wesentlichen die Höhe der Verdunstung steuern. Die Sensitivität auf Veränderungen der Temperatur hängt dabei auch vom betrachteten Einzugsgebiet ab. Nicht plausible Klimaprojektionsdaten des Niederschlags und ggf. der Temperatur würden somit einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung bzw. Bodenwasserhaushaltsmodellierung besitzen. Zwar ist solch ein Bias mit einer Bias-Adjustierung reduzierbar, es sollten aber aus Sicht von KLIWA keine Klimaprojektionen genutzt werden, die offensichtliche Defizite in der Abbildung grundlegender, klimatischer Zusammenhänge aufweisen.

Die Regionalisierung und Bias-Adjustierung der Klimaprojektionen erfolgten im „BMVI-Expertennetzwerk" (heute: BMV-Forschungsnetzwerk) (Hänsel et al. 2020; Brienen et al. 2020) und wurden durch den DWD bereitgestellt. Die Methode zur Reduktion systematischer Abweichungen in Klimaprojektionsdaten ist in Haller et al. 2021 sowie Krähenmann et al. 2021 beschrieben.

Im Ergebnis stehen bias-adjustierte und regionalisierte Klimaprojektionsdaten mit einer nominellen Auflösung von 5 km x 5 km zur Verfügung. Zur klimatischen Auswertung konnten die Daten in dieser Auflösung verwendet werden. Für die daran anschließenden Wirkmodellierungen wurden die Daten auf die entsprechende Modellauflösung weiter regionalisiert. Als Beobachtungsdatensatz wurde der HYRAS-Datensatz (Razafimaharo et al. 2020) des DWD verwendet.

Für KLIWA wurden drei Zukunftszeiträume festgelegt, die zur primären Auswertung der klimatischen und der hydrologischen Kennwerte aber auch der Grundwasserneubildung herangezogen werden.

- Nahe Zukunft: 2021–2050
- Mittlere Zukunft: 2041–2070
- Ferne Zukunft: 2071–2100

Die Veränderungen für die Zukunft werden jeweils auf den Bezugszeitraum 1971–2000 bezogen.

3.2.2 Klimatische Parameter für die Wasserhaushaltsmodellierung

Um den Einfluss des fortschreitenden Klimawandels auf den Wasserhaushalt zu untersuchen, werden sogenannte Wirkungsmodellierungen durchgeführt. Dazu wird in der Modellkette dem regionalen Klimamodell noch ein weiteres Modell hintenangestellt. Bei den verwendeten Wirkungsmodellen handelt es sich um (Boden-)Wasserhaushaltsmodelle.

Für die Abflusssimulationen wird in den Bundesländern[5] Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (LARSIM-Entwicklergemeinschaft 2024) und in Bayern WaSiM (Schulla 2024) verwendet.

Bei der Bodenwasserhaushaltsmodellierung wird in allen KLIWA-Ländern das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW (Gudera, T. & Morhard, A. 2015) eingesetzt.

Alle genannten Modelle für die Wirkmodellierung benötigen aus den regionalen Klimaprojektionen die folgenden meteorologischen Eingangsdaten auf Tageswertbasis:

- Lufttemperatur
- Niederschlag
- relative Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit
- Globalstrahlung (oder Sonnenscheindauer)
- Luftdruck

4 Ergebnisse nach Kennwerten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des KLIWA-Ensembles dargestellt. Neben der Diskussion der meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag sowie ausgewählter klimatologischer Kenntage und Trockenheitsindikatoren werden die Parameter absolute und relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung vorgestellt.

4.1 Temperatur und Temperaturkenntage

Der Ausstoß von Treibhausgasen durch die menschlichen Aktivitäten resultiert in einer Veränderung des Erdklimas. Dies hat auch Auswirkungen auf die Lufttemperatur. Zu dem bereits eingetretenen Anstieg der Lufttemperatur in den letzten 150 Jahren seit der industriellen Revolution, ist durch einen weiteren Treibhausgasausstoß ein Fortschreiten des Anstiegs zu erwarten. An dieser Stelle werden die Ergebnisse des KLIWA-Ensembles für die Klimavariable Lufttemperatur und klimatologische Kenntage, die auf Basis der Lufttemperatur abgeleitet wurden, gezeigt.

4.1.1 Mittlere Lufttemperatur

Die mittlere Lufttemperatur, im Folgenden auch vereinfacht als Temperatur beschrieben, wird im KLIWA-Gebiet unter Berücksichtigung des Klimaszenarios RCP8.5 weiter deutlich ansteigen. Dabei ist die Richtungssicherheit der Projektionsergebnisse sehr hoch und die räumlichen Unterschiede gering. Dies gilt für alle betrachteten Zeithorizonte und Jahreszeiten.

Bei der Betrachtung des hydrologischen Jahres (November – Oktober) ist von einem Anstieg um 3 bis 4,3 °C bis zum Ende des Jahrhunderts auszugehen (Abbildung 2). Die räumlichen Unterschiede sind sehr klein. Den stärksten Anstieg mit mehr als 4 °C weist das KLIWA-Ensemble im Südosten des KLIWA-Gebiets (Regionen Obere Donau, Iller-Lech, Isar-Inn, Mittlere Donau und Bayerische Mittelgebirge) auf (Abbildung 3).

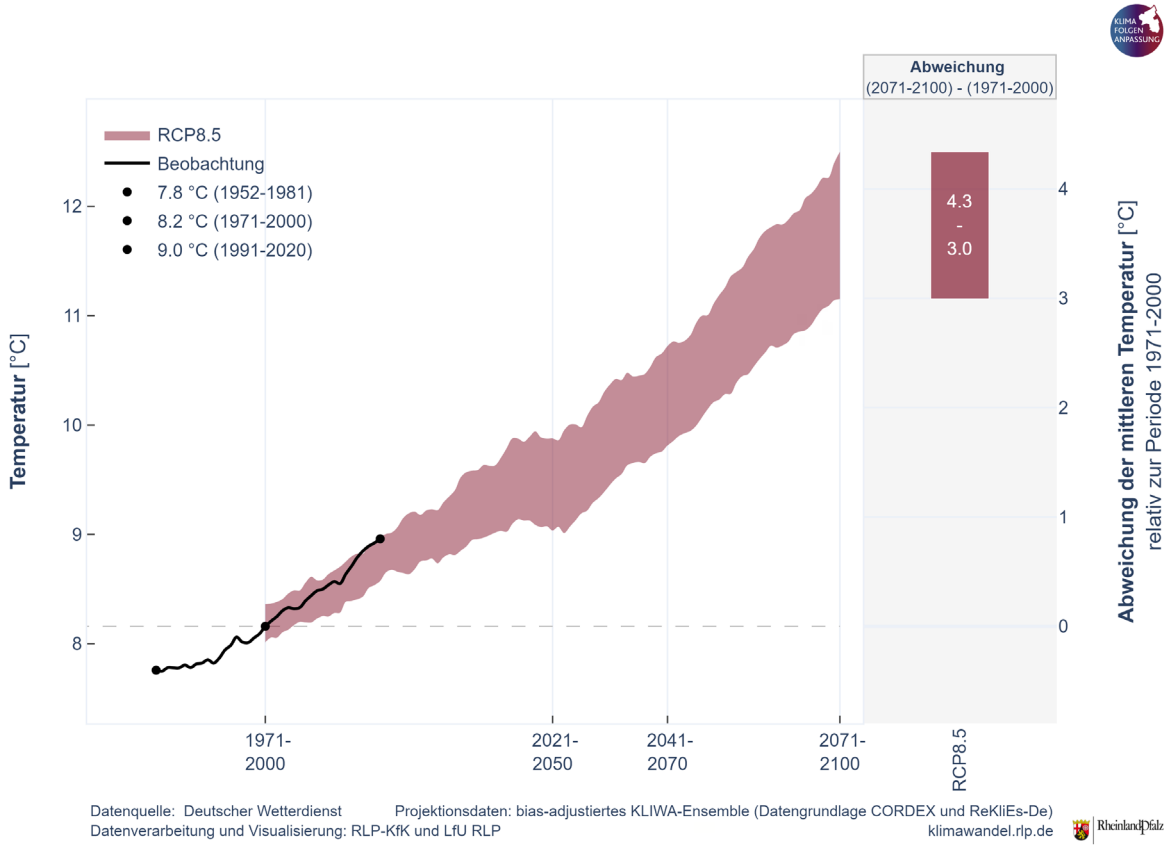


Abbildung 2: Entwicklung der Mitteltemperatur des hydrologischen Jahres (November – Oktober) im KLIWA-Gebiet. Dargestellt sind die gemessene Temperatur (schwarze Linie) sowie die projizierte Entwicklung auf Basis des KLIWA-Ensembles (roter Balken, dargestellt ist die Bandbreite zwischen Ensembleminimum und Ensemblemaximum), jeweils als 30-jährige gleitende Mittel.

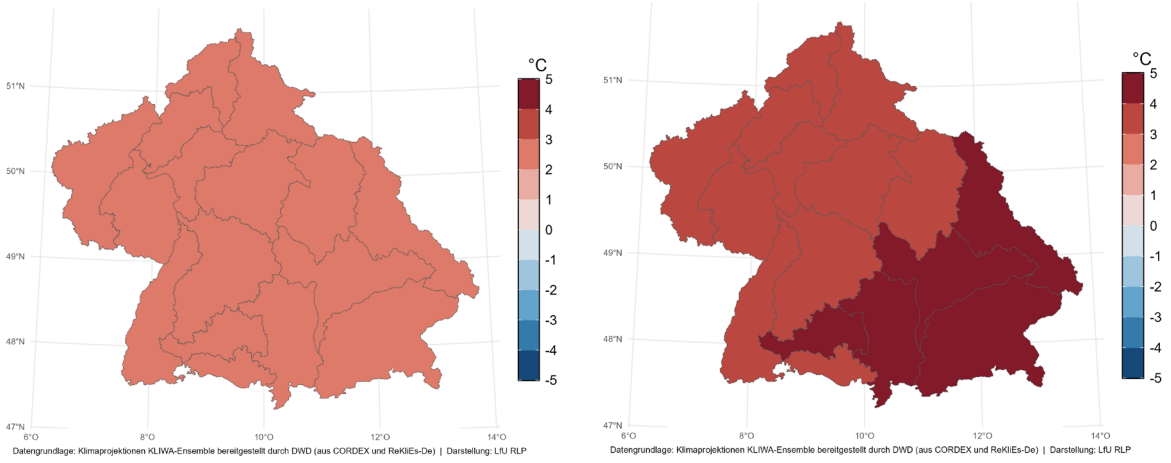


Abbildung 3: Änderung der Mitteltemperatur im hydrologischen Jahr (November – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum 1971 – 2000. Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Das Bild für das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) sieht dem des Gesamtjahres sehr ähnlich. Die Bandbreite der Lufttemperaturentwicklung ist mit 2,8 bis 4,8 °C im Vergleich zu 1971–2000 (Abbildung 4) etwas größer, aber in einem ähnlichen Bereich wie für die Jahrestemperatur. Der obere Rand liegt 0,5 °C höher.

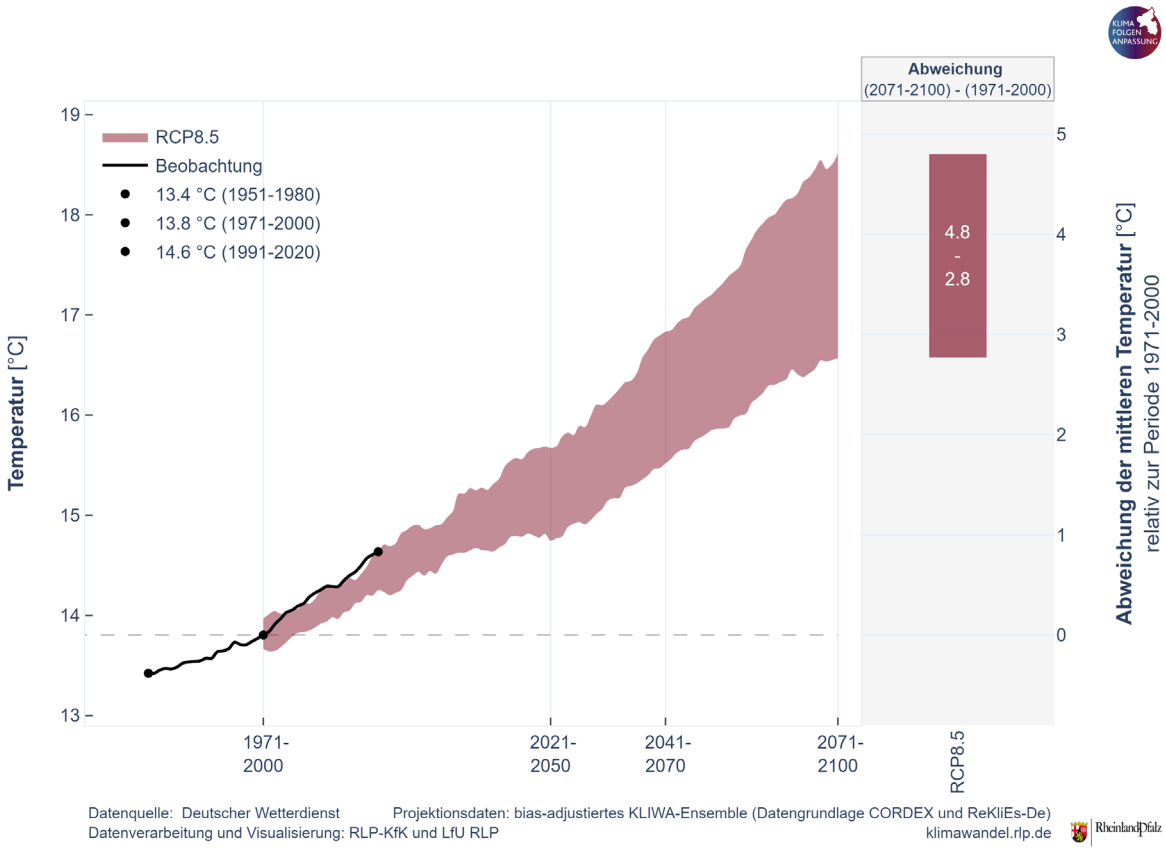


Abbildung 4: Entwicklung der mittleren Temperatur im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) im KLIWA-Gebiet. Dargestellt sind die gemessene Temperatur (schwarze Linie) sowie die projizierte Entwicklung auf Basis des KLIWA-Ensembles (roter Balken, dargestellt ist die Bandbreite zwischen Ensembleminimum und Ensemblemaximum), jeweils als 30-jährige gleitende Mittel.

Die räumlichen Unterschiede sind für den hydrologischen Sommer ebenfalls gering. Den geringsten Anstieg mit etwas weniger als 3 °C weist das KLIWA-Ensemble im Norden des KLIWA-Gebiets (Region Eder-Diemel) auf (Abbildung 5).

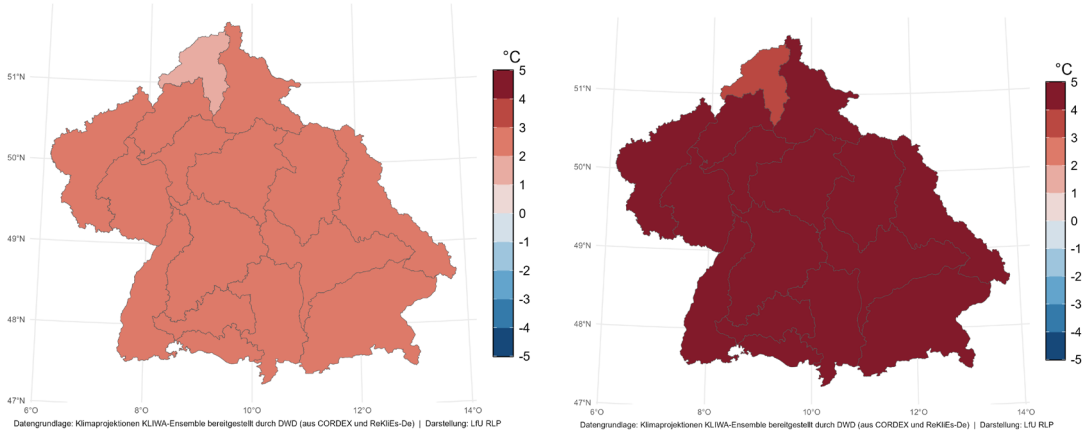


Abbildung 5: Änderung der Mitteltemperatur im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Im hydrologischen Winterhalbjahr (November – April) ist zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einem Anstieg der mittleren Lufttemperatur von 3,1 bis 4,2 °C gegenüber 1971 – 2000 zu rechnen (Abbildung 6). Damit ist der zu erwartende Anstieg der Lufttemperatur im Gesamtjahr und Winterhalbjahr nahezu identisch. Die räumlichen Unterschiede sind gering. Den größten Anstieg mit etwas mehr als 4 °C weist das KLIWA-Ensemble im Südosten des KLIWA-Gebiets (Region Isar-Inn) auf (Abbildung 7).

