

**KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-29/2014**

**Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 1.02**

**Validierung und Bewertung von
Klimaprojektionen – Bereitstellung von
Klimaszenarien für den Binnenbereich**

Koblenz, im Dezember 2014



KLIWAS

KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-29/2014

Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 1.02

Validierung und Bewertung von
Klimaprojektionen – Bereitstellung von
Klimaszenarien für den Binnenbereich

Autoren:

Sabrina Plagemann
Dr. Florian Imbery
Joachim Namyslo



Zitiervorschlag:

PLAGEMANN, S., IMBERY, F., NAMYSLO, J. (2014): Validierung und Bewertung von Klimaprojektionen – Bereitstellung von Klimaszenarien für den Binnenbereich. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.02. KLIWAS-29/2014. DWD / BfG, Koblenz.

DOI: 10.5675/Kliwas_29/2014_1.02

URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_29_2014_1.02.pdf

Seite

Kapitel

Inhaltsverzeichnis

04		TABELLENVERZEICHNIS
05		ABBILDUNGSVERZEICHNIS
07	1	KURZFASSUNG
09	2	ZIELE
10	3	STAND DER FORSCHUNG
14	4	METHODEN
14	4.1	DATEN
16	4.2	REGIONALISIERUNG
17	4.3	BIAS-KORREKTUR
18	4.4	ENSEMBLEAUSWERTUNG
20	5	DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN
22	6	VERNETZUNG DES PROJEKTES, KOOPERATIONSPARTNER
24	7	ERGEBNISSE
24	7.1	ERREICHTER METHODISCH-WISSENSCHAFTLICHER FORTSCHRITT
24	7.2	EVALUATION DER AUFBEREITETEN KLIMAPROJEKTIONEN
30	7.3	KERNAUSSAGEN ZU DEN ERGEBNISSEN
30	7.3.1	AUSSAGEN FÜR DAS GESAMTE UNTERSUCHUNGSGEBIET
38	7.3.2	AUSSAGEN ZU DEN EINZUGSGEBIETEN: NAHE ZUKUNFT (LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLAG)
41	7.3.3	AUSSAGEN ZU DEN EINZUGSGEBIETEN: FERNE ZUKUNFT (LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLAG)
44	8	DISKUSSION UND AUSBLICK
46	9	DANKSAGUNG
47	10	LITERATUR
53	11	ABKÜRZUNGEN

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

15	1	ÜBERSICHT DER FÜR KLIWAS VERWENDETEN KLIMAPROJEKTIONEN
22	2	PROJEKT 1.02 - KOOPERATIONEN UND AUFTRÄGE
39	3	MITTLERE ÄNDERUNGEN DER LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLÄGE IM ELBE-EINZUGSGEBIET FÜR DIE NAHE ZUKUNFT (2021 BIS 2050) VERGLICHEN MIT DEM BE-OBACHTUNGSZEITRAUM (1961 BIS 1990); ORANGEFARBENE HINTERLEGUNG WEIST AUF TROCKENERE, BLAUE HINTERLEGUNG AUF FEUCHTERE VERHÄLTNISSE IN DER ZUKUNFT. GRAUE HINTERLEGUNG ZEIGT INDIFFERENTE SIGNALE DER UNTERSCHIEDLICHEN MODELLSIMULATIONEN
39	4	MITTLERE ÄNDERUNGEN DER LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLÄGE IM DONAU-EINZUGSGEBIET FÜR DIE NAHE ZUKUNFT (2021 BIS 2050) VERGLICHEN MIT DEM BEOBACHTUNGSZEITRAUM (1961 BIS 1990); ORANGEFARBENE HINTERLEGUNG WEIST AUF TROCKENERE, BLAUE HINTERLEGUNG AUF FEUCHTERE VERHÄLTNISSE IN DER ZUKUNFT. GRAUE HINTERLEGUNG ZEIGT INDIFFERENTE SIGNALE DER UNTERSCHIEDLICHEN MODELLSIMULATIONEN
40	5	MITTLERE ÄNDERUNGEN DER LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLÄGE IM RHEIN-EINZUGSGEBIET FÜR DIE NAHE ZUKUNFT (2021 BIS 2050) VERGLICHEN MIT DEM BEOBACHTUNGSZEITRAUM (1961 BIS 1990); ORANGEFARBENE HINTERLEGUNG WEIST AUF TROCKENERE, BLAUE HINTERLEGUNG AUF FEUCHTERE VERHÄLTNISSE IN DER ZUKUNFT. GRAUE HINTERLEGUNG ZEIGT INDIFFERENTE SIGNALE DER UNTERSCHIEDLICHEN MODELLSIMULATIONEN
42	6	MITTLERE ÄNDERUNGEN DER LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLÄGE IM ELBE-EINZUGSGEBIET FÜR DIE FERNE ZUKUNFT (2071 BIS 2100) VERGLICHEN MIT DEM BE-OBACHTUNGSZEITRAUM (1961 BIS 1990); ORANGEFARBENE HINTERLEGUNG WEIST AUF TROCKENERE, BLAUE HINTERLEGUNG AUF FEUCHTERE VERHÄLTNISSE IN DER ZUKUNFT. GRAUE HINTERLEGUNG ZEIGT INDIFFERENTE SIGNALE DER UNTERSCHIEDLICHEN MODELLSIMULATIONEN
43	7	MITTLERE ÄNDERUNGEN DER LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLÄGE IM DONAU-EINZUGSGEBIET FÜR DIE FERNE ZUKUNFT (2071 BIS 2100) VERGLICHEN MIT DEM BEOBACHTUNGSZEITRAUM (1961 BIS 1990); ORANGEFARBENE HINTERLEGUNG WEIST AUF TROCKENERE, BLAUE HINTERLEGUNG AUF FEUCHTERE VERHÄLTNISSE IN DER ZUKUNFT. GRAUE HINTERLEGUNG ZEIGT INDIFFERENTE SIGNALE DER UNTERSCHIEDLICHEN MODELLSIMULATIONEN

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

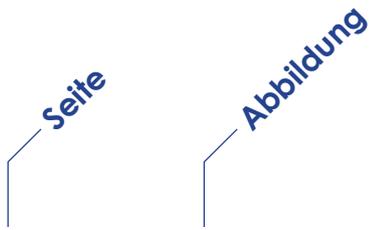
43	8	MITTLERE ÄNDERUNGEN DER LUFTTEMPERATUR UND NIEDERSCHLÄGE IM RHEIN-EINZUGSGEBIET FÜR DIE FERNE ZUKUNFT (2071 BIS 2100) VERGlichen MIT DEM BEOBACHTUNGSZEITRAUM (1961 BIS 1990); ORANGEFARBENE HINTERLEGUNG WEIST AUF TROCKENERE, BLAUE HINTERLEGUNG AUF FEUCHTERE VERHÄLTNISSE IN DER ZUKUNFT. GRAUE HINTERLEGUNG ZEIGT INDIFFERENTE SIGNALE DER UNTERSCHIEDLICHEN MODELLSIMULATIONEN
-----------	----------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Seite

Abbildung

Abbildungsverzeichnis

12	1	MODELLKASKADE IN DER KLIMAFOLGENFORSCHUNG MIT SCHEMATISCHER DARSTELLUNG ZUNEHMENDEN UNSICHERHEITEN (NACH VINER 2002)
25	2	GEMITTELTE PROZENTUALE ABWEICHUNGEN DER AUFBEREITETEN KLIMAPROJEKTIONEN VON DEN HYRAS-PRE-REFERENZDATEN FÜR VERSCHIEDENE KLIMAINDIZES FÜR DIE EINZUGSGEBIETE ELBE, RHEIN (RHINE) UND DONAU (DANUBE), JEWEILS FÜR DIE WINTER- (DJF) UND SOMMERMONATE (JJA)
27	3	TAYLORDIAGRAMME DER 95. PERZENTILE DES NIEDERSCHLAGS FÜR 17 KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DAS EINZUGSGEBIET DER ELBE IN DEN SOMMERMONATEN (OBEN) UND WINTERMONATEN (UNTEN)
28	4	MODELLKASKADE IN DER KLIMAFOLGENFORSCHUNG MIT SCHEMATISCHER DARSTELLUNG ZUNEHMENDEN UNSICHERHEITEN (NACH VINER 2002)
29	5	TAYLORDIAGRAMM DER 95. PERZENTILE DES NIEDERSCHLAGS FÜR 17 KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DAS EINZUGSGEBIET DER DONAU IN DEN SOMMER- (OBEN) UND WINTERMONATEN (UNTEN)
31	6	PROJIZIERTE RELATIVE PROZENTUALE ÄNDERUNG DES MITTLEREN SOMMERNIEDERSCHLAGES (JJA, OBEN) UND DES WINTERNIEDERSCHLAGES (DJF, UNTEN), MITTEL ÜBER DEN PROJEKTIONSZEITRAUM 2021-2050
32	7	PROJIZIERTE RELATIVE PROZENTUALE ÄNDERUNG DES MITTLEREN SOMMERNIEDERSCHLAGES (JJA, OBEN) UND DES WINTERNIEDERSCHLAGES (DJF, UNTEN), MITTEL ÜBER DEN PROJEKTIONSZEITRAUM 2071-2100



Abbildungsverzeichnis

33	8	PROJIZIERTE ÄNDERUNG DES JAHRESMITTELS DER LUFTEMperatur, MITTEL ÜBER DIE PROJEKTIONSZEITRÄUME 2021-2050 (OBEN) UND 2071-2100 (UNTEN)
34	9	PROJIZIERTE ÄNDERUNG DES JAHRESMITTELS DER GLOBALSTRAHLUNG, MITTEL ÜBER DEN PROJEKTIONSZEITRAUM 2071-2100 FÜR DIE SOMMERMONATE (JJA, OBEN) UND WINTERMONATE (DJF, UNTEN)
36	10	PROJIZIERTE ÄNDERUNG DER MITTLEREN ANZAHL HEIßER TAGE, MITTEL ÜBER DIE PROJEKTIONSZEITRÄUME 2021-2050 (OBEN) UND 2071-2100 (UNTEN)
37	11	BOX-WHISKER-PLOTS DER LÄNGSTEN FEUCHT- (LINKS) UND TROCKENPERIODE AUS 17 KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DIE ZEITRÄUME 1961-1990, 2021-2050 UND 2071-2100 IM EINZUGSGEBIET DES RHEINS
38	12	BOX-WHISKER-PLOTS DER LÄNGSTEN FEUCHT- (LINKS) UND TROCKENPERIODE AUS 17 KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DIE ZEITRÄUME 1961-1990, 2021-2050 UND 2071-2100 IM EINZUGSGEBIET DER DONAU
38	13	BOX-WHISKER-PLOTS DER LÄNGSTEN FEUCHT- (LINKS) UND TROCKENPERIODE AUS 17 KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DIE ZEITRÄUME 1961-1990, 2021-2050 UND 2071-2100 IM EINZUGSGEBIET DER ELBE

1 Kurzfassung

Um mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft und Schifffahrt bewerten zu können, verfolgt das BMBVS-Ressortforschungsprogramm KLIWAS konsequent eine Modellkette mit Ensembleansatz. Das Projekt 1.02 stellt Wirkmodellierern verschiedener Fachrichtungen aufbereitete und korrigierte Klimaprojektionen zur Verfügung und quantifiziert Unsicherheiten insbesondere hydrometeorologisch relevanter Parameter.

Datengrundlage ist ein Klimaprojektionsensemble von 35 Projektionen (Stand 2013) verschiedener Kombinationen aus Emissionsszenarien, Global- und Regionalmodellen, die zum größten Teil aus dem EU-Forschungsprojekt ENSEMBLES (FP 6) stammen.

Um Klimaprojektionsdaten als Input für Wirkmodelle nutzen zu können, werden die Tageswerte der wichtigsten hydrometeorologischen Variablen Niederschlag, Lufttemperatur und Globalstrahlung auf ein einheitliches hochaufgelöstes 5 km x 5 km-Gitter für das KLIWAS-Zielgebiet disaggregiert. Hierfür wurden verschiedene statistische und deterministische Verfahren, die dem Deutschen Wetterdienst (DWD) vorliegen, modifiziert bzw. neu entwickelt.

Darüber hinaus müssen modellinterne Fehler (Bias) quantifiziert und korrigiert werden. Innerhalb von KLIWAS werden die oben aufgeführten Variablen mit einem linearen Verfahren korrigiert. Zusätzlich wird auf die Niederschlagsdaten das Quantile Mapping Verfahren angewandt.

Die Ergebnisse aus unterschiedlichen Klimamodellrechnungen sind allerdings nach wie vor einzeln nicht vollends belastbar. Dies resultiert aus Unsicherheiten in den zugrundeliegenden Emissionsszenarien, den Start- und Randbedingungen der Modellläufe, der Modellparametrisierung, den zugrundeliegenden Beobachtungswerten, der Kopplung verschiedener Modelle und dem Problem, dass es Prozesse und Kopplungen im Klimasystem gibt, die bis heute nicht vollständig verstanden sind bzw. nicht ausreichend gut in Modellen abgebildet werden können.

Mit einem ausreichend großen Ensemble aus Klimaprojektionen ist es allerdings möglich, statistische Aussagen über zukünftige Klimazustände zu treffen. Auf der Grundlage eines Ensembles aus 17 Klimaprojektionen, basierend auf dem A1B-Emissionsszenario, wurden für verschiedene Parameter und Indizes (z. B. Lufttemperatur, Niederschlag, Heiße Tage, Frosttage etc.) durch die Bestimmung von Perzentilen Bandbreiten möglicher zukünftiger Klimazustände berechnet. Innerhalb dieser kann ein bestimmtes Änderungssignal erwartet werden. Mit diesen Bandbreiten ist es möglich, Aussagen zu Änderungskorridoren des zukünftigen Klimas abzuleiten.

Für das Jahresmittel der Lufttemperatur als Mittel des KLIWAS-Untersuchungsgebietes (Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete) ist bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts eine Zunahme von mindestens 0,5 °C wahrscheinlich. Dabei ist eine Temperaturzunahme um mehr als 2 °C (Norddeutschland) bzw. 2,5 °C (Süddeutschland) jedoch eher unwahrscheinlich. Für den Zeitraum 2071 bis 2100 kann eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von mindestens 1,5 °C und maximal 3,5 °C in Norddeutschland bzw. 5 °C in Süddeutschland als wahrscheinlich angesehen werden.

Mit den Ensembleauswertungen der Klimaprojektionen zeigt sich für die Zukunft eine Tendenz zur Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten, während in den Wintermonaten eine Niederschlagszunahme wahrscheinlich ist. Die projizierten relativen Änderungen des mittleren Sommerniederschlags weisen eine Spanne zwischen einer sehr geringen und einer Abnahme von bis zu 15 % für den Zeitraum 2021 bis 2050 und bis zu 25 % für den Zeitraum 2071 bis 2100 aus.

Die aufbereiteten Klimaprojektionen sowie deren statistischen Auswertungen hydro-meteorologischer Kennwerte stellen ein wichtiges Instrument zur Auswertung möglicher Änderungen des Wasserhaushalts in Mitteleuropa dar und bilden die Arbeitsgrundlage für nachgeschaltete Wirkmodelle wie auch die Entwicklung von Anpassungsstrategien.

Die Ensembleauswertungen, die mit diesen Methoden durchgeführt wurden, wurden inzwischen für verschiedene weitere Vorhaben übernommen. Sie bilden z.B. die Grundlage für den Deutschen Klimaatlas (www.dwd.de/klimaatlas) und wurden für die Auswertungen im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) und dem Aktionsplan Anpassung (APA) der deutschen Bundesregierung bereitgestellt.

2 Ziele

Die Änderungen des Klimas werden unser Zusammenleben in den kommenden Jahrzehnten weltweit und natürlich auch in Deutschland stark beeinflussen. Um Aussagen über die Entwicklung unseres Klimas treffen zu können, werden Klimamodelle benötigt, die möglichst alle relevanten Prozesse des Klimasystems berücksichtigen. Für Klimaanalysen auf einer regionalen Skala reichen globale Klimamodelle in aller Regel nicht aus. Um dennoch Aussagen für regionale Fragestellungen zu erhalten, wurden zusätzlich regionale Klimamodelle entwickelt, die mit den globalen Modellen gekoppelt werden. Die Interpretation und Anwendung der Ergebnisse von Klimaprojektionsläufen für Planungen von Anpassungsmaßnahmen sollten sich aufgrund von Modellunsicherheiten nicht auf einzelne Modellläufe abstützen. Daher werden möglichst viele Projektionen gesammelt und kollektiv ausgewertet. Diese Vorgehensweise wird als Ensembleansatz bezeichnet.