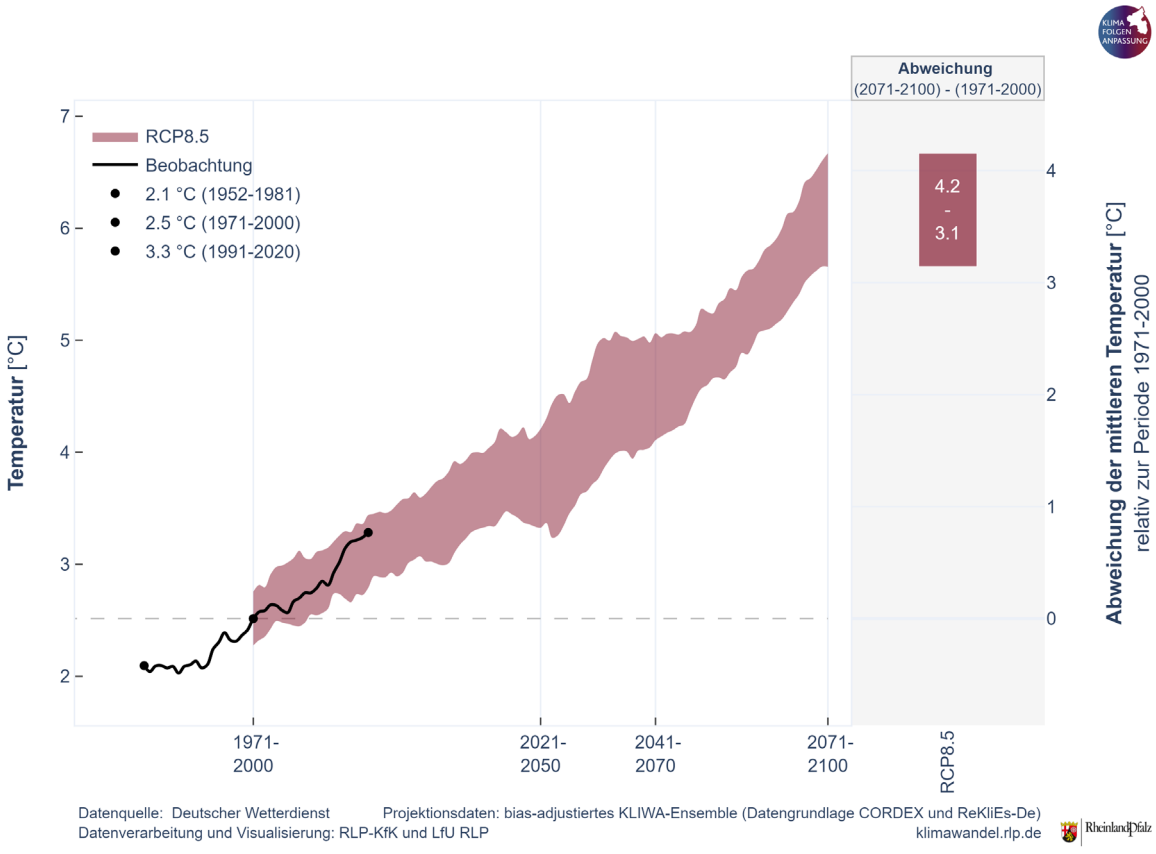


Abbildung 6: Entwicklung der mittleren Temperatur im hydrologischen Winterhalbjahr (November – April) im KLIWA-Gebiet. Dargestellt sind die gemessene Temperatur (schwarze Linie) sowie die projizierte Entwicklung auf Basis des KLIWA-Ensembles (roter Balken, dargestellt ist die Bandbreite zwischen Ensembleminimum und Ensemblemaximum), jeweils als 30-jährige gleitende Mittel.

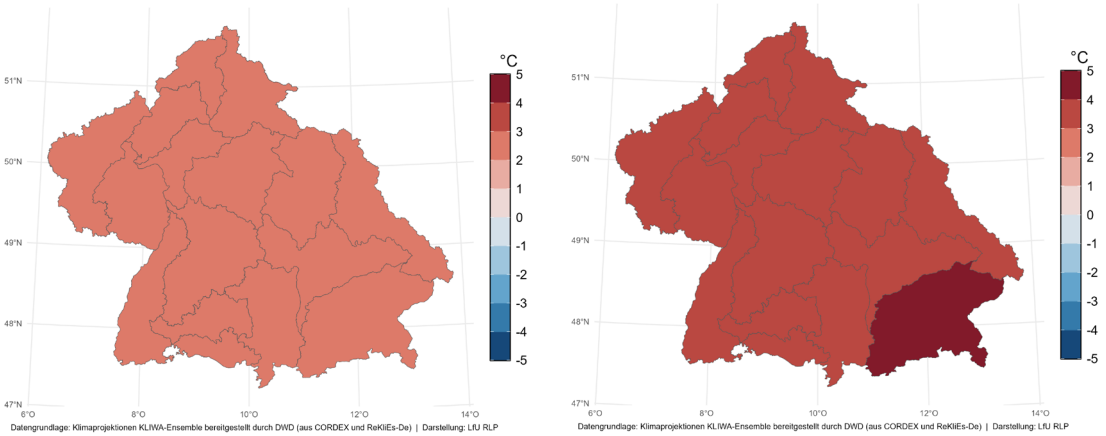


Abbildung 7: Änderung der Mitteltemperatur im hydrologischen Winterhalbjahr (November – April) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Die jahreszeitliche Entwicklung der Lufttemperatur ist grundsätzlich mit der Entwicklung in den hydrologischen Halbjahren vergleichbar. Die regionalen Unterschiede beim Temperaturanstieg in den einzelnen Jahreszeiten sind wie im Fall des hydrologischen Jahres und der Halbjahre gering. Daher erfolgt die Darstellung als Tabelle (Tabelle 2) für das Mittel über das gesamte KLIWA-Gebiet. Der Anstieg der Lufttemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist im meteorologischen Sommer mit 2,9 – 4,0 °C am stärksten. Knapp gefolgt vom Herbst mit 2,5 – 3,9 °C. Im Frühjahr ist der zu erwartende Anstieg mit 1,9 – 3,1 °C am geringsten. Für den Winter ist von einem Anstieg um ca. 3,1 – 3,4 °C auszugehen.

Tabelle 2: Gebietsmittel der Lufttemperatur für die vier meteorologischen Jahreszeiten. Als Absolutwerte für den Bezugszeitraum (1971 – 2000) und als Abweichung davon für die drei Zukunftszeiträume.

Saison	Gebietsmittel		Abweichung		Abweichung		Abweichung	
	Bezugszeitraum		Nahe Zukunft		Mittlere Zukunft		Ferne Zukunft	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Frühjahr	7,8 °C	8,0 °C	0,7 °C	1,3 °C	1,3 °C	2,4 °C	1,9 °C	3,1 °C
Sommer	16,3 °C	16,6 °C	1,1 °C	1,9 °C	1,9 °C	3,0 °C	2,9 °C	4,0 °C
Herbst	8,1 °C	8,7 °C	1,2 °C	1,8 °C	1,9 °C	2,7 °C	2,5 °C	3,9 °C
Winter	-0,3 °C	0,4 °C	1,2 °C	2,0 °C	2,0 °C	2,4 °C	3,1 °C	3,4 °C

4.1.2 Länge der thermischen Vegetationsperiode

Sowohl die Grundwasserneubildung als auch der Abfluss der Fließgewässer hängen neben weiteren Faktoren auch von der Vegetationszeit ab. Das ist die Zeit, in der die Pflanzen Wasser zum Wachstum benötigen und daher dieses eingeschränkt für die Grundwasserneubildung oder andere hydrologische Prozesse zur Verfügung stehen kann. Dies gilt insbesondere für den Beginn der Vegetationszeit. Als ein einfaches Maß zur Beschreibung der Wachstumszeit wird die Länge der thermischen Vegetationsperiode (Frich et al. 2002) verwendet. Die thermische Vegetationsperiode ist als Anzahl der Tage definiert, die zwischen den beiden folgenden Ereignissen liegen:

- Vegetationsbeginn: Erstes Aufkommen von mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Durchschnittstemperatur über 5 °C.
- Vegetationsende: Erstes Aufkommen von mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Durchschnittstemperatur unter 5 °C.

Die Entwicklung der Dauer der thermischen Vegetationsperiode im Klimaszenario RCP8.5 zeigt einen deutlichen Anstieg, weshalb am Ende des 21. Jahrhunderts mit einem Anstieg von 61 bis 76 Tagen zu rechnen ist (Abbildung 8). Demnach verlängert sich die Dauer der thermischen Vegetationsperiode für den Zeitraum 2071–2100 gegenüber 1971–2000 im Mittel um mehr als 2 Monate.

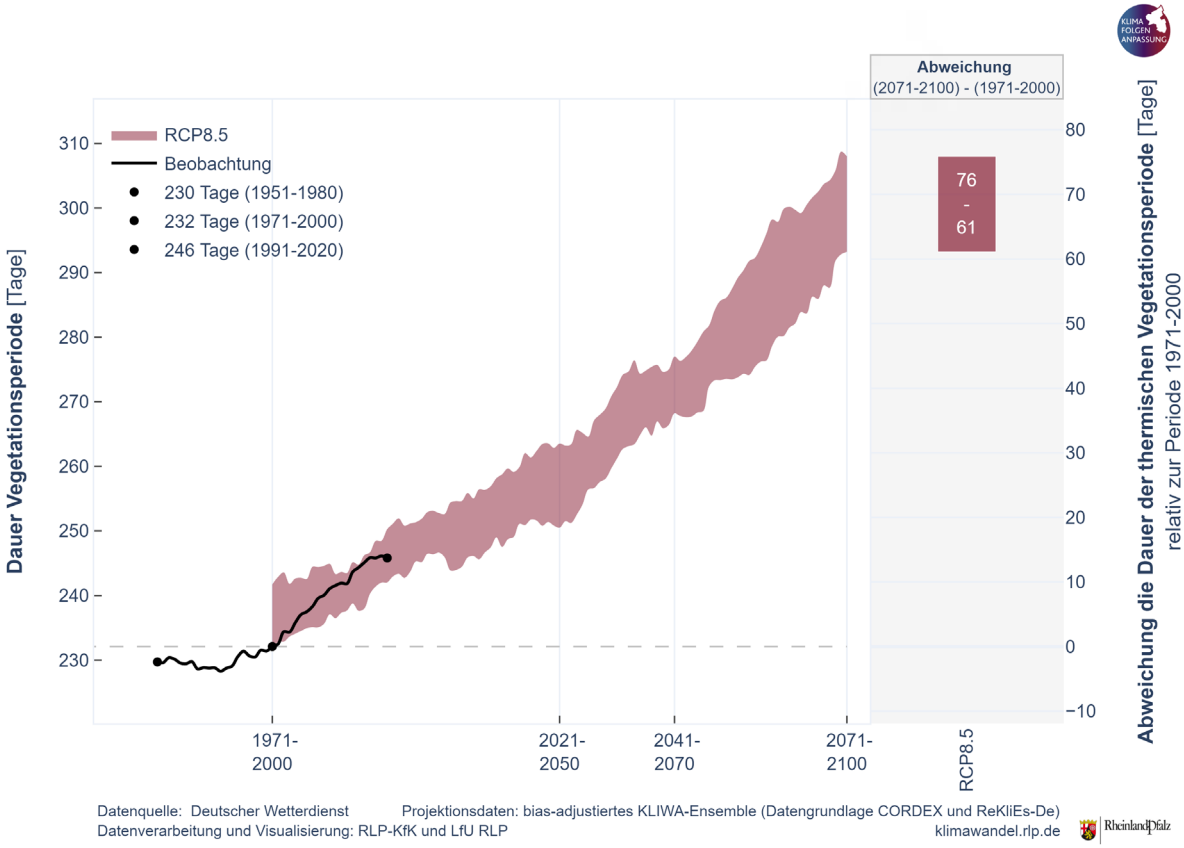


Abbildung 8: Entwicklung der Dauer der thermischen Vegetationsperiode im KLIWA-Gebiet. Dargestellt sind die gemessene Dauer (schwarze Linie) sowie die projizierte Entwicklung auf Basis des KLIWA-Ensembles (roter Balken, dargestellt ist die Bandbreite zwischen Ensembleminimum und Ensemblemaximum), jeweils als 30-jährige gleitende Mittel.

Die Länge der thermischen Vegetationsperiode ist direkt mit der Höhe über dem Meeresspiegel verknüpft und unterscheidet sich daher räumlich stark. Im Bereich des Oberrheintals ist die Vegetationsperiode am längsten (ca. 260 Tage). Dagegen ist sie auf der Schwäbischen Alb sowie im Bayerischen Wald mit ca. 215 Tagen am kürzesten. Der absolute Anstieg der Länge der thermischen Vegetationstage zum Ende 21. Jahrhunderts weist hingegen geringe bzw. sehr geringe räumlichen Unterschiede auf.

4.2 Gebietsniederschlag

Der Klimawandel beeinflusst den Niederschlag und damit auch den Wasserhaushalt erheblich. Die projizierten Veränderungen des Gebietsniederschlags sind weniger eindeutig, als die projizierten Veränderungen der Lufttemperatur. Unter Annahme des KLIWA-Ensembles sollte jedoch davon ausgegangen werden, dass zukünftig im KLIWA-Gebiet insgesamt etwas mehr Niederschlag (ca. 10 %) fallen wird, mit einem deutlichen Anstieg im Winterhalbjahr (ca. 20 %) und einer im Verlauf des 21. Jahrhunderts in einigen Regionen abnehmenden Tendenz im Sommerhalbjahr. Somit ist eine Verschiebung des Niederschlags in das hydrologische Winterhalbjahr zu erwarten. Der Niederschlag wird allerdings – besonders im Sommerhalbjahr – an weniger Tagen auftreten. Daher wird der Niederschlag vor allem im Sommer insgesamt seltener, wenn er aber auftritt sind die Ereignisse intensiver.

4.2.1 Mittlere Niederschlagssumme

Im hydrologischen Jahr (November–Oktober) zeigt die Änderung der mittleren Niederschlagsumme in den KLIWA-Regionen ein gemischtes Bild. In der nahen Zukunft liegen die Änderungen meist im Bereich von ±10 %. Im Vergleich der drei Zukunftszeiträume werden die Rückgänge im Ensembleminimum immer geringer und der Anstieg im Ensemblemaximum immer stärker – es ist demnach eine Tendenz hin zu mehr Niederschlag feststellbar (Abbildung 9).

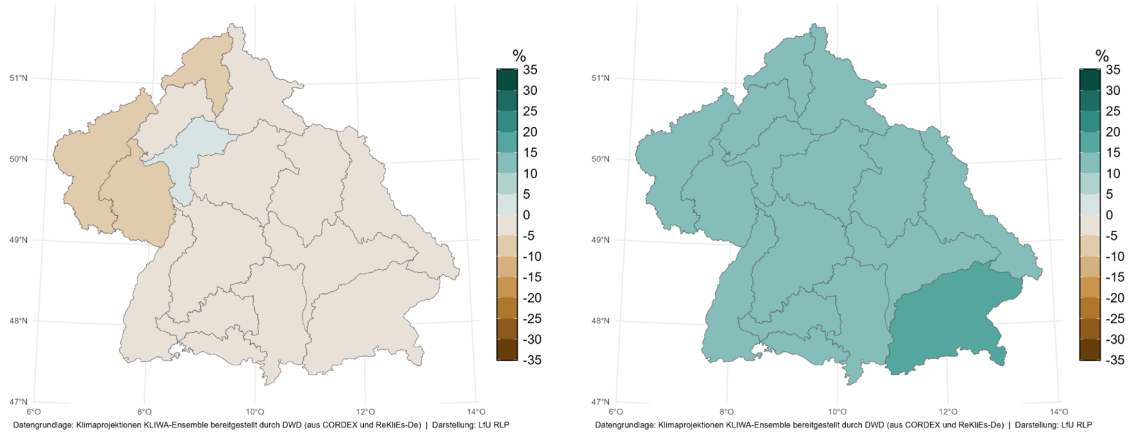


Abbildung 9: Änderung der Niederschlagssumme im hydrologischen Jahr (November–Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071–2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971–2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Wird die Änderung der mittleren Niederschlagssummen getrennt nach den hydrologischen Halbjahren betrachtet, ergibt sich ein eindeutigeres Bild.

Im hydrologischen Winterhalbjahr (November–April) sind Zunahmen feststellbar, die deutlicher ausfallen, je weiter das 21. Jahrhundert fortschreitet. Zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigen alle Projektionen in allen Regionen außer in der Region Eder-Diemel einen Anstieg der Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr. Der Anstieg kann je nach Region mehr als 25 % betragen (Abbildung 10).