Um darüber hinaus die Auswirkungen der Klimaänderung auf die unterschiedlichen Lebensbereiche abschätzen zu können, sind zusätzlich sogenannte Wirkmodelle erforderlich. Mit diesen Modellen, wie z.B. zu hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen, können zukünftige klimatologische Verhältnisse in verschiedensten Lebensbereichen simuliert und mögliche Anpassungsstrategien entwickelt werden. Dabei ist die Analyse von Ergebnisspannweiten und die Berücksichtigung von Unsicherheiten unabdingbar (Imbery et al., 2013; Kotlarski et al., 2012; Nilson et al., 2010).

Um diese Wirkmodelle mit den Ergebnissen aus der Klimamodellierung antreiben zu können, ist es oft unerlässlich, modellinterne Fehler zu korrigieren und die Ergebnisse mit statistischen Methoden auf ein feinere geographisches Gitter zu regionalisieren.

Hieraus leiten sich die Ziele für das KLIWAS Projekt 1.02 ab:

- Erstellung eines Ensembles regionaler Klimaprojektionen,
- Entwicklung von Methoden zu Regionalisierung der wichtigsten hydrometeorologischen Variablen auf ein einheitliches geographisches Gitter,
- Korrektur der modellinternen Fehler dieser Variablen (Bias-Korrektur),
- Evaluation der Qualität der aufbereiteten Klimaprojektionen,
- Entwicklung statistischer Verfahren zur Bestimmung möglicher zukünftiger klimatischer Zustände aus diesem Klimaprojektionsensemble und
- Bereitstellung der aufbereiteten Daten für die weiteren KLIWAS-Projekte über Datenbanken.

3 Stand der Forschung

Für Aussagen über die mögliche Entwicklung unseres Klimas werden u. a. globale Klimamodelle (Global Climate Models, GCM) benötigt, die möglichst alle relevanten Prozesse des Klimasystems berücksichtigen. Diese Klimamodelle beschreiben die Reaktion des Klimasystems auf eine externe Änderung und produzieren somit keine Vorhersage, sondern stellen mögliche zukünftige Entwicklungen dar. Als Grundlage für diese Modellläufe werden Emissionsszenarien verwendet. Sie projizieren unterschiedliche Emissionstrends von Treibhausgasen in die Zukunft, abhängig von verschiedenen globalen sozio-ökonomischen Entwicklungen (IPCC 2007,2013).

Die Ergebnisse aus unterschiedlichen Klimamodellrechnungen sind allerdings nach wie vor einzeln nicht vollends belastbar (Stott and Forest, 2007; Christensen et al., 2010; Deque and Somot, 2010; Giorgi et al., 2009). Dies resultiert aus Unsicherheiten in

- den zugrundeliegenden Emissionsszenarien,
- den Start- und Randbedingungen der Modellläufe,
- der Modellparametrisierung,
- den zugrundeliegenden Beobachtungswerten,
- technischen Grenzen der Rechnerleistung und Speicherkapazität,
- der Kopplung verschiedener Modelle,
- dem Problem, dass es Prozesse und Kopplungen im Klimasystem gibt, die bis heute nicht vollständig verstanden sind bzw. nicht ausreichend gut in Modellen abgebildet werden können.

Globale Klimamodellsimulationen werden aufgrund hoher Rechenzeiten in einer geringeren räumlichen Auflösung gerechnet. Dies hat zur Folge, dass regionale Prozesse entweder parametrisiert oder nicht erfasst und kleinräumige Strukturen in zeitlich hoher Auflösung nicht abgebildet werden können. Somit entsteht ein großer Bedarf an der Anwendung dynamischer (Regional Climate Models, RCM) und statistischer Methoden, um die Ergebnisse globaler Klimamodelle detailliert in einzelnen Regionen darzustellen (Fowler et al., 2007). Die verschiedenen globalen und regionalen Klimamodelle unterscheiden sich zum Teil systematisch in ihrem Aufbau und in ihren Parametrisierungsansätzen.

Klimamodelle beinhalten eine angenäherte Darstellung von Naturprozessen, so dass systematische Fehler (Modellbias) entstehen können. Wenn die Ergebnisse aus Klimaprojektionen als Input für Wirkmodelle dienen sollen, müssen diese modellin-

ternen Fehler quantifiziert und gegebenenfalls korrigiert werden. Eine solche Bias-Korrektur kann durch den Vergleich zwischen beobachteten Daten (z. B. 1961-1990) und einem Kontrolllauf des Klimamodells für den gleichen Zeitraum durchgeführt werden. Für die jeweiligen benötigten Klimaparameter stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung (Piani et al. 2010a, b; Fowler et al, 2007; Themessl et al, 2012).

Bei der Verwendung von Bias-Korrekturverfahren wird davon ausgegangen, dass der zu korrigierende Modellbias stationär ist, d.h., dass er sich in der Zeit nicht ändert. Dies ist allerdings eine Annahme, die für mögliche sich ändernde zukünftige Klimazustände nicht überprüfbar ist (Maraun 2012; Teutschbein und Seibert, 2012). Zu beachten ist ebenfalls, dass die physikalische Konsistenz zwischen den verschiedenen Variablen, die in deterministischen Klimamodellen gegeben ist, nach der Anwendung von statistischen Korrekturverfahren verloren gehen kann. Daher ist es bei der Verwendung von Klimaprojektionsdaten wichtig, sich bewusst zu sein, welche Vor- und Nachteile eine Biaskorrektur für die jeweilige Fragestellung bestehen.

Für den Antrieb von Wirkmodellen werden in den meisten Fällen korrigierte Zeitreihen aus Klimaprojektionen benötigt. Aufgrund der oben beschriebenen Annahme der Stationarität des Modell-Biases kann die Auswertung von Änderungssignalen aus Klimaprojektionen in den meisten Fällen auch mit unkorrigierten Klimaprojektionsdaten durchgeführt werden.

Trotz einer Vielzahl an Bias-Korrekturverfahren gilt es zu bedenken, dass es kein ‚bestes‘ Aufbereitungsverfahren, kein ‚bestes‘ Modell und keine ‚beste‘ Modellkombination gibt. Je nach Modell, Anfangs- und Randbedingungen werden unterschiedliche Trends berechnet. Die daraus resultierenden Bandbreiten an Ergebnissen produzieren Unsicherheiten, welche bei der Interpretation von Klimaprojektionen bedacht werden müssen.

Es gibt verschiedene konzeptionelle Ansätze, Klimaprojektionsensembles zu erstellen. Im Folgenden werden die derzeit in der Klimaforschung am häufigsten angewandten Verfahren vorgestellt:

1. Unsicherheiten, die aus der modellinternen Variabilität resultieren, können quantifiziert werden, in dem für ein einzelnes Modell systematisch verschiedene Start- und Randbedingungen benutzt werden (z. B. Variationen der Anfangsbedingungen für die Bodenfeuchte, Stabilitätsindizes, Konvektion etc.). Werden in dem Klimamodell mehrere physikalische Prozesse und Parameter, die nur unzureichend bekannt sind, ‚gestört‘ (engl.: *perturbed physics*), können sehr große Klimaprojektionsensembles erstellt werden. Die Spannweite der Klimaprojektionen hängt dann von der Anzahl der Parameter ab, die variiert werden. Für das aktuelle interministerielle Programm zur Anpassung an den Klimawandel in Großbritannien (UKCP 09, Murphy et al., 2009) wurde mit Hilfe dieses Verfahrens ein Klimaprojektionsensemble mit mehreren Tausend Ensemblemitgliedern erstellt. Mit Hilfe dieses Ensembles wurden daran

anschließend für eine Vielzahl klimatologischer Kennzahlen probabilistische Karten erstellt.

- Bei einem Multimodellansatz (meistens Emissionsszenario → GCM → RCM → Wirkmodell, siehe Abbildung 1) können bestehende Unsicherheiten innerhalb der Modellkette bewertet werden. Es bietet sich an, verschiedene Modelle miteinander zu kombinieren und die aus den verschiedenen Kopplungen entstehenden Bandbreiten zu bestimmen. Dabei ist darauf zu achten, dass ein möglichst breites Spektrum an Kombinationsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Modellen abgedeckt wird, um die aus den verschiedenen Kombinationen resultierende Variabilität vollständig abbilden zu können und zu verhindern, dass mit einer Übergewichtung einzelner Modelle falsche Trends bestimmt werden.

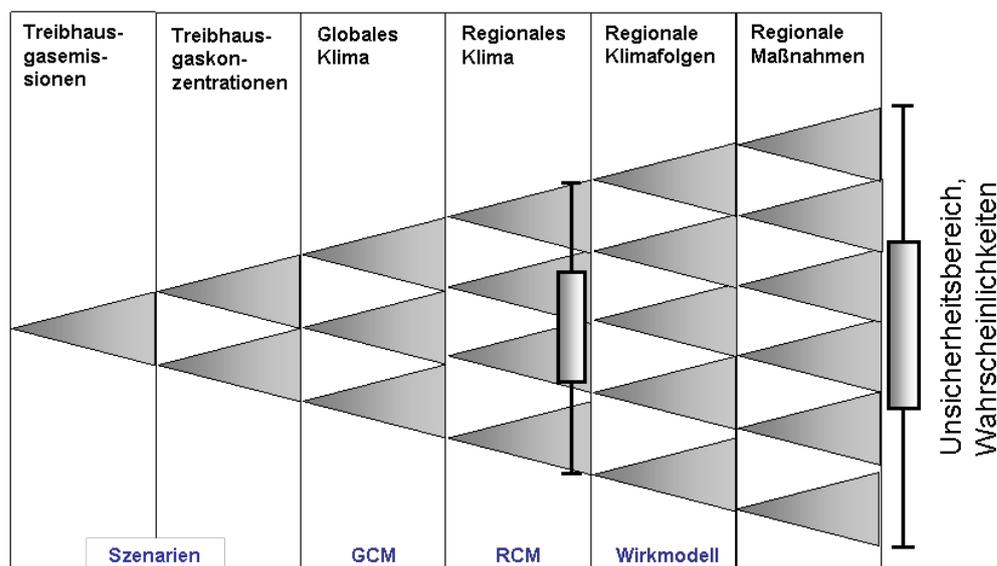


Abbildung 1: Modellkaskade in der Klimafolgenforschung mit schematischer Darstellung zunehmenden Unsicherheiten (nach Viner 2002)

Es können prinzipiell zwei verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Bandbreiten aus Klimaprojektionsensembles unterschieden werden. Zum einen werden mit Hilfe unterschiedlicher Methoden die einzelnen Ensemblemitglieder gewichtet. Dies kann zum Beispiel in Abhängigkeit von den verwendeten globalen Klimamodellen geschehen. Wenn in einem Klimaprojektionsensemble sehr viele regionale Klimamodelle von einem GCM angetrieben wurden, andere GCM jedoch nur wenige Regionalmodelle angetrieben haben, kann die Gefahr bestehen, dass sich in dem gesamten Ensemble Trends des *einen* GCM zu stark durchpausen. Des Weiteren kann zum Beispiel mit Hilfe der Bayes'schen Mathematik die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, wie gut ein einzelnes Ensemblemitglied ein zu erwartendes Änderungssignal erreicht. In Abhängigkeit von dieser Wahrscheinlichkeit kann dem Ensemblemitglied

dann ebenfalls ein Gewicht zugeordnet werden (Déqué & Somot, 2010; Buser et al. 2010).

Zum anderen wird mit der Annahme, dass die Ensemblemitglieder statistisch unabhängig sind, für jede einzelne Projektion die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit angenommen (*one model, one vote*). Bei einem ausreichend großen Ensemble ist es unter dieser Annahme dann möglich, statistische Aussagen über zukünftige Klimazustände zu treffen (Rummukainen, 2010). Beim Deutschen Wetterdienst werden z. B. zurzeit durch die Bestimmung von Perzentilen Bandbreiten innerhalb des Ensembles berechnet, innerhalb derer ein bestimmtes Änderungssignal zu erwarten ist. Mit diesen Bandbreiten ist es dann möglich, robuste Aussagen zu Änderungskorridoren abzuleiten. Dieses Verfahren wurde auch in KLIWAS angewandt.

Allerdings muss auch bei diesem Ansatz bedacht werden, dass es ohne eine kritische Auswahl der Ensemblemitglieder zu einer zu großen Auffächerung der Verteilung der Ergebnisse kommen kann. Daher ist es zumindest erwägenswert, ‚unrealistische‘ Projektionen auszuschließen (Görgen et al., 2010). Um kritische Grenzen in der Klimafolgenforschung zu detektieren, empfiehlt es sich jedoch, auch Projektionen außerhalb definierter Unsicherheitsbereiche zu betrachten. Eine zu starke Reduktion des Ensembles bedeutet jeweils auch eine Reduktion der zu erwartenden Bandbreite.

Jedenfalls können nie sämtliche Einflüsse und Unsicherheiten innerhalb des Klimasystems berücksichtigt werden, ebenso können angenommene Voraussetzungen (wie zum Beispiel Emissionsszenarien) sich als nicht ausreichend haltbar herausstellen. Aus der Analyse von Klimaprojektionsensembles resultierende Bandbreiten klimatischer Änderungen müssen daher immer als Teilmenge der in der Natur möglichen Veränderungen interpretiert werden.

4 Methoden

4.1 Daten

Mit den Ergebnissen aus dem EU-FP6-Projekt "ENSEMBLES" liegt der derzeit größte Datensatz an Klimasimulationen basierend auf den SRES-Szenarien für Mitteleuropa vor (van der Linden und Mitchell, 2009). Im Rahmen dieses Projektes wurden mehrere Dutzend Klimasimulationen als transiente Läufe für die Zeiträume 1951-2050 bzw. 1951-2100 gerechnet. Weitere, insbesondere das Gebiet von Deutschland abdeckende Projektionen werden unter anderem auf der CERA-Datenbank des Deutschen Klimarechenzentrums bereitgestellt (Keuler et al., 2009a, b, c; Lautenschlager et al., 2009). Diese Klimaprojektionen liegen auf Tagesbasis in einer räumlichen Auflösung von 10 km x 10 km bis 25 km x 25 km vor. Regionale Klimamodellierungen, die eine gröbere Auflösung vorwiesen, sind wegen ihrer unzureichenden räumlichen Differenzierung nicht betrachtet worden.

Die Vielfalt des zusammengestellten Klimaprojektionsensembles ergibt sich aus der Kombination unterschiedlicher Emissionsszenarien, Global- und Regionalmodellen. Zusätzliche Einschränkungen des Ensembles basieren auf folgende Anforderungen des KLIWAS-Forschungsprogramms:

- Die Einschätzung zum Grad der Betroffenheit des Systems unter dem Klimawandel sollen sowohl für den jetzigen Zustand (1961-1990) als auch für die zukünftigen Zustände der nahen (2021-2050) und fernen Zukunft (2071-2100) getroffen werden
- Für eine Vergleichbarkeit der Analysen in den jeweiligen Flusseinzugsgebieten müssen die Klimaprojektionen das gesamte KLIWAS-Gebiet abdecken
- Um eine qualitativ hochwertige und damit sichere Aussage treffen zu können, soll das Klimaprojektionsensemble aus möglichst vielen Klimamodellsimulationen bestehen

Die Unsicherheiten, die sich aus der Klimamodellierung ergeben sowie die daraus abgeleiteten Spannbreiten in den Klimasignalen sollen möglichst von den Unsicherheiten, die sich aus unterschiedlichen sozio-ökonomischen Annahmen der verschiedenen Emissionsszenarien unterschieden werden.

Eine Vermischung dieser Unsicherheiten kann dadurch vermieden werden, dass ein Klimaprojektionsensemble lediglich aus einem Emissionsszenario gebildet wird.

Die meisten Projektionsrechnungen aus dem vorhandenen Gesamtensemble basieren auf dem SRES-Szenario A1B. Dieses Emissionsszenario zeichnet sich durch einen raschen Anstieg des Wirtschaftswachstums mit der Einführung neuer Technologien sowie einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen

Weltbevölkerung aus. Innerhalb der SRES-Szenarien stellt das A1B-Szenario ein mittleres Szenario dar (IPPC 2007).

Unter diesem Aspekt wurden die in der Tabelle 1 dargestellten 17 Modellkombinationen ausgewählt. Die Variablen Lufttemperatur in 2m Höhe, Niederschlag und Globalstrahlung aus den Projektionsläufen dieses Klimaprojektionsensembles wurden auf ein einheitliches 5 km x 5 km Gitter regionalisiert und bias-korrigiert.

Auf der Grundlage dieses 17er postprozessierten Klimaprojektionsensembles erfolgte im Anschluss eine statistische Auswertung möglicher zukünftiger Klimazustände für die Flusseinzugsgebiete I. Ordnung und II. Ordnung für die Flüsse Rhein, Donau und Elbe.

Tabelle 1: Übersicht der für KLIWAS verwendeten Klimaprojektionen.