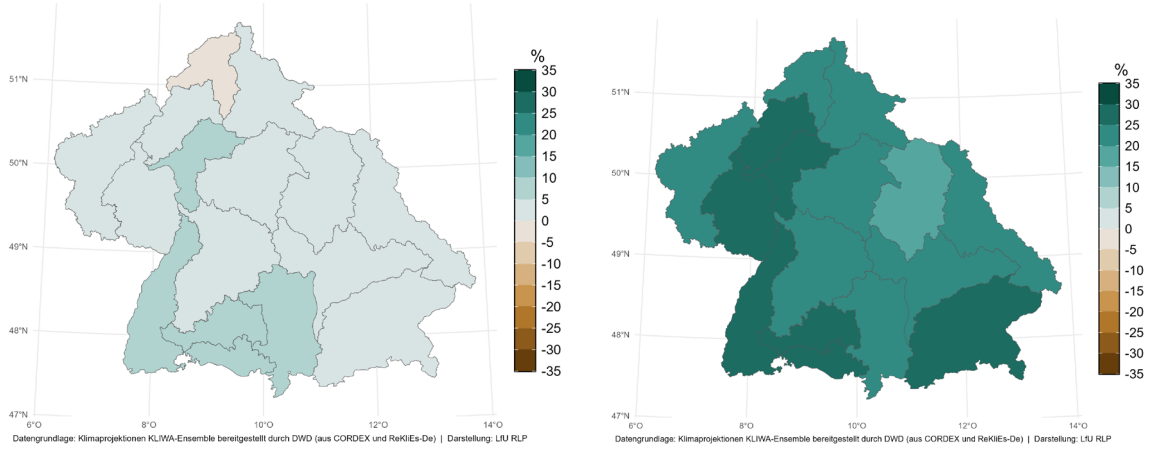


Abbildung 10: Änderung der Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr (November – April) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Mit dem Fortschreiten des 21. Jahrhunderts werden die negativen Tendenzen etwas deutlicher. In der fernen Zukunft zeigen die westlichsten und östlichsten KLIWA-Regionen im Ensembleminimum Abnahmen zwischen 10 und 15 %. Im Saarland und dem westlichen Rheinland-Pfalz (KLIWA-Region Mosel-Sieg) betragen die Abnahmen mehr als -20 % (Abbildung 11, links). Diese Region zeigt auch im Ensemblemaximum die geringsten Zunahmen (0 – 5 %). In den übrigen Regionen ist das Bild weiter nicht eindeutig (Abbildung 11, rechts).

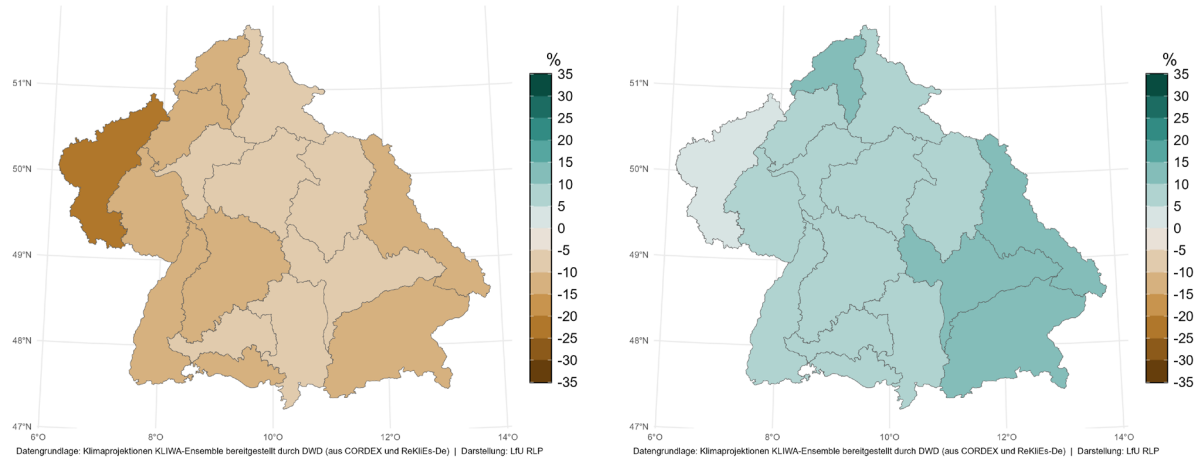


Abbildung 11: Änderung der Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Mit der Betrachtung der jahreszeitlichen Veränderungen kristallisieren sich noch deutlicher Unterschiede im Vergleich zu den halbjährlichen Entwicklungen heraus.

Im Winter (Dezember – Februar) lässt sich ein noch stärker ansteigendes Signal bis zum Ende des Jahrhunderts feststellen. Das Ensembleminimum zeigt in allen KLIWA-Regionen und Zukunftszeiträumen kaum Veränderungen jenseits von ±10 %. Im Ensemblemaximum betragen die Zunahmen in allen drei

Zukunftszeiträumen verbreitet zwischen 20–30 %. Im Donau- und Neckareinzugsgebiet sind Anstiege zwischen 30–40 % zu verzeichnen. Die projizierte Entwicklung im Frühling (März–Mai) entspricht weitestgehend der im Winter.

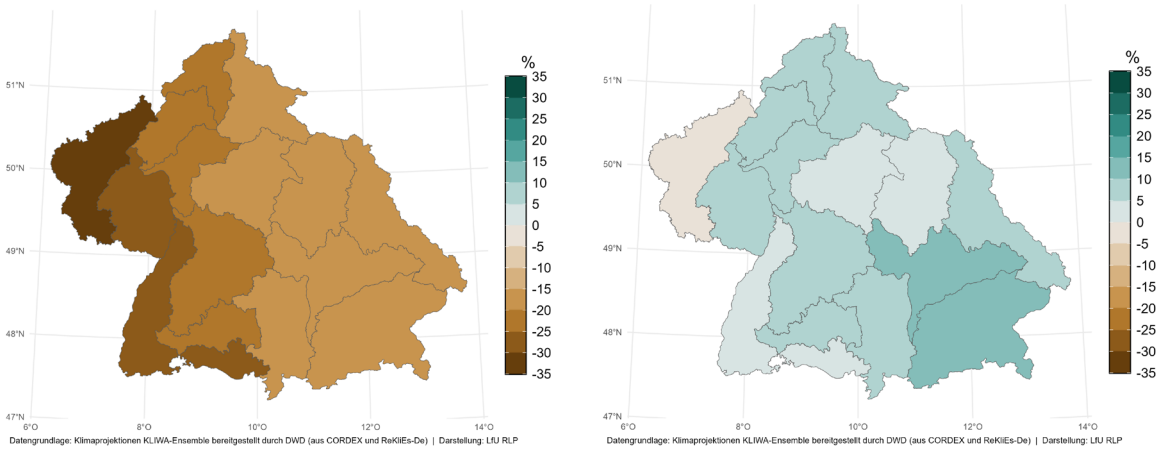


Abbildung 12: Änderung der Niederschlagssumme im Sommer (Juni–August) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071–2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971–2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Die Sommermonate (Juni–August) zeigen im Verlauf des 21. Jahrhunderts eine abnehmende Tendenz der mittleren Niederschlagssumme. Während das Ensemblemaximum in den drei Zukunftszeiträumen überwiegend im Bereich von ± 10 % liegt, lässt das Ensembleminimum über die drei Zukunftszeiträume eine stetige Abnahme erkennen. In der mittleren Zukunft sind verbreitet Abnahmen von bis zu -10 %, im Nordwesten auch -15 % zu verzeichnen. In der fernen Zukunft ist der Rückgang am stärksten ausgeprägt und es zeigt sich in diesem Zeitraum ein West-Ost-Gradient. Im Westen betragen die Abnahmen im Ensembleminimum mehr als -30 %, in der Osthälfte des KLIWA-Gebiets -15 bis -20 %.

Die Entwicklung der mittleren Niederschlagssumme im Herbst (September–November) ist nicht eindeutig. In der nahen Zukunft liegt die Bandbreite zwischen -10 und +20 %, in der mittleren Zukunft zwischen -20 und +20 %.

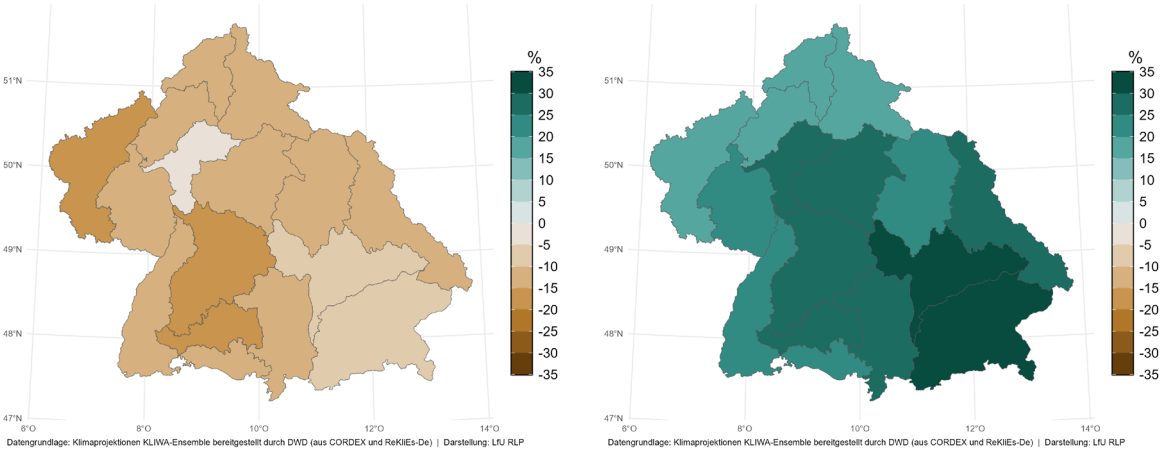


Abbildung 13: Änderung der Niederschlagssumme im Herbst (September–November) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071–2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971–2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

In der fernen Zukunft nimmt die Bandbreite an beiden Rändern deutlich zu. Die deutlichsten Tendenzen hin zu Zunahmen zeigen die KLIWA-Regionen Isar-Inn und mittlere Donau. Hier liegen die projizierten Werte zwischen -10 bis +35 %. Auch in den meisten anderen Regionen überwiegen die zunehmenden Tendenzen. Lediglich in der Region Mosel-Sieg zeigt sich mit einer Bandbreite von -20 bis +20 % kein eindeutiges Änderungssignal (Abbildung 13).

4.2.2 Tage mit Niederschlag (≥ 1 mm)

Der Klimawandel beeinflusst nicht nur die Niederschlagssummen, sondern auch die Anzahl der Tage, an denen Niederschlag fällt. Im Gesamtjahr ist in Süddeutschland künftig mit weniger Niederschlagstagen zu rechnen.

In der nahen Zukunft zeigt der obere Rand der Bandbreite Zunahmen von bis zu 5 Tagen, vereinzelt auch von bis zu 10 Tagen (Basis im Bezugszeitraum je nach Region bis zu 150 Tage). Das Ensembleminimum zeigt einen deutlichen West-Ost-Gradienten. Die westlichsten Regionen (Mosel-Sieg und Eder-Diemel) zeigen hier bereits Abnahmen zwischen -20 und -25 Tagen. Der Bereich vom östlichen Rheinland-Pfalz bis zum Oberen Main und dem Neckar zeigt Abnahmen zwischen -15 und -20 Tagen und in den übrigen Regionen sind Abnahmen zwischen -10 und -15 Tagen zu erwarten.

In der mittleren Zukunft ist die abnehmende Tendenz noch deutlicher ausgeprägt. Das Maximum liegt in allen Regionen bei einer Zunahme von höchstens 5 Tagen. Das Ensembleminimum zeigt deutlichere Abnahmen als in der nahen Zukunft. In den meisten KLIWA-Regionen liegt die Abnahme der Niederschlagstage zwischen -15 und -20 Tagen. In den nördlichen, östlichen und westlichen Randregionen beträgt sie -20 bis -25 Tage.

Die Abnahme der Niederschlagstage ist auch in der fernen Zukunft zu erwarten. Der obere Rand der Bandbreite liegt dann weiterhin im Bereich von ±5 Tagen, im Südwesten weisen einige Regionen ein negatives Änderungssignal auf (Abbildung 14, rechts). Das Ensembleminimum weist in der fernen Zukunft nur in wenigen Regionen Abnahmen von weniger als -20 Tagen auf (Abbildung 14, links).

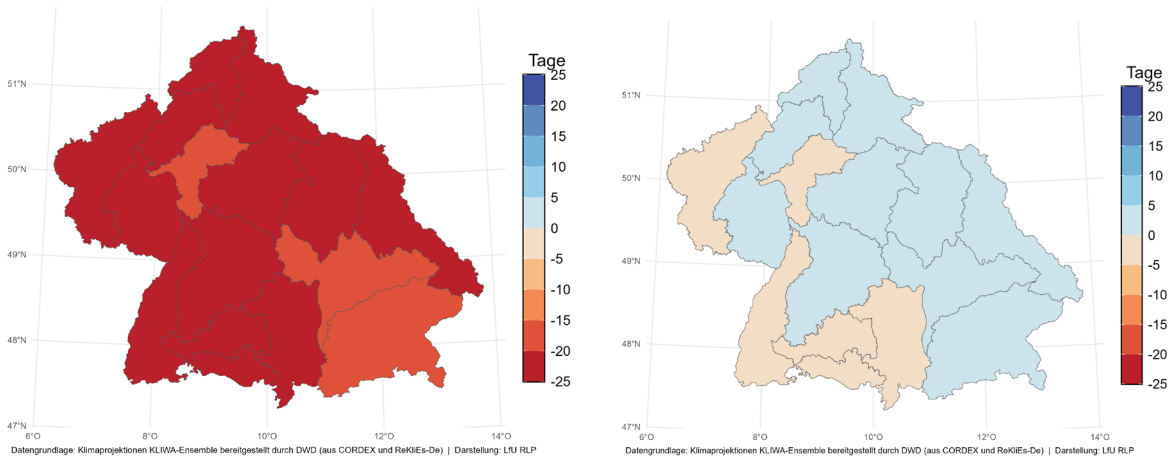


Abbildung 14: Änderung der Anzahl der Niederschlagstage im hydrologischen Jahr (November – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Ein Blick auf die hydrologischen Halbjahre zeigt im Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) eine klare Abnahme der Niederschlagstage für die Zukunft. Bereits in der nahen Zukunft liegt die Bandbreite überwiegend im negativen Änderungsbereich. In der mittleren Zukunft zeigen alle Regionen im Ensemblemaximum Änderungen von ±5 Tagen, wobei die meisten Regionen bereits negative Änderungssignale zeigen. Das Ensembleminimum zeigt dagegen in allen Regionen Abnahmen von mindestens -10 Tagen, im Nordwesten und der Region Bayerische Mittelgebirge sind auch Abnahmen von mehr als -15 Tagen möglich. Die Tendenz hin zu weniger sommerlichen Niederschlagstagen verstärkt sich in der fernen Zukunft weiter. Die gesamte Bandbreite liegt nun im gesamten KLIWA-Gebiet im negativen Änderungsbereich (Abbildung 15, rechts). Das Ensembleminimum zeigt in allen Regionen Abnahmen von mehr als -15 Tagen (Abbildung 15, links).

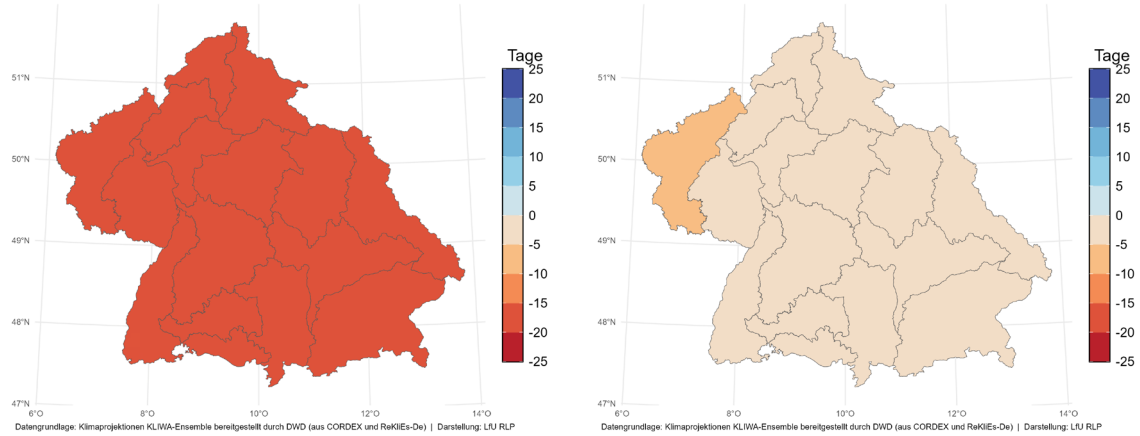


Abbildung 15: Änderung der Anzahl der Niederschlagstage im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die mittlere Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Im hydrologischen Winterhalbjahr ist die Entwicklung weniger eindeutig. Besonders in der nahen Zukunft zeigt die Bandbreite Zu- und Abnahmen der gleichen Größenordnung (±5 Tage). Im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts verschiebt sich die Bandbreite etwas weiter in Richtung der Abnahmen. Insgesamt bleibt das Änderungssignal mit etwa -10 bis +5 Tage ohne Richtungssicherheit.

In den Wintermonaten (Dezember – Februar) bewegen sich die Änderungen verbreitet zwischen -10 und +5 Tagen. Klare Tendenzen sind in keiner Region zu erkennen.

Der Frühling (März – Mai) zeigt mit ±5 Tagen bis zur mittleren Zukunft kaum Veränderungen. In der fernen Zukunft zeigen sich im Ensembleminimum auch größere Abnahmen.

Der Sommer (Juni – August) zeigt wie das gesamte Sommerhalbjahr starke Abnahmen der Niederschlagstage, die sich im Laufe des 21. Jahrhunderts immer mehr manifestieren. Das Maximum liegt ab der mittleren Zukunft im negativen Änderungsbereich (Ausnahme: Region Isar-Inn). Das Minimum zeigt keine klaren räumlichen Muster. In der nahen Zukunft liegen die Abnahmen bei bis zu -10 Tagen und in der fernen Zukunft verbreitet bei bis zu -15 Tagen.

Im Herbst (September – November) zeigt das Ensemble abnehmende Tendenzen. Das Ensemblemaximum liegt in allen Zeiträumen im Bereich von ±5 Tagen, das Ensembleminimum zeigt dagegen immer größere Abnahmen, die gegen Ende des Jahrhunderts im Bereich von bis zu -10 Tagen liegen, im Westen zwischen -10 und -15 Tagen.