Datenprozessierung KLIWAS 1.02	Institut	Förderung durch
ERA40_CLM2.4.6	ETHZ	EU-FP6 ENSEMBLES
ERA40_REMO5.7	MPI-M	EU-FP6 ENSEMBLES
ERA40_RM4.5	CNRM	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_BCM2_RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r1_CLM2.4.11	GKSS	BMBF
A1B_ECHAM5r3_RACMO2	KNMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_REMO5.7	MPI-M	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q0_CLM2.4.6	ETHZ	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q0_HadRM3Q0	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_RegCM3	ICTP	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q16_RCA3	C4I	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q3_RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r2_CLM2.4.11	GKSS	BMBF
A1B_ARPEGE_RM5.1	CNRM	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ARPEGE_HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_BCM2_HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q3_HadRM3Q3	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q16_HadRM3Q16	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES

Zur Modellevaluation wurden zusätzlich drei mit Reanalysedaten (ERA40) angetriebene Modellläufe prozessiert.

Sowohl für die verwendeten Originaldaten wie auch die in KLIWAS abgeleiteten Datensätze wurde ein Konzept zur Archivierung und Datenbereitstellung entwickelt. Damit soll ein behördenübergreifendes Datenmanagement, die Vereinheitlichung von Datensätzen und die zukünftige Datenbereitstellung sichergestellt werden.

4.2 Regionalisierung

Für die Erstellung anwendungsorientierter Klimaprojektionsdatensätze in KLIWAS wurden parameterabhängig verschiedene Regionalisierungsverfahren entwickelt, mit dem Ziel alle Datensätze in ein einheitlich räumlich hochaufgelöstes Gitter von 5 km x 5 km im Referenzsystem ETRS89-LCC (European Terrestrial Reference System 1989 - Lambert Conformal Conic map projection) zu erhalten. Die Ablage der Daten erfolgte in NetCDF (NETwork Common Data Format), ein in der Klimaforschung häufig benutztes binäres Datenformat.

Es wurden die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur in 2 m Höhe und Globalstrahlung prozessiert. Ihre jeweiligen Werte werden in Klimamodellen dem Gittermittelpunkt zugeordnet, stellen aber einen Mittelwert der gesamten Gitterbox dar. Aus diesem Grund werden nicht nur die Koordinaten der Gittermittelpunkte sondern auch die Eckpunkte der Gitterbox in das vorgegebene Koordinatensystem transformiert. Die hierfür benötigten Koordinatentransformationen sind zum Beispiel bei Doms und Schättler (2002), Annoni et al. (2003) oder Snyder (1987) beschrieben.

Nach diesem Prozess werden die verschiedenen Parameter unterschiedlich disaggregiert, d.h. ihre Gitterinformationen werden räumlich höher aufgelöst. Dazu wurden neue Verfahren im DWD entwickelt und unter den Namen DOWNIE (DOWnscaling von NIEderschlagssummen in Klimaprojektionen), DOWTEMP (DOWnscaling von LuftTEMPeratur in Klimaprojektionen) und DOWGLOB (DOWnscaling von GLOBalstrahlung in Klimaprojektionen) abgelegt.

Das DOWNIE-Verfahren nutzt für die Disaggregation der Niederschlagssummen eine multiple lineare Regression. Ferner enthält es Komponenten aus der REGNIE-Methode des Deutschen Wetterdienstes, welches für die Interpolation von Beobachtungsdatensätzen eingesetzt wird (Rauthe et al. 2013). Weitere Erläuterungen zum Verfahren findet sich bei Plagemann et al. (2014) wieder.

Die Methode der multiplen linearen Regression wird auch bei der Regionalisierung der Lufttemperatur angewandt. Hierbei wurde eine DWD-interne Regressionsroutine erweitert. Im Gegensatz zum DOWNIE-Verfahren, in dem lediglich Prädiktorvariablen aus dem digitalen Höhenmodell berücksichtigt werden, bestehen die Prädiktoren bei DOWTEMP zusätzlich aus Parametern verschiedener Druckflächenniveaus. Die potentiellen Prädiktoren und eine kurze Zusammenfassung des DOWTEMP-Verfahrens werden in Imbery et al. (2013) dargelegt.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Methoden, die auf statistische Verfahren beruhen, wurde bei der Disaggregation von Globalstrahlungsdaten ein semi-physikalischer Ansatz gewählt. Dadurch ist gewährleistet, dass die Abhängigkeiten der Globalstrahlung von z.B. der Wolkenbedeckung, der Lufttrübung, der Orografie sowie dem Sonnenstand mit einbezogen werden. Eine nähere Erläuterung des Verfahrens ist bei Imbery et al. (2013) zu finden.

4.3 Bias-Korrektur

Um modellinterne systematische Fehler zu korrigieren, wurde in diesem Projekt für sämtliche Variablen ein relativ einfaches lineares Korrekturverfahren (*Linear Scaling*) angewandt. Grundlage dieses Verfahrens ist ein Vergleich des Kontrollzeitraums (1961-1990) der Klimaprojektionen mit Referenzdaten. Hierfür wurden als Referenzdatensätze Monatsmittelwerte der Lufttemperatur bzw. mittlere Monatssummen des Niederschlags für den Zeitraum 1961-1990 aus den HYRAS-Rasterdatensätzen (Rauthe et al, 2012, 2013, Frick et al. 2014) abgeleitet. Diese Daten liegen auf dem gleichen räumlichen Gitter vor wie die regionalisierten Projektionsdaten. Für die Globalstrahlung wurden Monatsmittelwerte aus einem abgeleiteten Fernerkundungsprodukt des Deutschen Wetterdienstes (CM-SAF Surface Radiation MVIRI Data Set 1.0; Posselt et al. 2001) verwendet.

Für die Variable Lufttemperatur wurde für jeden Gitterpunkt der Bias

$$bias = R_j^i - C_j^i$$

mit R für die Referenzdaten und C dem Kontrollzeitraum der Klimaprojektionsdaten in der Gitterzelle i im Monat j berechnet. Die Korrektur wurde mit

$$T_a^* = T_a - bias$$

durchgeführt, wobei T_a^* für den Tagesmittelwert der korrigierten Lufttemperatur der jeweiligen Gitterzelle steht.

Für den Niederschlag und die Globalstrahlung wurde ein Quotientenansatz,

$$P^* = f \cdot P,$$

angewandt. Dabei repräsentiert P die Tagesniederschlagssumme, P^* die korrigierten Werte der Niederschlagssumme und f den Skalierungsfaktor mit

$$f = R_j^i \cdot (C_j^i)^{-1}.$$

Analog wurde die Korrektur für die Globalstrahlung durchgeführt.

Der Vorteil des Linear Scaling-Ansatzes ist eine genaue Übereinstimmung der gemittelten Größen der korrigierten Klimaprojektionsdaten und den Referenzdaten für den Kontrollzeitraum (z.B. Monatsmittelwerte der Lufttemperatur pro Gitterzelle oder Jahressummen des Niederschlags für ein Einzugsgebiet). Da bei diesem Verfahren

ein Korrekturfaktor pro Monat und Gitterzelle bestimmt wird, ist es allerdings nicht möglich, verteilungsabhängig zu korrigieren. Viele Klimamodelle über- oder unterschätzen aber insbesondere die Extrema verschiedener Variablen, wie zum Beispiel Starkniederschläge (Thiemeßl et al., 2012).

Ein Korrekturverfahren, das die Verteilung von Klimaprojektionen an die der Referenzdaten anpasst, ist das Quantile Mapping (Hashino et al 2007, Piani et al. 2010). Während das Linear Scaling die mittleren Niederschlagssummen gut für das jeweilige Untersuchungsgebiet reproduzieren kann, hat das Empirische Quantile Mapping den Vorteil, die statistischen Eigenschaften des Niederschlags (z. B. Häufigkeiten von Starkniederschlägen) aus den Referenzdaten auf die Projektionsdaten zu übertragen.

Dieses Verfahren wurde im Rahmen von KLIWAS als weiteres Korrekturverfahren auf die projizierten Niederschlagsdaten angewandt.

Hierbei werden empirisch bestimmte Verteilungsfunktionen für beobachtete Daten (F_o) und Projektionsdaten (F_s) für jede Gitterzelle (i) mit

$$P^{*i} = [F_o^{-1} F_s](P^i),$$

berechnet.

Ereignisse mit sehr starken Niederschlägen (> 20mm pro Tag) sind allerdings in den Referenz- und Projektionsdaten in den meisten Fällen nicht ausreichend repräsentiert, um eine ausreichend große Datenmenge zu erhalten für diesen Bereich der Verteilungsfunktionen. Daher wurde das hier entwickelte Quantile Mapping nur bis zu Niederschlagssummen von 20mm durchgeführt, höhere Werte wurden nicht korrigiert.

Im Rahmen von KLIWAS wurde für die Korrektur des Niederschlags ein weiteres Korrekturverfahren entwickelt. Dieses basiert auf dem oben beschriebenen Linear Scaling. Allerdings wurden die Korrekturfaktoren nicht aus den Monatsmittelwerten, sondern pro Wetterlagenklasse und hydrologischem Halbjahr berechnet (Frick et al. 2014). Da für dieses wetterlagenbasierte Bias-Korrekturverfahren noch weiterer Entwicklungsbedarf besteht, wurden die so korrigierten Projektionsdaten nicht in die KLIWAS-Datenversorgung aufgenommen.

4.4 Ensembleauswertung

Aus den in Kapitel 3 genannten Gründen vertraut KLIWAS nicht auf die Ergebnisse eines einzelnen Klimamodelllaufs, sondern untersucht mit einer möglichst großen Anzahl von Klimaprojektionen die Spannbreiten möglicher zukünftiger Klimazustände. Aus diesen Spannbreiten werden in einem zweiten Schritt die wahrscheinlichsten Änderungsraten relevanter Parameter abgeleitet.

Es bietet sich an, verschiedene Modelle miteinander zu kombinieren und die aus den verschiedenen Kopplungen entstehenden Bandbreiten zu bestimmen. Dabei ist darauf zu achten, dass ein möglichst breites Spektrum an Kombinationsmöglichkeiten zwi-

schen den einzelnen Modellen abgedeckt wird, um die aus den verschiedenen Kombinationen resultierende Variabilität vollständig abbilden zu können und zu verhindern, dass mit einer Übergewichtung einzelner Modelle falsche Trends bestimmt werden.

Für die Auswertung des definierten Ensembles von Klimaprojektionen wurden die Änderungssignale für eine "nahe" (2021-2050) und eine "ferne" (2071-2100) Zukunft, jeweils relativ zu der Referenzperiode 1961-1990, analysiert. Die Modellergebnisse können pro Gitterzelle mathematisch aufsteigend sortiert werden. Kleinere Werte werden immer dem kleineren Perzentil zugeordnet, größere Werte immer dem größeren Perzentil.

Somit können in Kartendarstellungen zur Angabe von Spannbreiten jeweils die Isolinien der Änderung der betrachteten Größe für die 15., 50. und 85. Perzentil dargestellt werden. Im Einzelnen sind diese Perzentile wie folgt zu interpretieren:

- 15. Perzentil: 85% der Projektionen projizieren höhere und 15% die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten.
- 85. Perzentil: 85% des Ensembles projizieren die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten und 15% prognostizieren höhere Änderungsraten.
- 50. Perzentil: Median der 17 Klimaprojektionen als ein "mittleres Änderungssignal bzgl. des betrachteten Ensembles".

Der Bereich zwischen den gewählten unteren und oberen Schwellwerten umfasst somit 70% bzgl. des betrachteten Ensembles.

5 Durchgeführte Arbeiten

Akquise und Speicherung von Klimaprojektionszeitreihen:

- Überführung von Klimaprojektionsdaten aus der Datenbank des EU-FP6-Projekts ENSEMBLES, der CERA-Datenbank sowie aller bei der BfG vorhandenen und lizenzrechtlich verfügbaren Klimasimulationen auf den DWD-internen Archivserver
- Konzeptentwicklung und Erstellung von ProgrammROUTINEN zur Archivierung der Original- und postprozessierten Datensätze in der DWD-internen OMO-Datenbank
- Speicherung der vorhandenen Klimaprojektionsdaten in der OMO-Datenbank

Parameterabhängige (Weiter-) Entwicklung verwendeter Regionalisierungsverfahren (siehe Imbery et al. 2013, Plagemann et al. 2014):

- Homogenisierung der Daten auf das Koordinatenreferenzsystem ETRS89-LCC
- Anpassung des für die Messdaten entwickelte Regionalisierungsverfahrens REGNIE an die Niederschlagsdaten der Klimasimulationen sowie dessen Weiterentwicklung zu DOWNIE
- Programmentwicklung des DOWTEMP-Verfahrens zur Disaggregation der Lufttemperatur in Klimasimulationen durch Integration von im DWD entwickelten RegressionsROUTINEN
- Programmentwicklung des DOWGLOB-Verfahrens zur Disaggregation der Globalstrahlung in Klimasimulationen
- Programmentwicklung des DOWREF-Verfahrens zur Disaggregation der relativen Feuchte in Klimasimulationen durch Integration der DWD-internen RegressionsROUTINEN von Dr. Thomas Deutschländer
- Erstellung von ProgrammROUTINEN zum Einlesen, Bearbeiten und Auslesen von NetCDF-Dateien für die Homogenisierung der Datenformate von Klimasimulationen

Parameterabhängige (Weiter-) Entwicklung von Biaskorrekturverfahren (siehe Imbery et al. 2013, Plagemann et al. 2014):

- Quantifizierung des Modellbias regionaler Klimamodelle; Berechnen von Abweichungen zwischen simulierter und beobachteter Klimaparameter
- Entwicklung und Anwendung von Biaskorrektur-Verfahren:
 - Niederschlag: Linear Scaling und Quantile Mapping
 - Lufttemperatur: Linear Scaling
 - Globalstrahlung: Linear Scaling

Evaluierung der Simulationsgüte der Klimamodelle (siehe Imbery et al. 2013, Plagemann et al. 2014):

- Entwicklung und Anwendung von ProgrammROUTINEN zur Bestimmung von statistischen Kennzahlen zur parameterabhängigen Analyse der Güte von postprozessierten Klimaprojektionen.

Auswertung des Klimaprojektionsensembles:

- Entwicklung von Auswertemethoden von Klimaprojektionsensembles, hier insbesondere Perzentilauswertungen und ihre Darstellungsmöglichkeiten.

Datenbereitstellung:

- Implementierung der Metadateninformationen der im Projekt 1.02 produzierten Datensätze in WebWerdis (<http://werdis.dwd.de/>), GISC (<https://gisc.dwd.de/>) und CDC (<http://cdc.dwd.de/catalogue/>) des Deutschen Wetterdienstes sowie Konzeptentwicklung einer Datenabfrage über WebWerdis
- Konzeptentwicklung der Datenversionierung und Namenskonvention bezüglich des Behördenübergreifenden Datenmanagements (Keßler 2012)

6 Vernetzung des Projektes, Kooperationspartner

Tabelle 2: Projekt 1.02 - Kooperationen und Aufträge

Kooperationspartner/ Auftragnehmer	Kurztitel	Ansprech- partner
Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellie- rung	Verbesserung Bias-Korrekturmethode; Entwicklung eines Kernschätzers zur Verbesserung des Quantile Mappings (Bias-Korrekturmethode)	Dr. Jochen Sei- del
Universität Bonn, Mete- orologisches Institut	Kooperation Methoden zur Analyse von Klimaprojekti- onen	Dr. Christian Ohlwein
Universität Frankfurt, Meteorologisches Insti- tut	Kooperation zum Austausch von Methoden zur Aufbe- reitung und Transfer von Klimaprojektionen	Prof. Bodo Ahrens
Deutscher Wetterdienst, Abteilung Technische Infrastruktur und Betrieb	Umsetzung des Konzepts zur Datenabfrage unter WebWerdis	Dr. Siegfried Fechner

Im Rahmen des Ressortforschungsprogramm KLIWAS fand für das Projekt 1.02 ein kontinuierlicher Daten- und Informationsaustausch mit dem Projekt 1.01 (Flussgebietsbezogene hydrometeorologische Referenzdaten) und dem Projekt 1.03 (Referenzdaten und Klimaprojektionen für Küste und See) innerhalb des DWD statt. Eingeschlossen sind sowohl die Bereitstellung von Programmroutinen und Referenzdaten durch PJ 1.01 (Frick et al. 2014), wie auch die gemeinsame Weiterentwicklung von Biaskorrektur- und Regionalisierungsverfahren.

Des Weiteren bestand ein reger Austausch mit dem Projekt 2.02 (Rezente Krustenbewegungen und Validierung von Klimaprojektionen zu Wasserstandsänderungen an den Küsten) bezüglich der Koordinatentransformationen von den Koordinatensystemen (z.B. rotiertes Gitter auf der Kugel) der einzelnen Regionalmodelle zu dem im Forschungsprogramm geforderten Koordinatensystem ETRS89-LCC.