4.2.3 Maximaler Tagesniederschlag

Die maximalen Tagesniederschläge werden in Zukunft höher ausfallen. In allen Zeiträumen und Jahreszeiten zeigt das Ensembleminimum nur geringe jedoch verbreitetet positive Änderungen (Abbildung 16, links), weshalb im Folgenden auf die Änderungen des Ensemblemaximums eingegangen wird.

Im hydrologischen Jahr und dem Sommerhalbjahr muss bis zur mittleren Zukunft mit Zunahmen von bis zu 15 mm gerechnet werden. In der fernen Zukunft sind verbreitet Zunahmen von bis zu 20 mm zu erwarten (Abbildung 16, rechts). Im hydrologischen Winterhalbjahr (nicht dargestellt) fallen die Zunahmen mit bis zu 10 mm bis zur mittleren Zukunft und bis zu 15 mm in der fernen Zukunft etwas geringer aus als im hydrologischen Jahr bzw. hydrologischen Sommerhalbjahr.

Die Veränderungen im Winter (Dezember – Februar), Frühling (März – Mai) und Herbst (September – November) entsprechen den Änderungen im Winterhalbjahr. Die Veränderungen im Sommer (Juni – August) denen im hydrologischen Sommerhalbjahr.

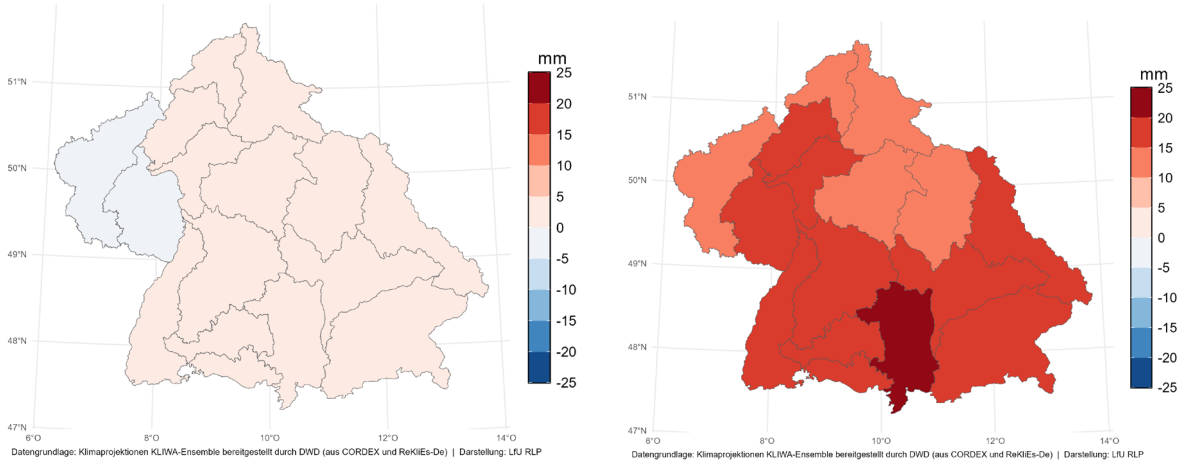


Abbildung 16: Änderung der mittleren maximalen Tagesniederschlagssumme im hydrologischen Jahr (November – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

4.2.4 99. Perzentil des täglichen Niederschlags

Das 99. Perzentil des täglichen Niederschlags[6] (P99) beschreibt einen Niederschlagswert mit der Einheit mm/Tag. Dieser Schwellwert teilt eine Niederschlagsreihe in zwei ungleich große Teile – 99 Prozent der Niederschlagswerte dieser Reihe sind kleiner als der Schwellwert, ein Prozent ist größer, d.h., es werden die intensivsten Ereignisse betrachtet. Durch die Veränderung des Schwellwerts lässt sich bestimmen ob extreme Niederschlagsereignisse in ihrer Intensität zu- oder abnehmen.

Im Gesamtjahr zeigt das 99. Perzentil des Tagesniederschlags eine ansteigende Tendenz. Das Ensembleminimum zeigt sehr konstant nur sehr geringe bis keine Änderungen. Im Ensemblemaximum werden die projizierten Zunahmen dagegen im Verlauf des 21. Jahrhunderts immer größer und betragen in der fernen Zukunft bis zu 10 mm/Tag. Am stärksten sind die Zunahmen in den südlichen KLIWA-Regionen sowie in den Regionen Bayerische Mittelgebirge und Rhein-Main-Gebiet (Abbildung 17, rechts).

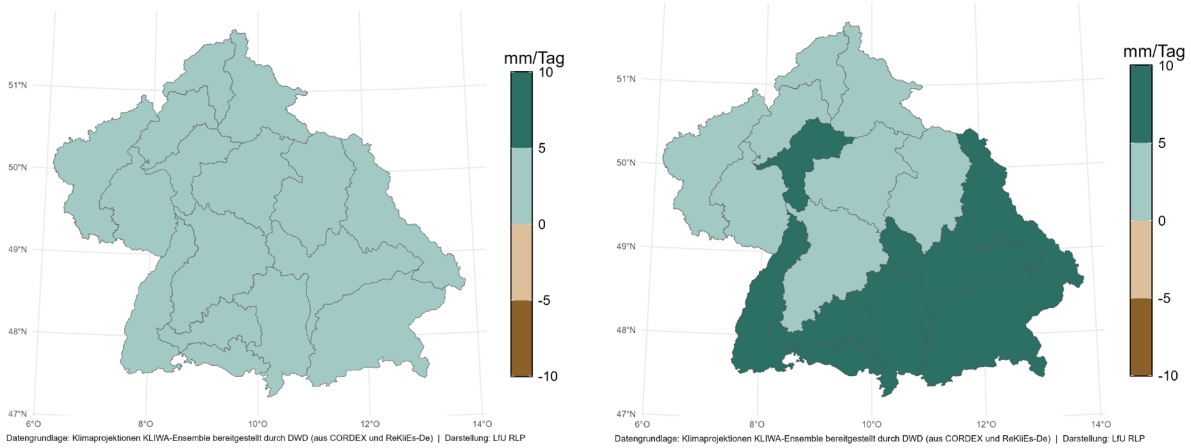


Abbildung 17: Änderung des 99. Perzentils des Tagesniederschlags im hydrologischen Jahr (November – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Die Entwicklungen im Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) und Winterhalbjahr (November – April) ähneln denen im Gesamtjahr jeweils weitestgehend.

4.2.5 Anteil der Niederschlagssumme von Tagen mit ≥ P99

Der Anteil der Niederschlagssumme oberhalb des 99. Perzentils am Gesamtniederschlag bzw. dessen Veränderung ist ein weiterer Indikator für extreme Niederschlagsereignisse. In Einklang zu den Ergebnissen aus Kapitel 4.2.4 steigt dieser Anteil zukünftig an.

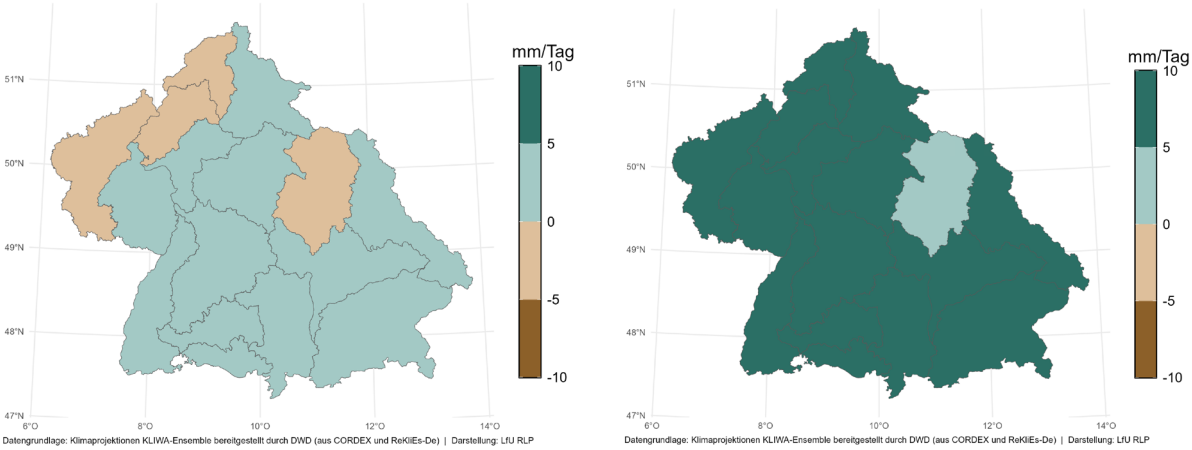


Abbildung 18: Änderung des Anteils der Niederschlagssumme oberhalb des 99. Perzentils an der Gesamtniederschlagssumme im hydrologischen Sommer (Mai – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Im Gesamtjahr zeigt das Ensembleminimum weitestgehend keine Änderungen. Das Ensemblemaximum zeigt über den Verlauf des 21. Jahrhunderts Zunahmen. In der fernen Zukunft liegt die Zunahme verbreitet zwischen null und fünf Prozent.

Im hydrologischen Sommerhalbjahr zeigt das Ensembleminimum keine eindeutigen Änderungen. Das Ensemblemaximum zeigt wiederum eine ansteigende Tendenz im Verlauf des 21. Jahrhunderts. In der fernen Zukunft beträgt die Zunahme verbreitet bis zu fünf Prozent, vereinzelt auch mehr (Abbildung 18). Für das hydrologische Winterhalbjahr zeigt die Bandbreite über alle Zeiträume und Regionen keine Veränderungen.

4.3 Meteorologisch berechenbare Indizes der Wasserbilanz

Die Berechnung der potenziellen Verdunstung und die daraus abgeleitete klimatische Wasserbilanz sowie der Standardisierte Niederschlagsverdunstungsindex (SPEI) werden aus den Variablen der Klimamodellsimulationen auf Tageswertbasis ausgeführt.

4.3.1 Potenzielle Verdunstung (Grasreferenzverdunstung)

Die potenzielle Verdunstung[7] zeigt eine zunehmende Tendenz, die sich im Laufe des 21. Jahrhunderts verstärkt. Der Anstieg ist im hydrologischen Sommerhalbjahr besonders deutlich.

Im Gesamtjahr zeigt das gesamte Ensemble in der nahen Zukunft weitestgehend keine Veränderung. Ab der mittleren Zukunft ist eine zunehmende Tendenz deutlich zu erkennen. Das Ensembleminimum zeigt keine Veränderung, liegt aber bereits leicht im positiven Änderungsbereich. Das Ensemblemaximum zeigt dagegen Zunahmen zwischen fünf und zehn Prozent. In der fernen Zukunft setzt sich die zunehmende Tendenz weiter fort.

In der fernen Zukunft zeigen alle Regionen und Projektionen im Sommerhalbjahr ausschließlich Zunahmen (Abbildung 19). Das Ensembleminimum zeigt Zunahmen zwischen null und fünf Prozent, im Südwesten des KLIWA-Gebiets sind in einigen Regionen auch Zunahmen zwischen 5 und 10 Prozent zu verzeichnen (Abbildung 19, links). Das Ensemblemaximum liegt zwischen zehn und 15 Prozent, im Südwesten des KLIWA-Gebiets können die Zunahmen auch größer als 15 Prozent ausfallen (Abbildung 19, rechts).

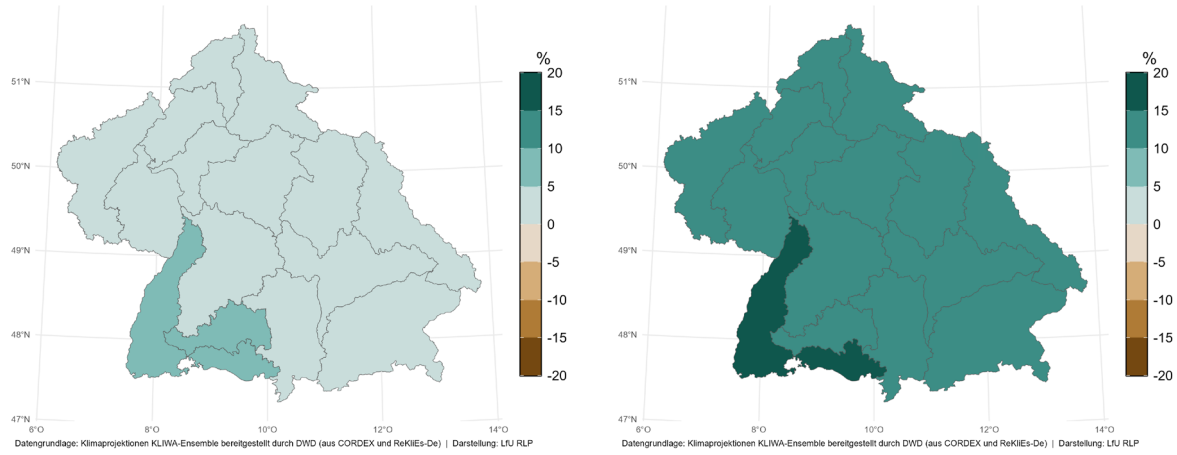


Abbildung 19: Änderung der potenziellen Verdunstung im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Im Winterhalbjahr zeigt sich ebenfalls eine zunehmende Tendenz, diese ist allerdings deutlich schwächer ausgeprägt als im Sommerhalbjahr.

4.3.2 Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz (KWB) bezeichnet die Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung. Sie zeigt im hydrologischen Jahr in weiten Teilen des KLIWA-Gebiets keinen Trend da gleich große Zu- und Abnahmen projiziert werden. Im Sommerhalbjahr muss zukünftig mit Abnahmen gerechnet werden. Eine abnehmende Wasserbilanz bedeutet, dass dem Wasserhaushalt weniger Wasser zur Verfügung steht.

Die projizierte Entwicklung im hydrologischen Jahr ist für alle drei Zeitscheiben recht ähnlich. Exemplarisch zeigt Abbildung 20 die Veränderungen der fernen Zukunft. Das Ensembleminimum der Änderungen liegt in diesem Zeitraum verbreitet im Bereich zwischen -100 und -50 mm, einzig in den Regionen Oberer Main und Rhein-Main fallen die Änderungen geringer aus. In den westlichen Randregionen fallen die Abnahmen dagegen auch größer aus (Abbildung 20, links). Das Ensemblemaximum zeigt abgesehen von der Region Isar-Inn Zunahmen zwischen 50 und 100 mm – und damit häufig in der gleichen Größenordnung wie das Ensembleminimum. (Abbildung 20, rechts).

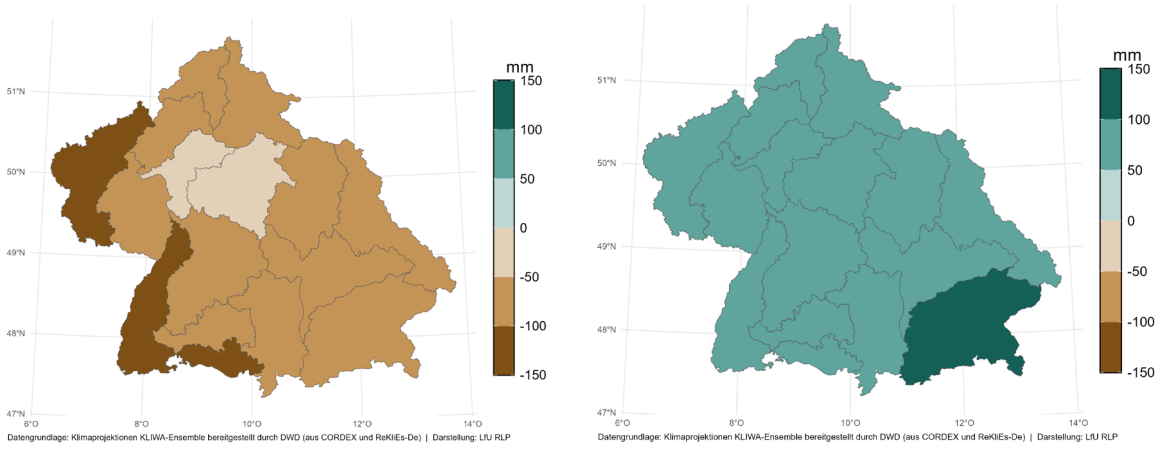


Abbildung 20: Änderung der Summe der klimatischen Wasserbilanz im hydrologischen Jahr (November – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Im hydrologischen Sommerhalbjahr wird die KWB zukünftig im Mittel immer geringere Werte aufweisen. In der nahen Zukunft liegt das Ensembleminimum verbreitet im Bereich von -50 mm. Einige Randregionen (Isar-Inn, Hoch und Oberrhein, Fulda-Werra und Mosel-Sieg) zeigen auch größere Abnahmen. Das Ensemblemaximum zeigt die deutlichsten Zunahmen (bis zu 100 mm) im Südosten des KLIWA-Gebiets. Im Nordwesten zeigen die Regionen nur sehr geringe oder keine Zunahmen.

Ab der mittleren Zukunft tritt die abnehmende Tendenz deutlicher hervor. Die Änderungen im Ensembleminimum liegen zwischen -100 und -50 mm, in der Region Mosel-Sieg sind die Abnahmen noch deutlicher. Das Ensemblemaximum zeigt im Nordwesten nur sehr geringe Veränderungen, die Region Mosel-Sieg zeigt leichte Abnahmen.