Hervorzuheben ist die Zusammenarbeit mit Projekt 4.01 (Wasserhaushalt, Wasserstand und Transportkapazität), die bestehende Datensätze von Klimaprojektionsdaten zur Verfügung gestellt haben. Darüber hinaus fanden mit Projekt 4.01 halb- bis vierteljährliche Arbeitstreffen statt, auf denen der Arbeitsstand der jeweiligen Projekte kommuniziert und gemeinsame Arbeitsziele diskutiert und festgelegt wurden. Zum Vorhaben „Regionalisierte Klimaprojektionen - Wirken und Nutzen auf hydrologische Systeme“ konnte das Projekt 4.01 mit 17 aufbereiteten Klimaprojektionsläufen (regionalisiert und linear bias-korrigiert) beliefert werden. Diese Daten wurden von Projekt 4.01 als Eingabedatensatz für hochaufgelöste Wasserhaushaltsmodelle benutzt und ausgewertet (Nilson et al. 2014).

Projekt 5.01 (Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente) erhielt im Jahr 2010 erste regionalisierte und linear biaskorrigierte Klimamodellsimulationen (Hillebrand et al. 2014). Dies geschah in einem iterativen Prozess, in dem gemeinsam die Auswahl der verwendeten Klimamodelle, räumliche und zeitliche Auflösung der Daten und statistische Kennwerte für die weitere Arbeit festgelegt und umgesetzt werden konnte. Im Jahr 2012 wurde dieses Teil-Ensemble auf 6 Klimaprojektionen erweitert.

Für das Projekt 5.02 (Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen) sowie für Projekt 3.08 (Einfluss von klimabedingt veränderten Stoffeinträgen und Oberwasserabflüssen auf die Sauerstoffgehalte der Nordsee-Ästuare –Folgen für die Sedimentbewirtschaftung) konnten zum einen aufbereitete Beobachtungsdaten für verschiedene deutsche Klimastationen und zum anderen 6 verschiedene Klimaprojektionen bereitgestellt werden (Hardenbicker et al. 2014, Hein et al. 2014).

Validierung und
Bewertung von
Klimaprojektionen -
Bereitstellung von
Klimaszenarien für
den Binnenbereich

7 Ergebnisse

7.1 Erreichter methodisch-wissenschaftlicher Fortschritt

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf einem Ensemble von 17 regionalisierten und bias-korrigierten Klimaprojektionen, die auf der Grundlage des SRES-Szenario A1B berechnet wurden. Dieses Multimodellensemble besteht aus Kombinationen von sechs globalen und acht regionalen Klimamodellen. Entsprechend der Vereinbarungen innerhalb des Ressortforschungsprogramms KLIWAS wurde die Auswertung möglicher zukünftiger klimatischer Zustände für eine ‚nahe Zukunft‘ (2021-2050) und eine ‚ferne Zukunft‘ (2071-2100) durchgeführt. Änderungssignale von Klimaparametern und abgeleiteten Indizes wurden relativ zu dem Kontrollzeitraum 1961-1990 bestimmt.

Die Güte der aufbereiteten Klimaprojektionen wurde durch den Vergleich mit aus Messwerten abgeleiteten Rasterdaten (HYRAS-Datensatz; Frick et al. 2014) des Projekts 1.01 bestimmt.

Um neben der Änderungssignale auch die Spannbreiten möglicher zukünftiger Klimazustände bestimmen zu können, wurden Perzentilauswertungen entwickelt, mit Hilfe derer sowohl Kartendarstellungen für das Untersuchungsgebiet möglich sind wie auch Auswertungen für wasserwirtschaftlich relevante Raumausschnitte.

Die aufbereiteten Klimaprojektionen sowie deren statistische Auswertungen hydro-meteorologischer Kennwerte stellen ein wichtiges Instrument zur Auswertung möglicher Änderungen des Wasserhaushalts in Mitteleuropa dar und bilden die Arbeitsgrundlage für nachgeschaltete Wirkmodelle wie auch die Entwicklung von Anpassungsstrategien.

7.2 Evaluation der aufbereiteten Klimaprojektionen

Um die Güte der aufbereiteten Klimaprojektionen evaluieren zu können, wurde untersucht, wie gut diese sowohl die mittleren Zustände wie auch die typische Verteilung von Extremwerten verschiedener Klimaparameter in Abhängigkeit von Raum und Zeit darstellen können. Dazu wurden abgeleitete Indizes und Metriken der Projektionsläufe für die Vergangenheit (1961-1990) mit Referenzdaten aus abgeleiteten Messwerten verglichen. Dabei wurde ein Schwerpunkt auf hydrometeorologische Kennwerte gelegt.

In Abbildung 2 sind die relativen Abweichungen der aufbereiteten Klimaprojektionen von den HYRAS-PRE-Niederschlagsfeldern (Rauthe et al. 2013) für verschiedene Klimaindizes dargestellt. Diese Indizes wurden für die Einzugsgebiete Rhein, Elbe

und Donau, jeweils für die Sommer- (JJA) und Wintermonate (DJF) aggregiert. Für die unterschiedlichen Klimaindizes sind die Absolutwerte aus den Referenzdaten (HYRAS-PRE) angegeben sowie die mittlere prozentuale Abweichung der aufbereiteten Klimaprojektionen zu den gerasterten Daten von HYRAS-PRE. Für jedes regionale Klimamodell finden sich zwei Zeilen, in diesen sind die Abweichungen der mit dem Linear-Scaling-Verfahren korrigierten (ls) und mit dem Quantile-Mapping-Verfahren korrigierten (qm) Daten dargestellt.

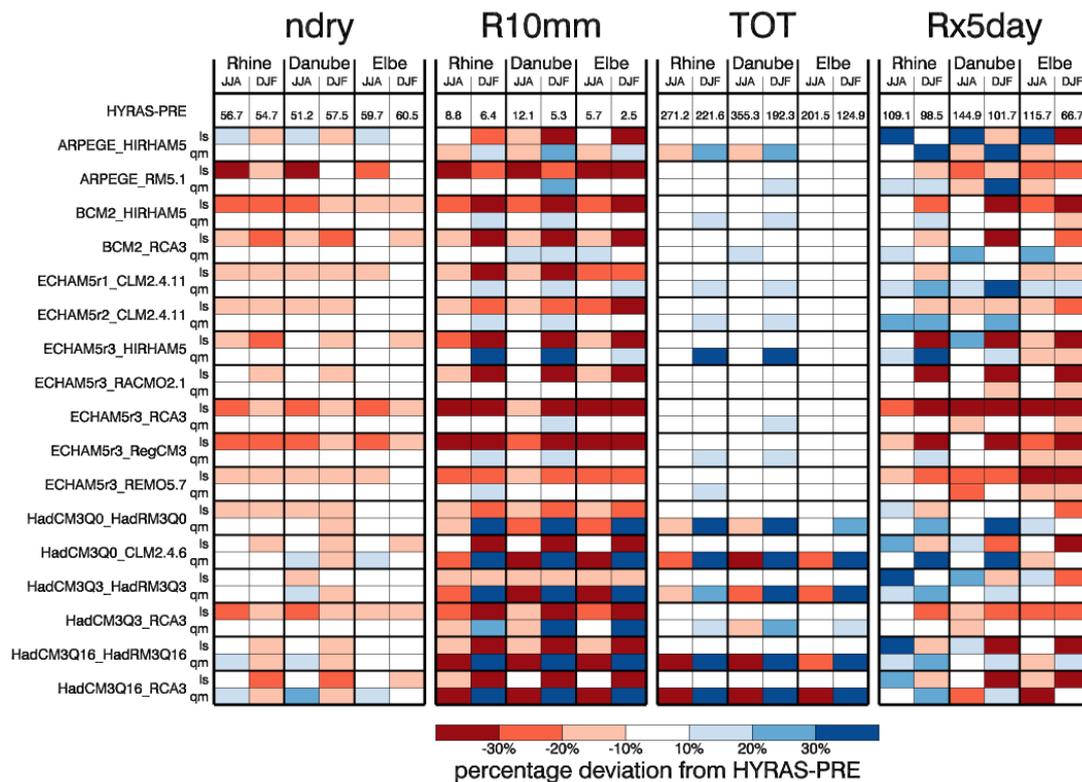


Abbildung 2: Gemittelte prozentuale Abweichungen der aufbereiteten Klimaprojektionen von den HYRAS-PRE-Referenzdaten für verschiedene Klimaindizes für die Einzugsgebiete Elbe, Rhein (Rhine) und Donau (Danube), jeweils für die Winter- (DJF) und Sommermonate (JJA).