In der fernen Zukunft verschiebt sich die gesamte Bandbreite der KWB noch weiter in den negativen Änderungsbereich, so dass ein stärkerer Rückgang zu erwarten ist. Im Ensembleminimum zeigen nun neben der Region Mosel-Sieg auch die Regionen Hoch-/Oberrhein, Iller-Lech und Isar-Inn Abnahmen von mehr als -100 mm. Die übrigen Regionen weisen Abnahmen zwischen -100 und -50 mm auf (Abbildung 21, links). Das Ensemblemaximum zeigt in etwa in der Westhälfte des KLIWA-Gebiets Abnahmen von bis zu -50 mm, in der Osthälfte Zunahmen von bis zu 50 mm (Abbildung 21, rechts).

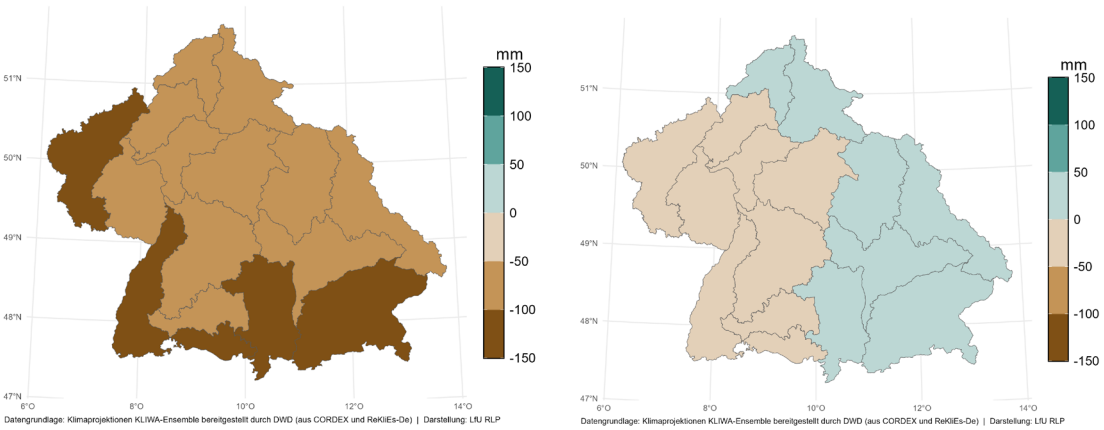


Abbildung 21: Änderung der Summe der klimatischen Wasserbilanz im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) in den KLIWA-Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

Die projizierte Veränderung der KWB im Winterhalbjahr zeigt einen deutlichen Anstieg, der sich im Verlauf weiter verstärkt. In der nahen Zukunft liegt das Ensembleminimum zwischen -50 und 0 mm. Das Ensemblemaximum zeigt weitestgehend Zunahmen zwischen 0 und 50 mm. In den südlichen Regionen Neckar, Obere Donau, Iller-Lech, Isar-Inn und Hoch- und Oberrhein liegen die Zunahmen zwischen 50 und 100 mm.

Das Ensembleminimum zeigt in der mittleren Zukunft Veränderungen zwischen -50 und 0 mm, Die Region Rhein-Main-Gebiet eine Zunahme zwischen 0 und 50 mm. Die Zunahmen im Ensemblemaximum liegen verbreitet zwischen 50 und 100 mm, Ausnahmen sind die Regionen Eder-Diemel, Fulda-Werra sowie Ober und Unterer Main mit Zunahmen zwischen 0 und 50 mm.

In der fernen Zukunft zeigen alle KLIWA-Regionen außer Eder-Diemel und Bayerische Mittelgebirge im Ensembleminimum Zunahmen zwischen 0 und 50 mm (Abbildung 22, links). Das Ensemblemaximum zeigt wie in der mittleren Zukunft überwiegend Zunahmen zwischen 50 und 100 mm. In den Regionen Mosel-Sieg, Isar-Inn und Hoch- und Oberrhein beträgt die Zunahme auch mehr als 100 mm (Abbildung 22, rechts).

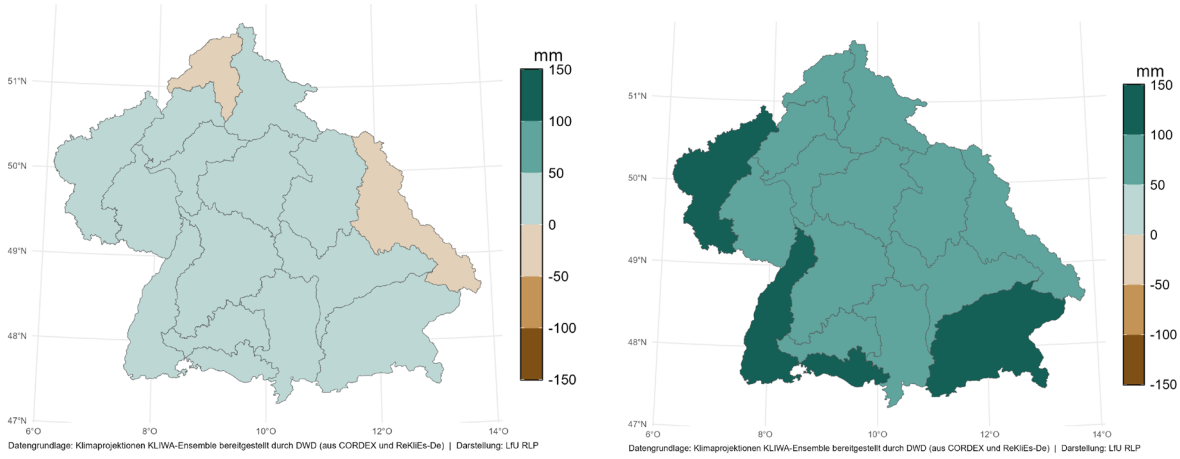


Abbildung 22: Änderung der Summe der klimatischen Wasserbilanz im hydrologischen Winterhalbjahr (November – April) in den KLIWA Regionen für die ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971 – 2000). Dargestellt ist das Ensembleminimum (links) und das Ensemblemaximum (rechts).

4.3.3 Standardisierter Niederschlags-Verdunstungs-Index

Der Standardisierte Niederschlags-Verdunstungs-Index (SPEI, Vicente-Serrano et al. 2010) ist ein klimatologischer Trockenheitsindex, der das Verhältnis zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung (Evapotranspiration) bewertet. Er zeigt, ob ein Gebiet unter trockeneren oder feuchteren Bedingungen als üblich steht, indem er Wasserdefizite oder -überschüsse standardisiert darstellt. Der SPEI berücksichtigt den Einfluss der Temperatur auf die potenzielle Verdunstung und ist daher besonders geeignet, um die Auswirkungen des Klimawandels auf Trockenheit zu beschreiben. Durch die Standardisierung ist es einfacher als bei der KWB verschiedene Regionen hinsichtlich ihrer Änderungscharakteristik zu vergleichen.

Die Entwicklung des SPEI im hydrologischen Gesamtjahr weist keine klare Richtung auf. Im Verlauf des 21. Jahrhunderts wird die Bandbreite immer größer und erreicht zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Bereich von -0,2 bis +0,4 (Abbildung 23).

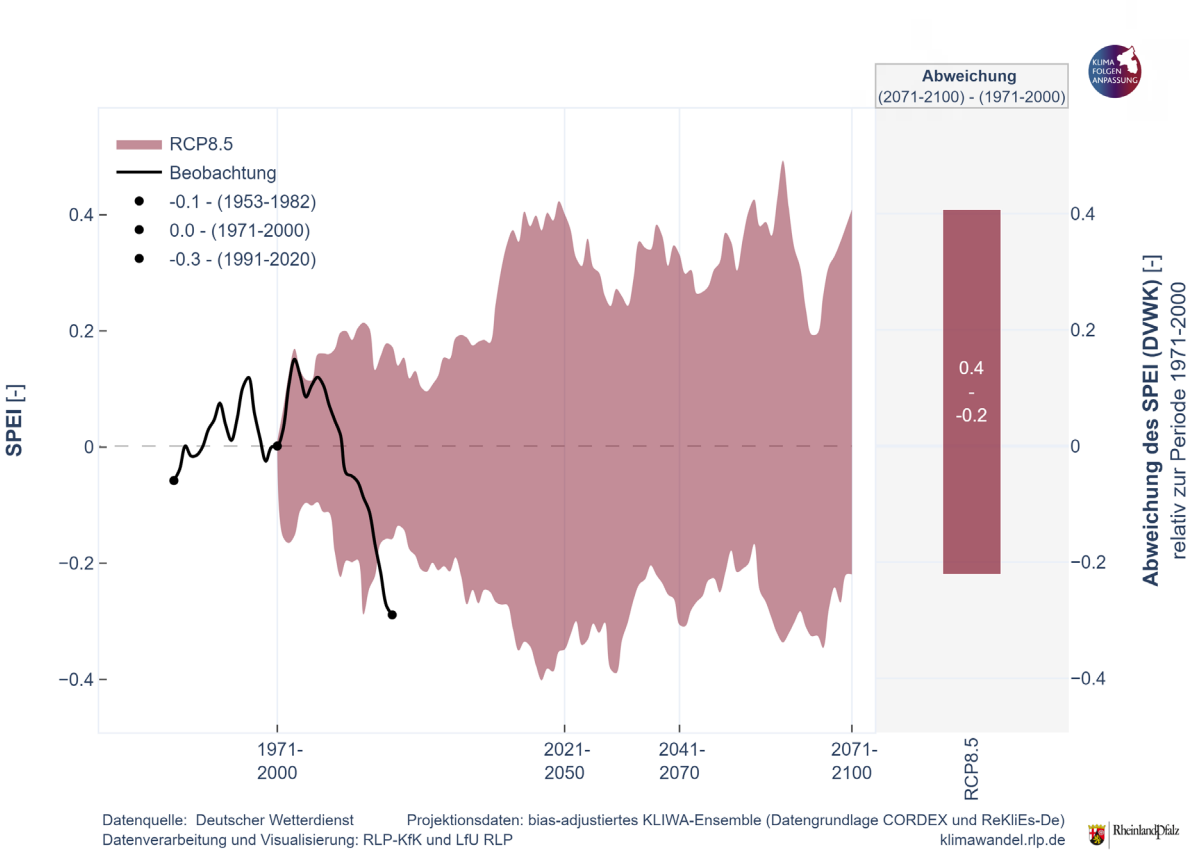


Abbildung 23: Änderung des SPEI während des 21. Jahrhunderts für das hydrologische Gesamtjahr im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000.

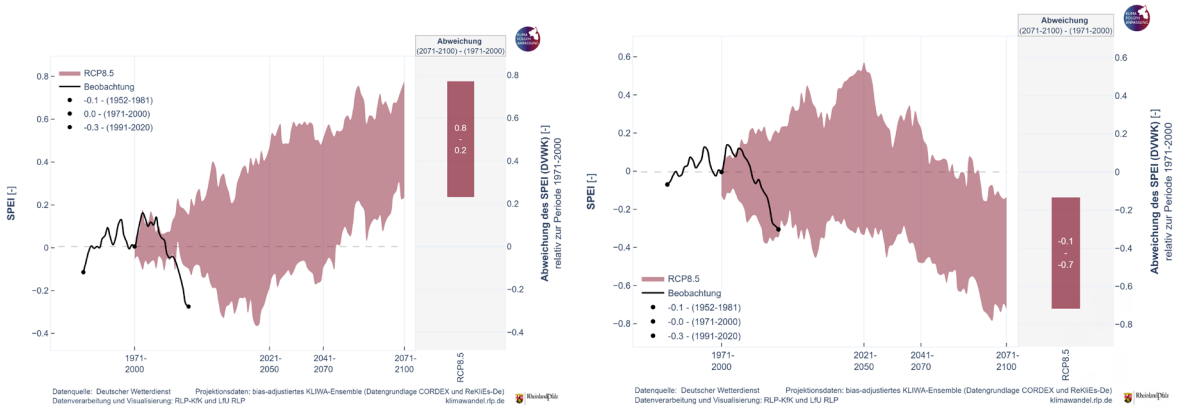


Abbildung 24: Änderung des SPEI während des 21. Jahrhunderts für das hydrologische Winterhalbjahr (links) und das hydrologische Sommerhalbjahr (rechts) im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000.

Die projizierte Entwicklung des SPEI ist für die beiden hydrologischen Halbjahre unterschiedlich. Während für das hydrologische Winterhalbjahr ein Anstieg beim SPEI zu erwarten ist, zeigen die Projektionen im hydrologischen Sommerhalbjahr insbesondere zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Rückgang (Abbildung 24).

Im Fall des hydrologischen Winterhalbjahrs liegen die aktuell beobachteten 30-Jahresmittel unterhalb der Spanne der Klimaprojektionen, allerdings nicht niedriger als im Laufe des Jahrhunderts gemäß der Spanne der Modellierungen zu erwarten ist. Eine mögliche Ursache könnte in der Herausforderung der Klimamodellierung liegen die dekadische Variabilität zeitlich korrekt abzubilden. Für das hydrologische Sommerhalbjahr liegen die aktuell beobachteten Werte an der Untergrenze der aktuellen Spanne der Modellierungen.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der KWB ergeben sich für den SPEI räumlich keine Unterschiede. Die Stärke der Änderungen kann mithilfe des SPEI besser eingeordnet werden.

4.4 Weitere Parameter

4.4.1 Luftfeuchte

Mit dem Ansteigen der Lufttemperatur kann die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen. Mit jedem Grad Celsius Temperaturanstieg steigt die Kapazität der Atmosphäre Wasserdampf aufzunehmen um ca. 7 % (IPCC 2021). Dieser Zusammenhang wird Clausius-Clapeyron-Beziehung genannt. In diesem Kapitel wird auf die projizierten Veränderungen der absoluten Feuchte eingegangen.

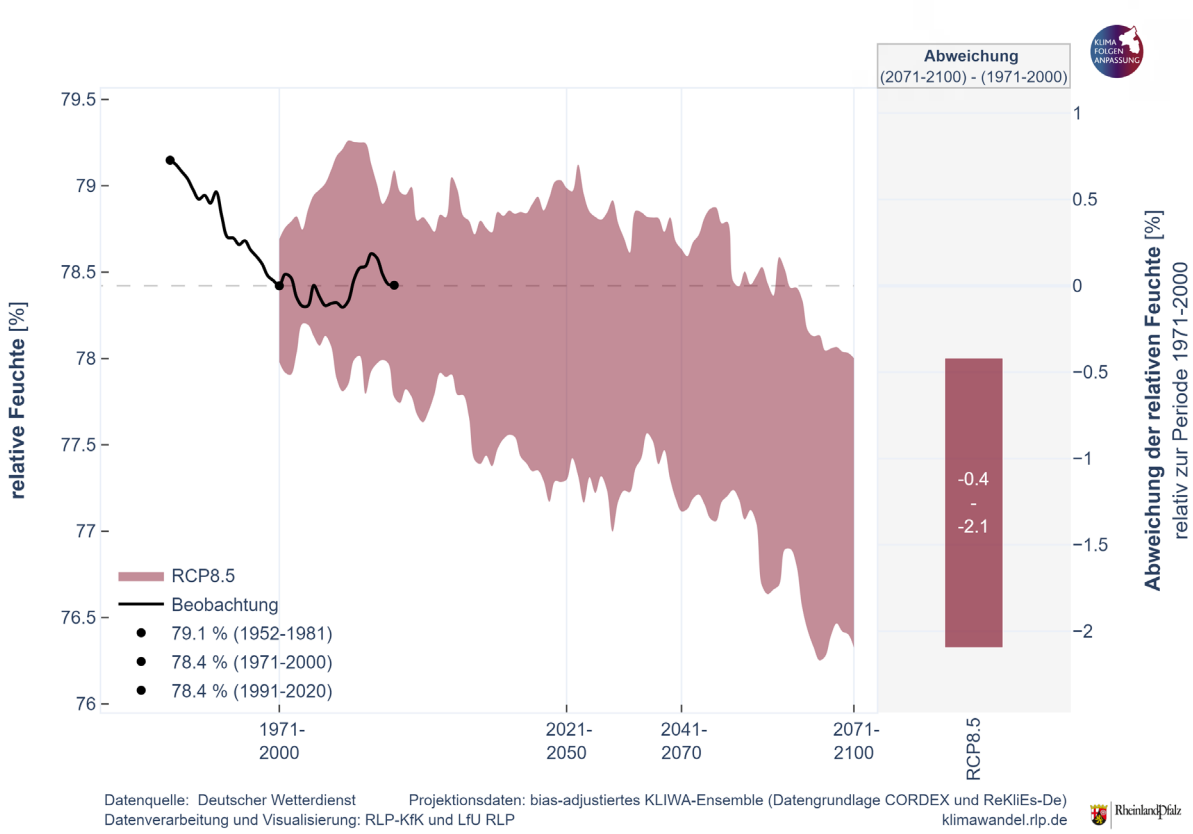


Abbildung 25: Änderung der relativen Luftfeuchte während des 21. Jahrhunderts für das hydrologische Gesamtjahr im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000.

Abbildung 25 zeigt die Veränderung der relativen Luftfeuchte für das hydrologische Gesamtjahr im Verlauf des 21. Jahrhunderts. In der Zukunft muss im KLIWA-Gebiet mit abnehmender relativer Luftfeuchte gerechnet werden. Trotz Anstieg der Temperatur ist nur ein geringer Rückgang bei der absoluten Feuchte zur erwarten.

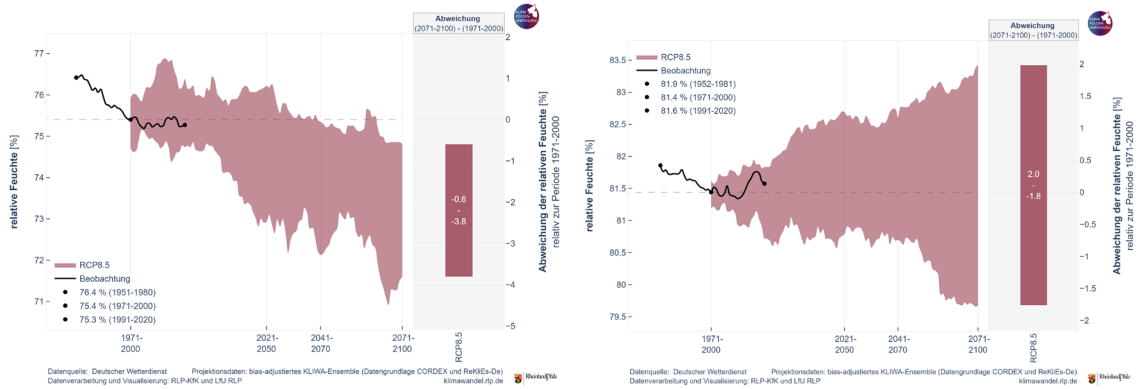


Abbildung 26: Änderung der relativen Luftfeuchte während des 21. Jahrhunderts für das hydrologische Sommerhalbjahr (links) und das hydrologische Winterhalbjahr (rechts) im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000.

Im hydrologischen Sommerhalbjahr zeigen die Ergebnisse ebenfalls einen Rückgang. Im Vergleich zum hydrologischen Gesamtjahr ist die prozentuale Abnahme geringfügig höher (Abbildung 26, links). Das hydrologische Winterhalbjahr zeigt bis über die Mitte des 21. Jahrhunderts hinaus Zu- und Abnahmen der gleichen Größenordnung. Zum Ende des 21. Jahrhunderts vergrößert sich die Bandbreite. (Abbildung 26, rechts).

Damit ist in der Zukunft insgesamt mit wärmerer und trockener Luft zu rechnen, was die Luftaufnahmekapazität erhöht und damit höhere Verdunstungen begünstigt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.3 und zeigt, dass eine zunehmende Lufttemperatur nicht zwangsläufig zu einem höheren Feuchtegehalt der Luft führt.

4.4.2 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung[8] zeigt im Vergleich zwischen hydrologischem Sommer- und Winterhalbjahr deutlich unterschiedliche Entwicklungen. Im hydrologischen Sommerhalbjahr zeigt das Ensemble ein zunehmendes Signal (Abbildung 27).

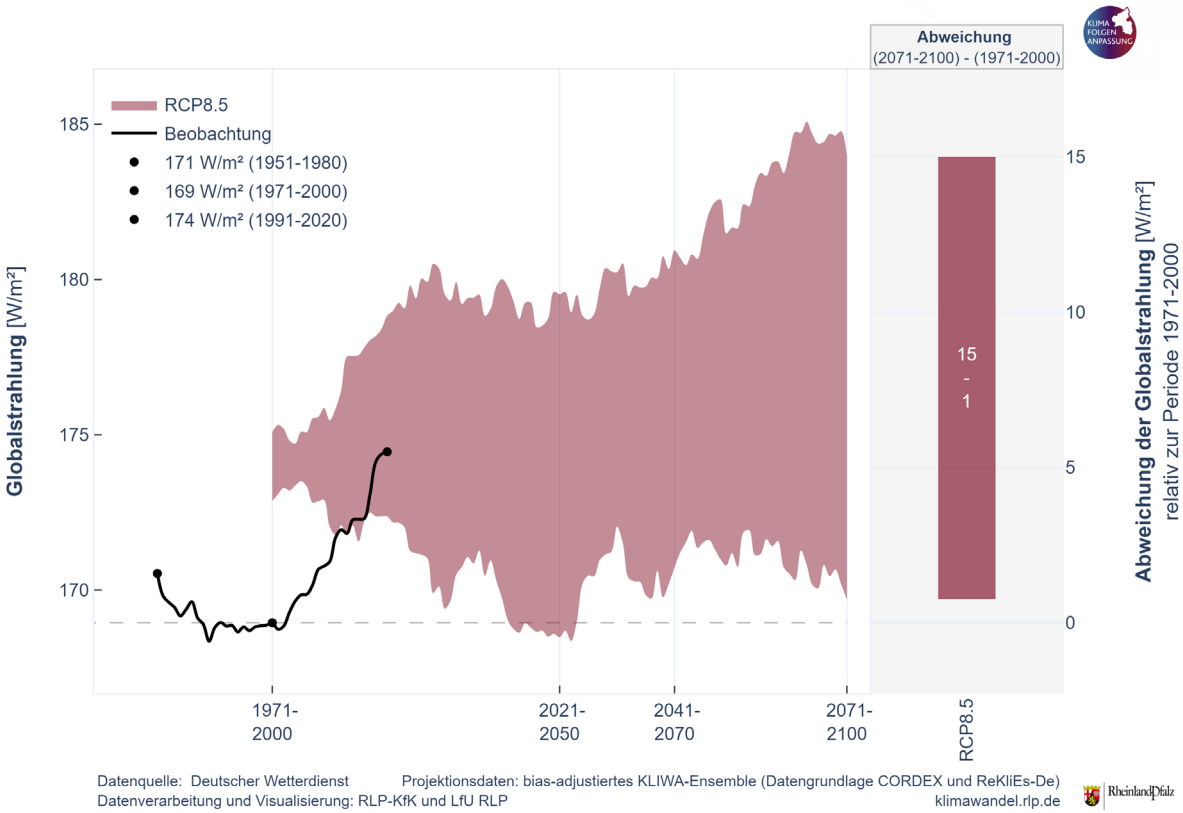


Abbildung 27: Entwicklung der Globalstrahlung im hydrologischen Sommerhalbjahr im KLIWA-Gebiet. Dargestellt sind die gemessene Dauer (schwarze Linie) sowie die projizierte Entwicklung auf Basis des KLIWA-Ensembles (roter Balken, dargestellt ist die Bandbreite zwischen Ensembleminimum und Ensemblemaximum), jeweils als 30-jährige gleitende Mittel.

Im hydrologischen Winterhalbjahr muss dagegen mit kontinuierlich abnehmenden Globalstrahlungswerten gerechnet werden, so dass am Ende des Jahrhunderts alle Projektionen einen Rückgang anzeigen (Abbildung 28). Bei der Entwicklung der Globalstrahlung gibt es geringe räumliche Unterschiede, so dass auf eine Darstellung verzichtet wurde.

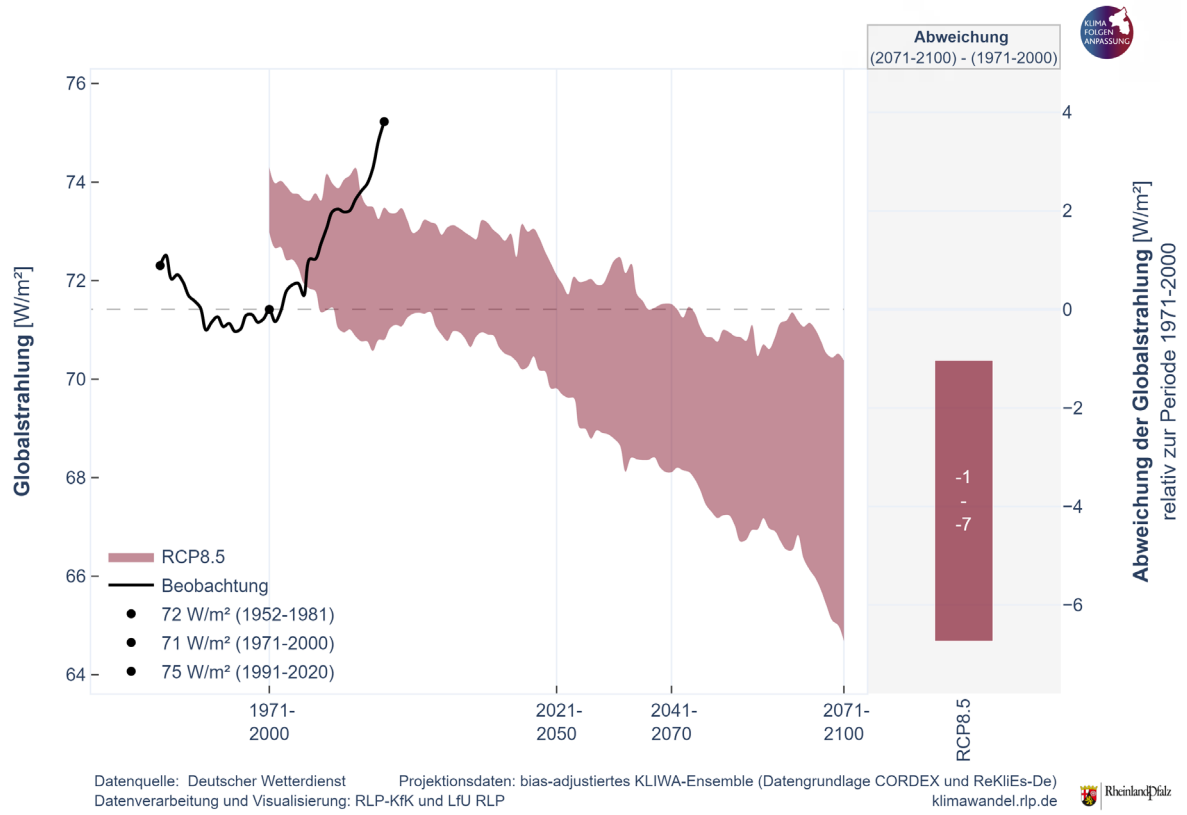


Abbildung 28: Entwicklung der Globalstrahlung im hydrologischen Winterhalbjahr im KLIWA-Gebiet. Dargestellt sind die gemessene Dauer (schwarze Linie) sowie die projizierte Entwicklung auf Basis des KLIWA-Ensembles (roter Balken, dargestellt ist die Bandbreite zwischen Ensembleminimum und Ensemblemaximum), jeweils als 30-jährige gleitende Mittel.

Die Auswertung der projizierten Veränderungen der Globalstrahlung weist lediglich geringe prozentuale Veränderungen auf. In der Publikation von Bartók et al. 2017 wird gezeigt, dass die Mehrzahl regionaler Klimamodelle die Wolkenbildungsprozesse weitgehend unabhängig vom jeweils antreibenden Globalmodell parametrisiert. Dabei ergibt sich ein Trend, der demjenigen der Globalmodelle entgegengesetzt ist. Als wesentliche Ursache hierfür ist die unterschiedliche Berücksichtigung von Aerosoleigenschaften[9] anzuführen, denen ein signifikanter Einfluss auf die Entwicklung der Globalstrahlung zukommt. Im Vergleich dazu erweist sich der in den Globalmodellen simulierte Trend der Globalstrahlung – sowohl hinsichtlich seiner Richtung als auch seiner Amplitude – als deutlich konsistenter mit den in den vergangenen 20 Jahren beobachteten Entwicklungen.

4.4.3 Windgeschwindigkeit

Der Parameter Windgeschwindigkeit ist eine weitere Eingangsgröße in der Klimafolgenmodellierung im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt, die einen Einfluss auf die Verdunstung hat. Es gibt einen leichten Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit mit höheren Werten im Winter und den geringsten im Sommer. Die Änderung dieses Parameters ist während des 21. Jahrhunderts über alle Jahreszeiten betrachtet (Tabelle 3) sehr gering. Die Änderung der Windgeschwindigkeit für das hydrologische Jahr ist zum Ende des 21. Jahrhunderts leicht negativ. Während im hydrologischen Sommer eine Abnahme der Windgeschwindigkeit erwartet werden kann, ist die Richtung der Änderung im hydrologischen Winter nicht eindeutig.

Tabelle 3: Gebietsmittel der Windgeschwindigkeit in m/s. Als Absolutwerte für den Bezugszeitraum (1971–2000) und als Abweichung davon für die drei Zukunftszeiträume.

Saison	Gebietsmittel (m/s)		Abweichung (m/s)					
	Bezugszeitraum		Nahe Zukunft		Mittlere Zukunft		Ferne Zukunft	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Hydrologisches Jahr	2,52	2,55	-0,04	0,05	-0,04	0,02	-0,11	0,02
Hydrologisches Sommerhalbjahr	2,28	2,34	-0,04	-0,03	-0,08	-0,04	-0,10	-0,08
Hydrologisches Winterhalbjahr	2,74	2,78	-0,06	0,12	-0,05	0,12	-0,08	0,13
Frühjahr (MAM)	2,54	2,60	-0,01	0,04	-0,06	0,06	-0,13	0,12
Sommer (JJA)	2,21	2,27	-0,10	-0,07	-0,13	-0,08	-0,20	-0,13
Herbst (SON)	2,39	2,50	-0,06	-0,02	-0,04	0,06	-0,06	-0,07
Winter (DJF)	2,87	2,95	-0,09	0,15	-0,08	0,16	-0,06	0,13

5 Weiterführende Ergebnisse

5.1 Abfluss

Angetrieben von den Ergebnissen des KLIWA-Ensembles werden mit den Wasserhaushaltsmodellen in KLIWA Abflussprojektionen erstellt (für Klimaprojektionen vgl. Tabelle 1)[10].

Die Abflussprojektionen liefern durchgängige (transiente) und pegelbasierte Zeitreihen die in KLIWA u.a. für die hydrologischen Hauptwerte mittlerer Abfluss (MQ), mittlerer Hochwasserabfluss (MHQ) und mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ), aber auch für Hochwasserereignisse verschiedener Jährlichkeiten ausgewertet werden. Ebenso kann die Wasserbilanz der Einzugsgebiete in KLIWA, bei der neben der Abflussbildung auch die Veränderung der Verdunstung von Bedeutung ist, betrachtet werden.

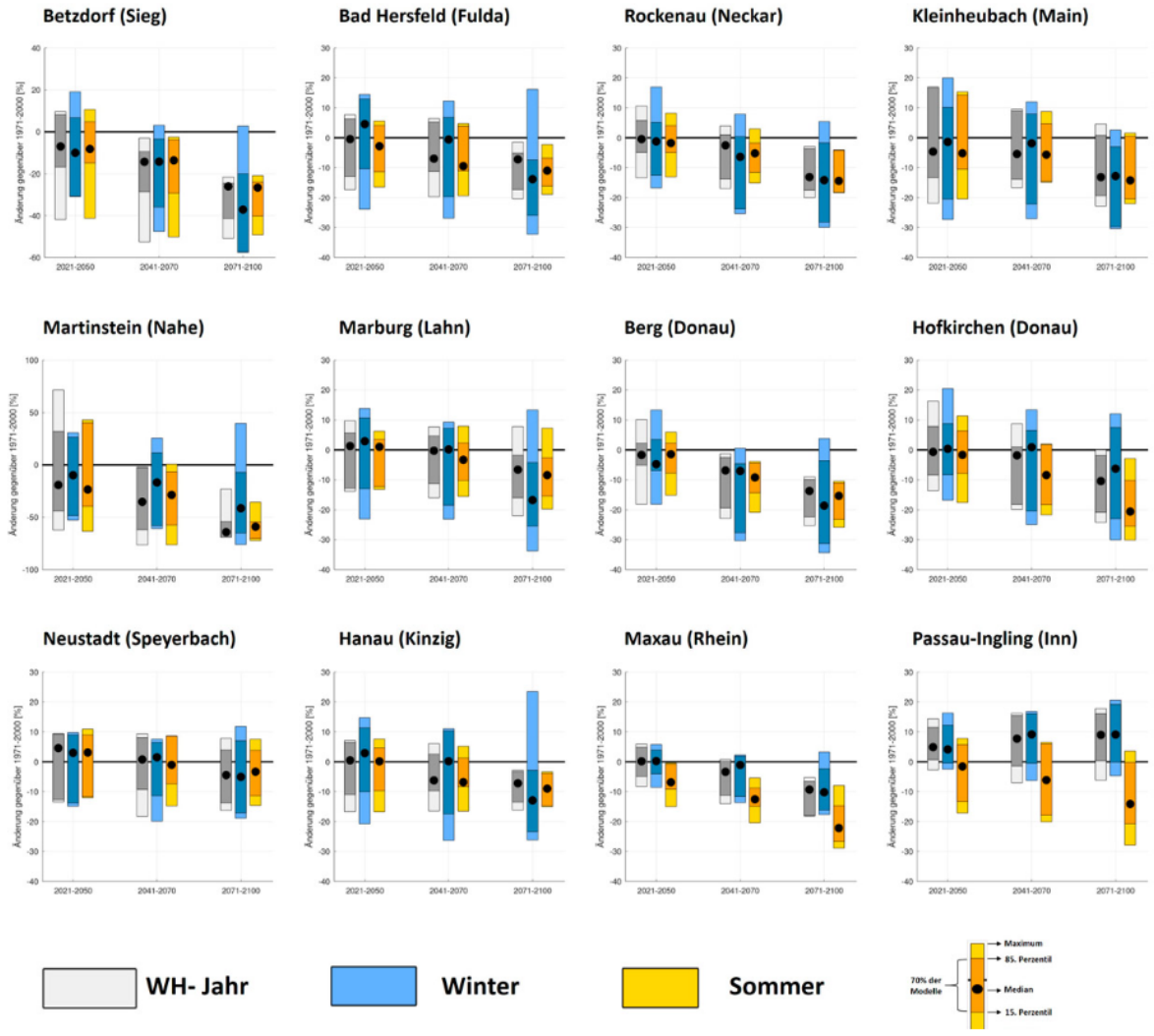


Abbildung 29: Projizierte Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Vergleich zur Referenzperiode (1971–2000). Dargestellt sind ausgewählte Pegel in Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg und Bayern.

Abbildung 29 zeigt beispielhaft, die projizierte Veränderung des MNQ an zwölf ausgewählten Pegeln. In jeder der zwölf Teilgrafiken sind die Veränderungen im Wasserhaushaltsjahr[11] (grauer Balken), Winterhalbjahr (blauer Balken) und Sommerhalbjahr (gelber Balken) dargestellt. Diese drei Balken sind jeweils für die Zukunftszeiträume 2021–2050 (links), 2041–2070 (mittig) und 2071–2100 (rechts) zu sehen. Jeder der Balken ist wiederum in verschiedene Abschnitte unterteilt. Die Gesamtlänge des Balkens gibt die Bandbreite zwischen Ensembleminimum und Ensemblemaximum des gesamten Ensembles an. In jedem der Balken ist ein dunklerer Bereich zu sehen. Dieser Bereich markiert die Bandbreite zwischen 15. und 85. Perzentil der Simulationsergebnisse. Das heißt jeweils 15 % der Ensemblewerte liegen unterhalb und oberhalb dieses Balkens. Außerdem ist im Balken ein schwarzer Punkt markiert. Dieser gibt den Wert des Ensemblemedians an, was bedeutet, dass jeweils 50 % der Ensemblewerte oberhalb und unterhalb des Wertes liegen. Der mittlere Niedrigwasserabfluss wird im Sommer- und Winterhalbjahr verbreitet abnehmen, in alpin geprägten Regionen könnte es im Winterhalbjahr dagegen zumindest vorübergehend zu ansteigenden Niedrigwasserabflüssen kommen.

Die Entwicklung der mittleren Hochwasserabflüsse weist eine große Bandbreite auf. Insgesamt werden jedoch für die meisten Pegel und Zeiträume Zunahmen für das 21. Jahrhundert projiziert.

Beim Mittelwasserabfluss weisen die meisten Pegel im Winterhalbjahr ein eher zunehmendes Signal und im Sommerhalbjahr ein eher abnehmendes Signal auf. Am deutlichsten ist diese Entwicklung an den nival, d.h. durch Schneemengen geprägten Pegeln zu sehen.

Für die Berücksichtigung der Klimaveränderungen bei wasserwirtschaftlichen Maßnahmen erbitten sowohl Maßnahmenträger als auch Vollzugsbehörden häufig einen konkreten Veränderungswert als Ziel- oder Planungsgröße. In KLIWA wird daher aktuell untersucht, wie ein Ensemble an Abflussprojektionen konkret für wasserwirtschaftliche Anpassungsprozesse genutzt werden kann.

5.2 Grundwasserhaushalt

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

Da der Niederschlag eine wichtige Eingangsgröße für die GWN darstellt, bedeutet dies, dass sich die aus der Bodenwasserhaushaltsmodellierung ergebende Bandbreite der GWN maßgebend aus der Bandbreite der Niederschlagsentwicklung sowie ihrer räumlichen und innerjährlichen Verteilung ergibt. Da die GWN eines Jahres ganz wesentlich durch den im hydrologischen Winterhalbjahr auftretenden Niederschlag bestimmt wird, ist von entscheidender Bedeutung, ob sich beispielsweise eine Verschiebung von Sommer- und Winterniederschlägen für die Zukunft ergibt (Kapitel 4.2). Das KLIWA-Ensemble weist mehrheitlich einen Rückgang der Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr und einen Anstieg im hydrologischen Winterhalbjahr bei einem leichten Anstieg für das Gesamtjahr aus. Demgegenüber wurden in den letzten rund 20 Jahren in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz jedoch vermehrt niederschlagsarme hydrologische Winterhalbjahre beobachtet. Insbesondere das Ende des hydrologischen Winterhalbjahres weist einen Niederschlagsrückgang aus.

Mit weiter ansteigender Lufttemperatur erhöht sich, bei ausreichender Wasserverfügbarkeit, auch aufgrund einer verlängerten Vegetationsperiode die (potenzielle) Verdunstung, wodurch die Sickerwasserrate und damit die Grundwasserneubildung reduziert wird. Selbst bei gleichbleibendem Niederschlag verringert sich dadurch der klimatische Wasserüberschuss, der für Böden, Vegetation und Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Aufgrund der engen Kopplung zwischen Wasserbilanz und

Grundwasserneubildung führt diese Entwicklung langfristig zu einer Abnahme der verfügbaren Wasserressourcen. Zudem hat die Temperaturentwicklung in den vergangenen Jahrzehnten die Schneerücklage in den Wintermonaten, insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg, bereits deutlich reduziert. In Konsequenz fließt ein höherer Anteil des Niederschlags schneller ab und steht in der Folge der Grundwasserneubildung nicht mehr zur Verfügung. Diese Entwicklung dürfte sich aufgrund der richtungsstabilen Temperaturentwicklung im KLIWA-Ensemble in den nächsten Jahrzehnten fortsetzen.

Die aus dem erweiterten KLIWA-Ensemble hervorgehende GWN weist eine vergleichsweise hohe Bandbreite auf. Das prozentuale Änderungssignal der mittleren GWN für die nahe Zukunft (2021–2050) bezogen auf die Periode 1971–2000 reicht von Abnahmen zwischen -13 % in Rheinland-Pfalz und -28 % in Baden-Württemberg bis zu Zunahmen zwischen 11 % in Rheinland-Pfalz und 15 % in Hessen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2036–2065) ergeben sich Abnahmen der mittleren GWN zwischen -12 % in Rheinland-Pfalz und -34 % in Baden-Württemberg, bzw. Zunahmen zwischen 10 % in Bayern und 16 % in Rheinland-Pfalz (Abbildung 30).

Bereits in der Periode 1991–2020 blieb die Grundwasserneubildung in Bayern, Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz etwa 8 % unter dem Mittel der Periode 1961–1990. Sollten trockene Winterhalbjahre, wie sie in den vergangenen rund 25 Jahren in Süddeutschland beobachtet wurden, weiterhin vermehrt auftreten, hätte dies weitreichende Konsequenzen für die zukünftige Grundwasserneubildung. Es darf daher nicht ausgeschlossen werden, dass sich das Klima auch weiterhin auf einem Entwicklungspfad bewegen wird, der sich nachteilig auf die Grundwasserneubildung auswirkt. In Bezug auf die Versorgungssicherheit und das Vorsorgeprinzip spielen deshalb trockene Entwicklungen innerhalb des Ensembles („trockener Rand“) eine übergeordnete Rolle. Eine Anpassung an eine veränderte klimatische Situation muss insbesondere die damit verbundenen Risiken berücksichtigen (KLIWA AG Grundwasser, 2023).

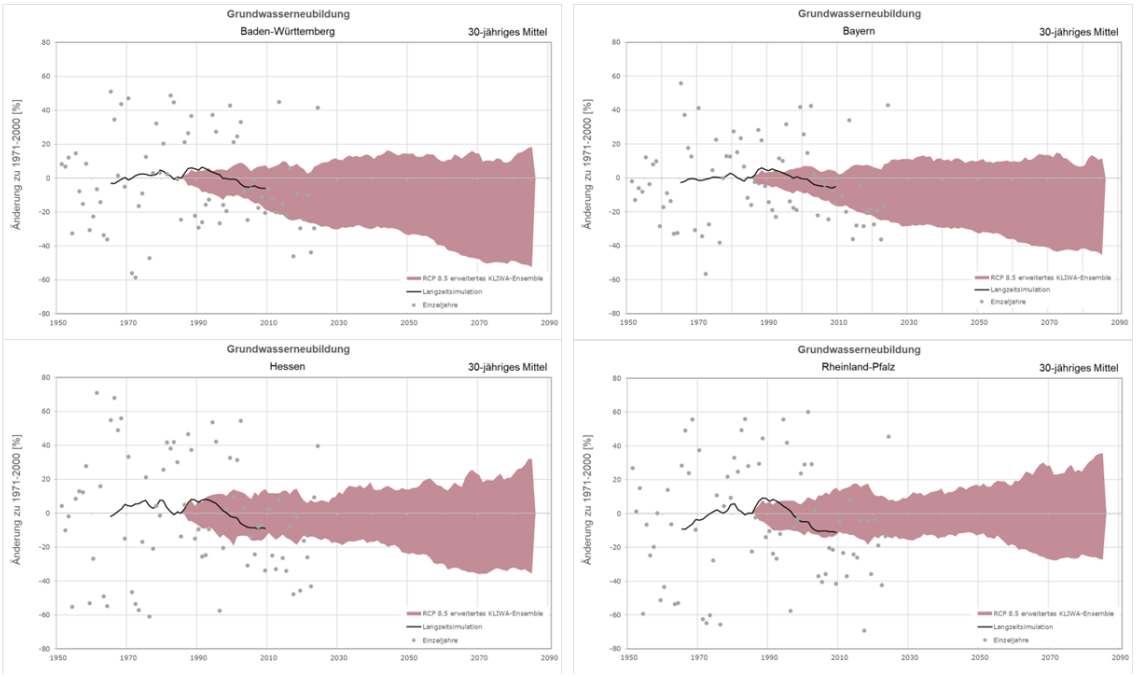


Abbildung 30: 30-jährige gleitende Mittel der relativen Änderung zur Referenzperiode 1971–2000 der vergangenen (schwarze Linie, Langzeitsimulation basierend auf Messdaten) und projizierten Grundwasserneubildung der verschiedenen Projektionen des KLIWA-Ensembles, für Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen. Graue Punkte zeigen die einzelnen Jahresmittelwerte aus der Langzeitsimulation, um die hohe jährliche Variabilität der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag zu veranschaulichen.

5.3 Konvektiver Starkregen

Starkregenereignisse sind charakterisiert durch ihre kurzen Dauern und hohen Intensitäten. Meist sind sie konvektiver Natur, treten also als Schauer oder Gewitter auf. In den Modellen des KLIWA-Ensembles kann die Konvektion, das kleinräumige, thermisch bedingte Aufsteigen von feuchter Luft, nicht auf dem zu groben Modellierungsgitter simuliert werden.

Eine Verbesserung schaffen konvektionserlaubende Simulationen auf einem feineren Gitter mit weniger als 4 km Maschenweite. KLIWA hat ein kleines Ensemble dieser konvektionserlaubenden Projektionen unter Annahme eines Hochemissionsszenarios zusammengestellt und ausgewertet (KLIWA 2024). Die Veränderungen für verschiedene Dauerstufen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren sind in Abbildung 31 dargestellt. Die einzelnen Ensemble-Member der 5 betrachteten Klimamodelle zeigen übereinstimmend einen zukünftigen Anstieg der Intensitäten sommerlicher Starkregenereignisse. Zusätzlich ergibt sich aus den Auswertungen auch eine Verkürzung der Wiederkehrzeiten gegenüber der Vergangenheit. Für das KLIWA-Gebiet ergibt sich eine Verkürzung der Wiederkehrzeiten von 10 Jahren auf bis zu 3 und 4 Jahren, was eine Verdreifachung der Auftrittshäufigkeit bedeuten würde. Damit verbunden ist eine projizierte Erhöhung der Starkregenintensitäten von im Mittel 10 % bis 30 % zum Ende des 21. Jahrhunderts.

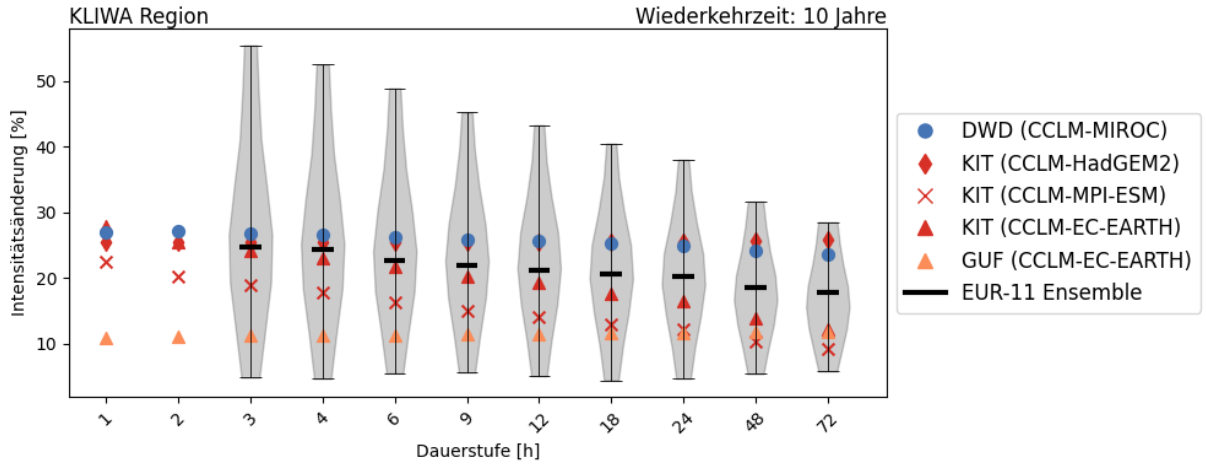


Abbildung 31: Relative Intensitätsänderung für Stark- und Dauerregenereignisse mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren zum Ende 21. Jahrhunderts gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts im KLIWA-Gebiet.

Diese Ergebnisse zeigen aber nur einen Zwischenstand, da sie auf wenigen Simulationen mit dem gleichen konvektionserlaubenden Modell und verschiedenen CMIP5 Globalmodellen beruhen. Zudem weisen die Ergebnisse eine hohe Bandbreite auf, die Richtungssicherheit der Ergebnisse ist jedoch eindeutig. Die Projekte NUKLEUS und UDAG werden die Matrix der Projektionen bald um weitere konvektionserlaubende Regionalmodelle und Globalmodelle der CMIP6-Generation erweitern.

6 Literatur

Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble: Audit und Ensemblebildung, UmweltSpezial. – Augsburg: 55 S.

Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2021): Grundlagen und Verwendung der Klima-Faktenblätter für Bayern. Augsburg: 13 S.

Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2024): Wege in die Klimazukunft – Szenarien und Optionen, UmweltWissen. Augsburg: 16 S.

Bartók, B., Wild, M., Folini, D. Lüthi, D., Kotlarski, S., Schär, C., Vautard, R., Jerez, S., Imecs, Z. (2017): Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. Clim Dyn 49, 2665–2683. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3471-2

Brienen S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Rybka H, Schade N, Stanley K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. 157 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02

Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., Walter, A. (2018): A Pragmatic Approach to Build a Reduced Climate Projection Ensemble Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. Journal of Applied Meteorology and Climatology 57 (3), 477-491. DOI: doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0141.1

DAS-Basisdienst Klima und Wasser (DWD, BfG, BSH, BAW) (2026): Hinweise zur Gültigkeit von Ergebnisspannen auf Basis des Szenarios RCP8.5 (Sachstand: Mai 2026).

DWD (2025): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 36 S.

Enke, W., Deutschländer, T., Schneider, F., Küchler, W. (2005): Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. Meteorologische Zeitung 2005 (14), 247-257.

Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A., Peterson, T. (2002): Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Clim Res 19:193-212 https://doi.org/10.3354/cr019193

Global Carbon Budget (2024): Fossil fuel CO2 emissions increase again in 2024 [online]: URL: https://globalcarbonbudget.org/fossil-fuel-co2-emissions-increase-again-in-2024 (Stand 05.08.2025).

Gudera, T. & Morhard, A. (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWNBW.– Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59 (5), 205-216; DOI: 10.5675/HyWa_2015,5_1

Haller, M., Krähenmann, S., Walter, A. Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen (2021): Bias-Adjustierung und Regionalisierung mit Beobachtungsdaten. In: Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), promet 104, 19-25. DOI: 10.5676/DWD_pub/promet_104_03

Hänsel, S., Brendel, C., Fleischer, C., Ganske, A., Haller, M., Helms, M., Jensen, C., Jochumsen, K., Möller, J., Krähenmann, S., Nilson, E., Rauthe, M., Rasquin, C., Rudolph, E., Schade, N., Stanley, S., Wachler, B., Deutschländer,T., Tinz, B., Walter, A., Winkel, N., Krahe, P., Höpp, S. (2020): Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.01

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R.Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi: 10.1017/9781009157896

Jerez, S., López-Romero, J.M., Turco, M., Jiménez-Guerrero, P., Vautard, R., Montávez, J.P. (2018): Impact of evolving greenhouse gas forcing on the warming signal in regional climate model experiments. Nature Communications 9, DOI: 10.1038/s41467-018-03527-y

KLIWA [Hrsg.] (2024): Zukünftige Entwicklung von Starkregen – Auswertung eines konvektionserlaubenden Ensembles. 20 S.

Krähenmann, S., Walter, A., Klippel, L. (2021): Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung – Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes entwickelte Verfahren zum Postprocessing von Klimamodelldaten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 254, Offenbach am Main. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. 25 S.

Kreienkamp, F., Spekat, A., Enke, W. (2013): The Weather Generator Used in the Empirical Statistical Downscaling Method, WETTREG. Atmosphere 2013 (4), 169-197. DOI: 10.3390/atmos4020169

Kreienkamp, F., Paxian, A., Früh, B., Lorenz, P., Matulla, C. (2018): Evaluation of the empircial-statistical downscaling method EPISODES. Climate Dynamics 2019 (52), 991-1026. DOI: 10.1007/s00382-018-4276-2

LARSIM-Entwicklergemeinschaft [Hrsg.] (2024): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, 269 S. https://larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf

Linke, C. et al. (2024): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam, März 2024. https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Leitlinien-Klimamodelldaten.pdf

McSweeney, C.F., Jones, R.G., Lee, R.W., Rowell, D.P. (2015): Selecting CMIP5 GCMs for Downscaling over multiple regions. Climate Dynamics 44, 3237-3260. DOI: 10.1007/s00382-014-2418-8

Meyer, J., Kohn, I., Stahl, K., Hakala, K., Seibert, J. und Cannon, A.J. (2019): Effects of univariate and multivariate bias correction on hydrological impact projections in alpine catchments. Hydrology and Earth System Sciences 23, 1339-1354. DOI: 10.5194/hess-23-1339-2019

Meynen, E., Schmithüsen, J., Gellert, J., Neef, E., Müller-Miny, H. & Schultze, J. H. (Hrsg.) (1953 – 1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands, Bd. 1-9. – Remagen, Bad Godesberg (Bundesanstalt für Landeskunde u. Raumforschung, Selbstverlag).

Razafimaharo, C., Krähenmann, S., Höpp, S., Rauthe, M., Deutschländer, T. (2020): New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). Theor Appl Climatol 142, 1531–1553. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03388-w

Rechid, D., Breil, M., Jacob, D., Kottmeier, C., Petersen, J., Pfeifer, S., Teichmann, C. (2023): Regionale Klimamodellierung. In: Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (eds) Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-66696-8_4

Schulla, J. (2024): Model Description WaSiM, 411 S.

Smiatek, G., Kunstmann, H., Senatore, A. (2016): EURO-CORDEX regional climate model analysis for the Greater Alpine Region: Performance and expected future change. Journal of Geophysical Research 121 (13), 7710-7728. DOI: 10.1002/2015JD024727

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109, 5-31 DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z

van Vuuren, D. P., O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Sanderson, B. M., Chini, L. P., Friedlingstein, P., Hasegawa, T., Riahi, K., Govindasamy, B., Bauer, N., Eyring, V., Fall, C. M. N., Frieler, K., Gidden, M. J., Gohar, L. K., Högner, A., Jones, A. D., Kikstra, J., King, A., Knutti, R., Kriegler, E., Lawrence, P., Lennard, C., Lowe, J., Mathison, C., Mehmood, S., Nicholls, Z., Prado, L. F., Zhang, Q., Rose, S. K., Ruane, A. C., Sandstad, M., Schleussner, C.-F., Seferian, R., Sillmann, J., Smith, C., Sörensson, A. A., Panickal, S., Tachiiri, K., Vaughan, N., Vishwanathan, S. S., Yokohata, T., Zecchetto, M., and Ziehn, T. (2026): The Scenario Model Intercomparison Project for CMIP7 (ScenarioMIP-CMIP7), Geosci. Model Dev., 19, 2627–2656, https://doi.org/10.5194/gmd-19-2627-2026

Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., López-Moreno, J.I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, Vol. 23(7), 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1

A Anhang

A.1 Einordnung des KLIWA-Ensembles in Bezug auf das DWD Referenzensemble

Da sowohl das KLIWA-Ensemble als auch das erweiterte KLIWA-Ensemble lediglich einen Teil der in EURO-CORDEX bzw. ReKliEs-De verfügbaren regionalen Klimasimulationen abbilden, ist eine systematische Einordnung zentraler Parameter in das Referenzensemble des DWD erforderlich. Die Analyse und Bewertung der Ergebnisse der KLIWA-Ensembles erfolgt auf Grundlage der für die Wirkmodellierung relevanten Variablen (Kapitel 3.2.2). Im vorliegenden Kapitel wird daher eine Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich jener klimatischen Größen vorgenommen, die für die Wirkmodellierung – insbesondere in Bezug auf den hydrologischen Abfluss sowie die Grundwasserneubildung – von maßgeblicher Bedeutung sind.

Ziel dieser Einordnung ist es, den Lesenden eine vergleichende Bewertung der KLIWA-Ergebnisse im Kontext von Ergebnissen zu ermöglichen, die auf dem Referenzensemble des DWD (BMVI-Ensemble) basieren.

Das Referenzensemble des DWD umfasst ausschließlich regionale Klimaprojektionen, die aus dynamisch regionalisierten globalen Klimamodellen abgeleitet wurden. Für das erweiterte KLIWA-Ensemble wurden ergänzend Simulationen einbezogen, die auf statistischen Regionalisierungsmethoden basieren.

Zur vergleichenden Einordnung der Klimavariablen wurden die Größen Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung sowie relative Feuchte paarweise in Streudiagrammen gegenübergestellt. Abbildung 32 zeigt für jede Kombination dieser Parameter die Änderungen zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971–2000), basierend auf 30-jährigen Mittelwerten auf Grundlage von Kalenderjahren.

Für einige Parameterkombinationen zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Ensemblezusammensetzungen. Demgegenüber weisen andere Kombinationen deutliche Abweichungen auf. Besonders ausgeprägt sind die Unterschiede bei der Globalstrahlung, für die sich durch die Einbeziehung statistisch regionalisierter Simulationen eine Erweiterung des Wertebereichs ergibt.

Im Fall der relativen Feuchte zeigen zwei bis drei Simulationen eine deutlich stärkere Abnahme bis zum Ende des 21. Jahrhunderts als die übrigen Simulationen des KLIWA-Ensembles. Diese Simulationen wurden im Rahmen des Klima-Audits, obwohl die Feuchte nicht als Größe zur Einschätzung verwendet wurde, als nicht plausibel eingestuft und daher im KLIWA-Ensemble nicht berücksichtigt.

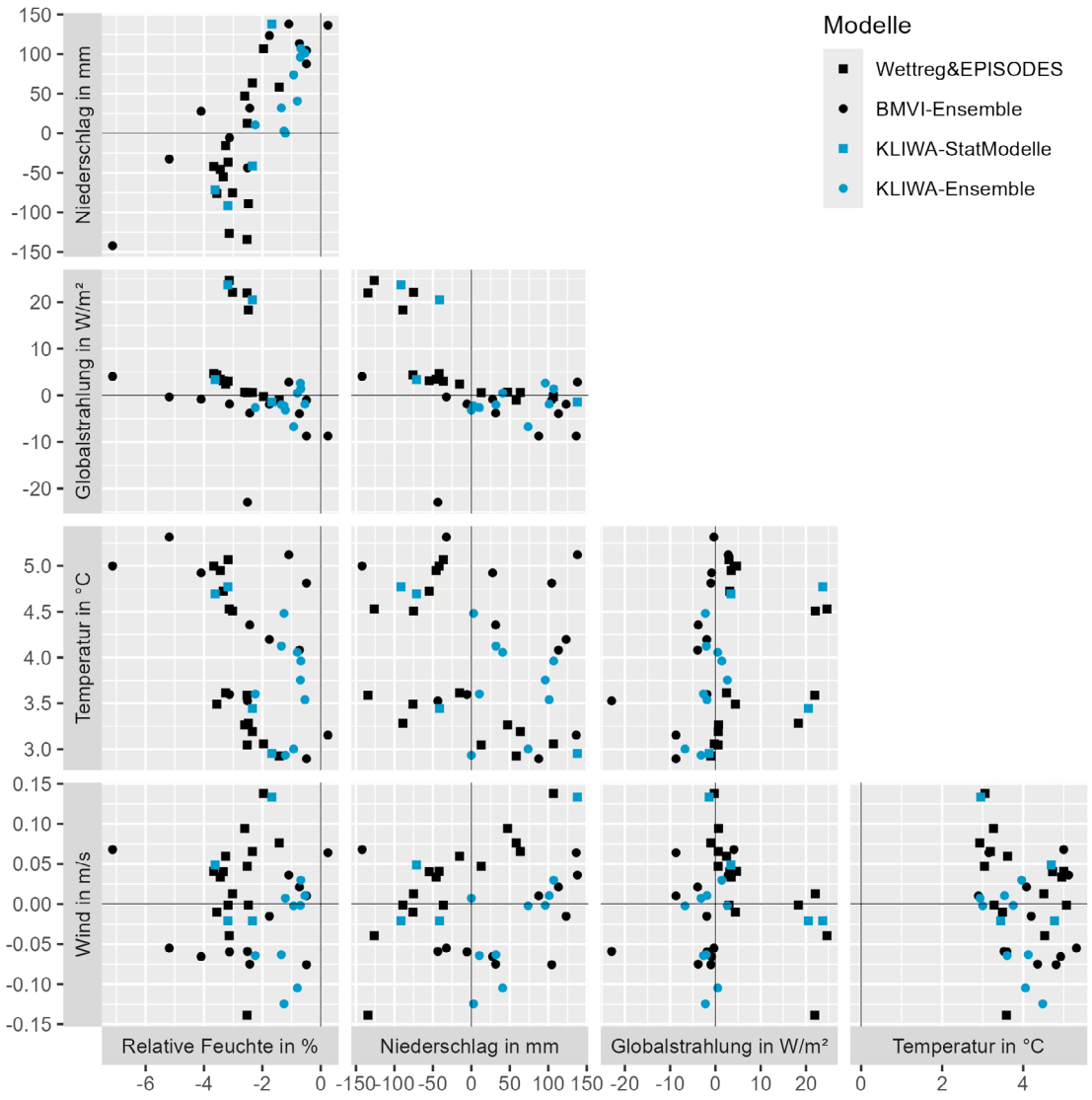


Abbildung 32: Einordnung des KLIWA-Ensembles mit den zusätzlichen statistischen Simulationen in das Referenzensemble des DWDs. Die blauen Punkte (9) sind die dynamischen Simulationen für das KLIWA-Ensemble und die schwarzen Punkte (12) diejenigen Simulationen des DWD-Referenzensembles, die nicht im KLIWA-Ensemble enthalten sind. Die blauen Quadrate (4) sind die für die Grundwasserneubildung genutzten statistischen Simulationen und die schwarzen Quadrate (14) die weiteren zur Verfügung stehenden statistischen Simulationen.

A.2 Ergänzendes Informationsmaterial – KLIWA-Gebiete und Regionen

Untersuchungsgebiete:

Donau		**Lahn**	
D1	Quelle bis Lauchert	L1	Quelle bis zur Dillmündung
D2	Donau, uh. Lauchert bis oh. Iller	L2	Lahn mit Dill bis zur Landesgrenze HE-RP
D3	Iller	L3	Lahn, Landesgrenze HE-RP bis zur Mündung
D4	Donau, uh. Iller bis oh. Wörnitz u. Lech	**Mosel**	
D5	Lech	Mo1	Mosel rechtsseitig von der Grenze
D6	Wörnitz, Altmühl u. Schw. Laber	Mo2	Mosel linksseitig von der Grenze bis Kyll
D7	Donau, uh. Lech bis oh. Naab	Mo3	Mosel von der Dhron bis zum Alfbach
D8	Naab	Mo4	Mosel bis zur Mündung
D9	Regen	**Neckar**	
D10	Donau, uh. Naab bis oh. Isar	N1	Quelle bis oh. Fils
D11	Isar	N2	Neckar u. Fils bis oh. Kocher (ohne Enz)
D12	Vils und Rott	N3	Enz
D13	Alz und Salzach	N4	Kocher
D14	Inn	N5	Jagst
D15	Donau, uh. Isar bis Grenze	N6	Neckar, uh. Jagst bis Mündung
Eder-Diemel		**Rhein**	
W3	Eder	R1	Bodensee
W4	Diemel	R2	Rhein, uh. Bodensee bis Wiese
Elbe		R3	Rhein, uh. Wiese bis oh. Kinzig
E1	Sächs. Saale u. Eger	R4	Rhein und Kinzig bis Murg
Fulda-Werra		R5	Rhein, uh. Murg bis oh. Neckar
W1	Werra	R6	Rhein u. Schwarzbach
W2	Fulda mit Oberweser	R7	Rhein, Isenach bis Nahe (ohne Selz)
Main		R8	Selz
M1	Main bis oh. Regnitz	R9	Rhein und Nahe bis zur Lahn
M2	Regnitz	R10	Rhein rechtsseitig von Neckar bis Main
M3	Main, uh. Regnitz bis oh. Fränk. Saale	R11	Ahr, Wied u. Nette
M4	Fränkische Saale	R12	Sieg
M5	Tauber	**Saar**	
M6	Main, uh. Fränk. Saale bis zur Landesgrenze BY-HE	S1	Saar, Grenze bis zur Landesgrenze SL-RP
M7	Hessisches Maingebiet u. Rheingau		

Abbildung 33: Aufzählung und genaue Beschreibung der 53 KLIWA-Untersuchungsgebiete und der 15 KLIWA-Regionen.



Abbildung 34: Übersicht über die 53 KLIWA-Untersuchungsgebiete und die 15 KLIWA-Regionen.

Endnoten

1 Mit Naturräumen ist in diesem Dokument die Einteilung der Landschaft nach Meynen/Schmithüsen (1953 – 1962) gemeint.

2 KLIWA-Homepage: www.kliwa.de

3 Die Festlegung der Zusammensetzung des KLIWA-Ensembles auf Basis des Szenarios RCP8.5 erfolgte auf der 45. Steuerungsgruppensitzung von KLIWA am 2.12.2019.

4 Beim Export der Daten zur Bereitstellung im ESGF erfolgte eine fehlerhafte Zuordnung der Variable Globalstrahlung, so dass insbesondere zum Ende des 21. Jahrhunderts zu geringe Werte auftreten.

5 Es wurden keine Wasserhaushaltsmodellierungen für das Saarland durchgeführt.

6 Beim 99. Perzentil wird der Tagesniederschlag des drittstärksten Ereignisses eines Jahres betrachtet.

7 Die potenzielle Verdunstung ist die maximal mögliche Verdunstung und Transpiration unter den gegebenen meteorologischen Bedingungen, sofern jederzeit ausreichend Wasser zur Verfügung steht.

8 Die Globalstrahlung ist die gesamte auf eine horizontale Fläche auftreffende kurzwellige Sonnenstrahlung und setzt sich aus der direkten Sonnenstrahlung sowie der diffusen Himmelsstrahlung zusammen.

9 In den meisten regionalen Klimamodellen werden die Aerosole in Szenarienrechnungen konstant gehalten, was im Gegensatz zu den Errungenschaften der Luftreinhaltung der letzten 20 Jahre steht.

10 Aufgrund der Datensituation in den „Bayrischen Alpen“, wurde in diesem Bereich durch die bayerischen Kollegen eine methodisch vergleichbare, eigene Adjustierung mit Hilfe von landeseigenen lokalen Daten vorgenommen. Das Vorgehen kann der Publikation des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2020) entnommen werden.

11 Das Wasserhaushaltsjahr ist als Zeitabschnitt vom 1. April - 31. März des Folgejahres definiert. Für Niedrigwasserauswertungen wird diese Zeitspanne verwendet, damit bei dessen Beginn im April eine Periode der Grundwasserneubildung (Winter/Frühjahr) vorausgeht.

BISHER ERSCHIENENE KLIWA-HEFTE:

Herausgeber: Arbeitskreis KLIWA

Heft 1: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe, 278 S., ISBN 3-88251-279-2, Karlsruhe 2001.

Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 98 S., ISBN 3-88251-284-9, Karlsruhe 2002.

Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88251-286-5, Karlsruhe 2003.

Heft 4: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg, 249 S., ISBN 3-937911- 16-2, München 2004.

Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, 76 S., ISBN 3-937911-17-0, München 2005.

Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, 88 S., ISBN 3-937911-18-9, München 2005.

Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, 160 S., ISBN 3-937911-19-7, München 2005.

Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88148-412-4, Offenbach 2006.

Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, 100 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe 2006.

Heft 10: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, 256 S., ISBN 978-3- 88251-325-7, Karlsruhe 2007.

Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007.

Heft 12: Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern, 147 S., ISBN 978-3-88148-429-9, Offenbach 2008.

Heft 13: Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 128 S., ISBN 978-3-88251-345-5, Karlsruhe 2009.

Heft 14: Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2009.

Heft 15: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4.12.2009 in Mainz, 313 S., ISBN 978-3-933123-20-6, Mainz 2010.

Heft 16: Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2011.

Heft 17: Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 112 S., ISBN 978-3-88251-363-9, Karlsruhe 2012.

Heft 18: Die Entwicklung von Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum, 154 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2012.

Heft 19: 5. KLIWA-Symposium am 6. und 7. Dezember 2012 in Würzburg Fachvorträge. Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, 257 S., Würzburg 2013.

Heft 20: Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern, 142 S., ISBN 978-3-88251-389-9, Karlsruhe 2016.

Heft 21: Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015), 101 S., ISBN 978-3-88251-395-0, Karlsruhe 2017.

Heft 22: 6. KLIWA-Symposium am 22. und 23. Mai 2017 in Baden-Baden – Fachvorträge Risiko Klima-Herausforderungen managen, 278 S., Baden-Baden 2017.

Heft 23: Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen, 95 S., ISBN 978-3-88251-399-8, Karlsruhe 2018.

Heft 24 (2023) 7. KLIWA-Symposium am 14. und 15. September 2022 in Ingelheim Fachvorträge ZU WENIG | ZU VIEL – Wasserwirtschaft zwischen Trockenheit und Starkregen, 120 S., ISBN 978-3-88251-413-1, Mainz 2023.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie auf unserer Internetseite: **http://www.kliwa.de**