Die mit dem Linear-Scaling-Verfahren korrigierten Projektionen treffen für die untersuchten Flusseinzugsgebiete sehr gut die mittleren Niederschlagssummen pro Jahreszeit (TOT) der Referenzdaten, dies gilt mit Einschränkungen auch für das Quantile Mapping. Lediglich die mit dem globalen Klimamodell HadCM3Qx angetriebenen Läufe weisen Abweichungen zum Teil über 30 % auf.

Die mittlere Anzahl von Tagen mit mehr als 10 mm Niederschlag pro Jahreszeit (R10mm) wird mit beiden Verfahren nicht gut wiedergegeben. Dies lässt sich bei den mit dem Quantile-Mapping-Verfahren korrigierten Daten dadurch erklären, dass Niederschlagstagesummen über 20 mm nicht korrigiert wurden (siehe auch Kapitel 4.3). Lediglich für die mit BCM2 und ECHAM5rx angetriebenen Läufe werden mit diesem Verfahren gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt.

Die mit dem Quantile-Mapping-Verfahren korrigierten Projektionen (wiederum mit Ausnahme der HadCM3Qx angetriebenen Läufe) reproduzieren sehr gut die mittlere Anzahl trockener Tage (ndry).

Beide Korrekturverfahren können die maximale Fünftagesumme des Niederschlags (RX5day) nicht gut wiedergeben, wobei hier eine sehr starke Heterogenität sowohl zwischen den einzelnen Flusseinzugsgebieten wie auch zwischen den Auswertungen für die Winter- und Sommermonate auffällt.

Um die statistischen räumlichen Eigenschaften von Klimaprojektionen im Vergleich zu Referenzdaten darzustellen, wurden Taylordiagramme verwendet.

Für die betrachtete Größe (hier: 95. Perzentil des Niederschlags als Kenngröße für extreme Starkniederschläge) werden die Standardabweichungen und mittlere quadratische Abweichungen jeder Projektion mit den HYRAS-PRE-Referenzdaten verglichen sowie der räumliche Korrelationskoeffizient zwischen Projektion und Referenz bestimmt und diese Werte in einem dreidimensionalen Diagramm abgebildet. Die Korrelationskoeffizienten sind an der gekrümmten Achse aufgetragen, die Abstände der mittleren quadratischen Fehler werden durch die gepunkteten Linien dargestellt, und je näher ein Symbol an der gestrichelten Linie in dem Diagramm ist, desto höher ist die Übereinstimmung der normierten Standardabweichung zwischen Projektion und Referenzdaten. Das bedeutet, je näher ein Symbol der x-Achse und der gestrichelten Linie ist, desto besser die Übereinstimmung der statistischen Eigenschaften der durch das Symbol dargestellten Projektion mit den Referenzdaten.

In den Abbildungen 3 bis 5 wird das 95. Perzentil des Niederschlags für die 17 Klimaprojektionen des KLIWAS-Ensembles für die Einzugsgebiete Elbe, Rhein und Donau sowohl als unkorrigierte Daten (Kreise), mit dem Linear Scaling (Dreiecke) und mit dem Quantile Mapping (Raute) korrigierten Daten im Vergleich zum HYRAS-PRE-Niederschlagsdatensatz abgebildet. Die verschiedenen Farben repräsentieren die unterschiedlichen Klimaprojektionen.

Sowohl für die Sommermonate (oberes Diagramm) wie auch für die Wintermonate ist eine deutliche Verbesserung durch beide Korrekturverfahren gegenüber den unkorrigierten Daten zu erkennen. Die Übereinstimmung mit der Beobachtung („observed“) ist in den Wintermonaten allerdings bedeutend besser als in den Sommermonaten. In Mitteleuropa sind in den Sommermonaten in der Regel aufgrund konvektiver Ereignisse höhere extreme Starkniederschlagswerte zu erwarten wie in den Wintermonaten. Diese können weder durch die Klimaprojektionen ausreichend gut reproduziert noch durch die angewandten Korrekturverfahren an die gemessenen Werte herangeführt werden. Ungeachtet dessen schneidet bei diesem Index das Verfahren des Linear Scalings besser als das Quantile Mapping ab, was darauf zurückzuführen ist, dass die Niederschlagstagesummen über 20 mm mit dem Quantile Mapping nicht korrigiert wurden.

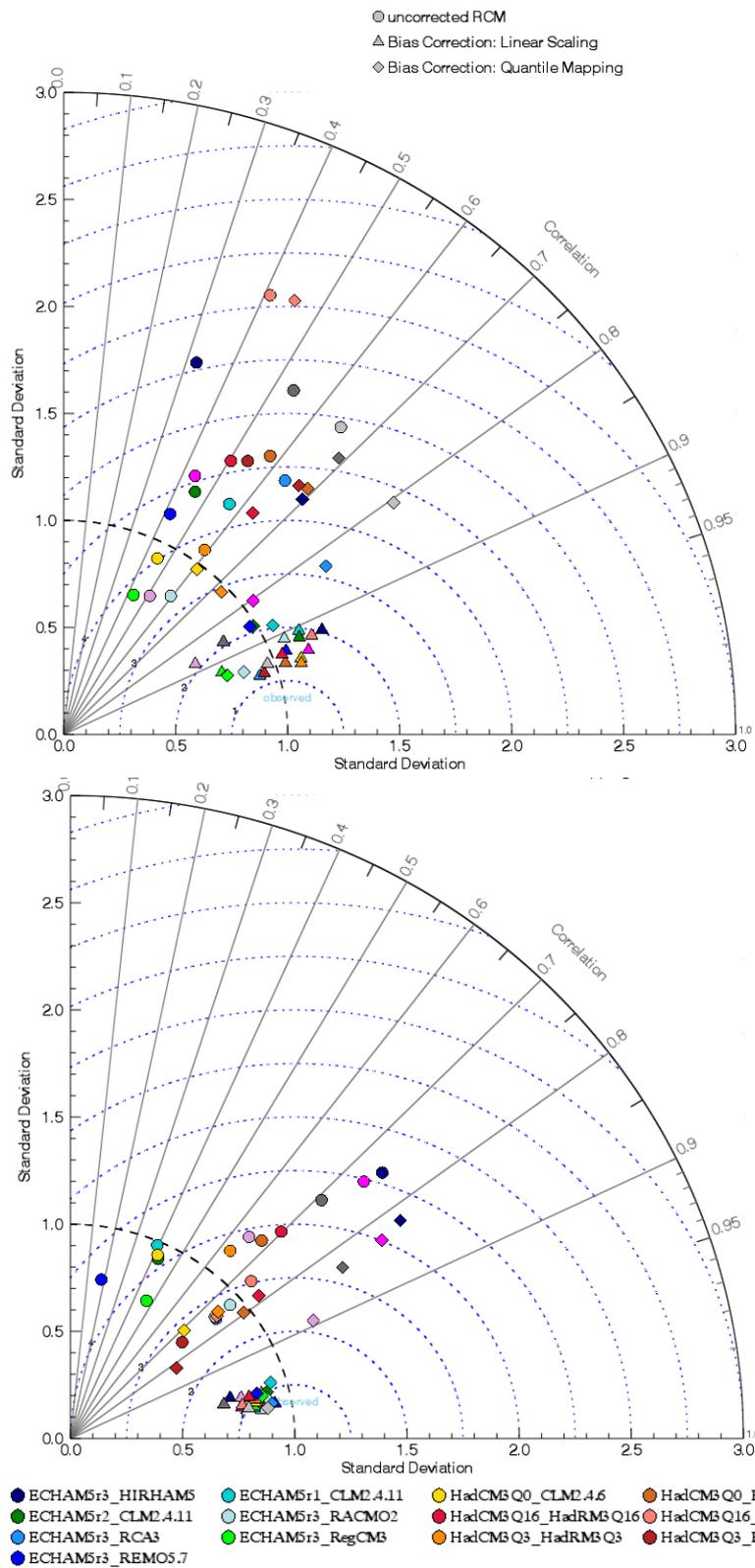


Abbildung 3: Taylordiagramme der 95. Perzentile des Niederschlags für 17 Klimaprojektionen für das Einzugsgebiet der Elbe in den Sommermonaten (oben) und Wintermonaten (unten).

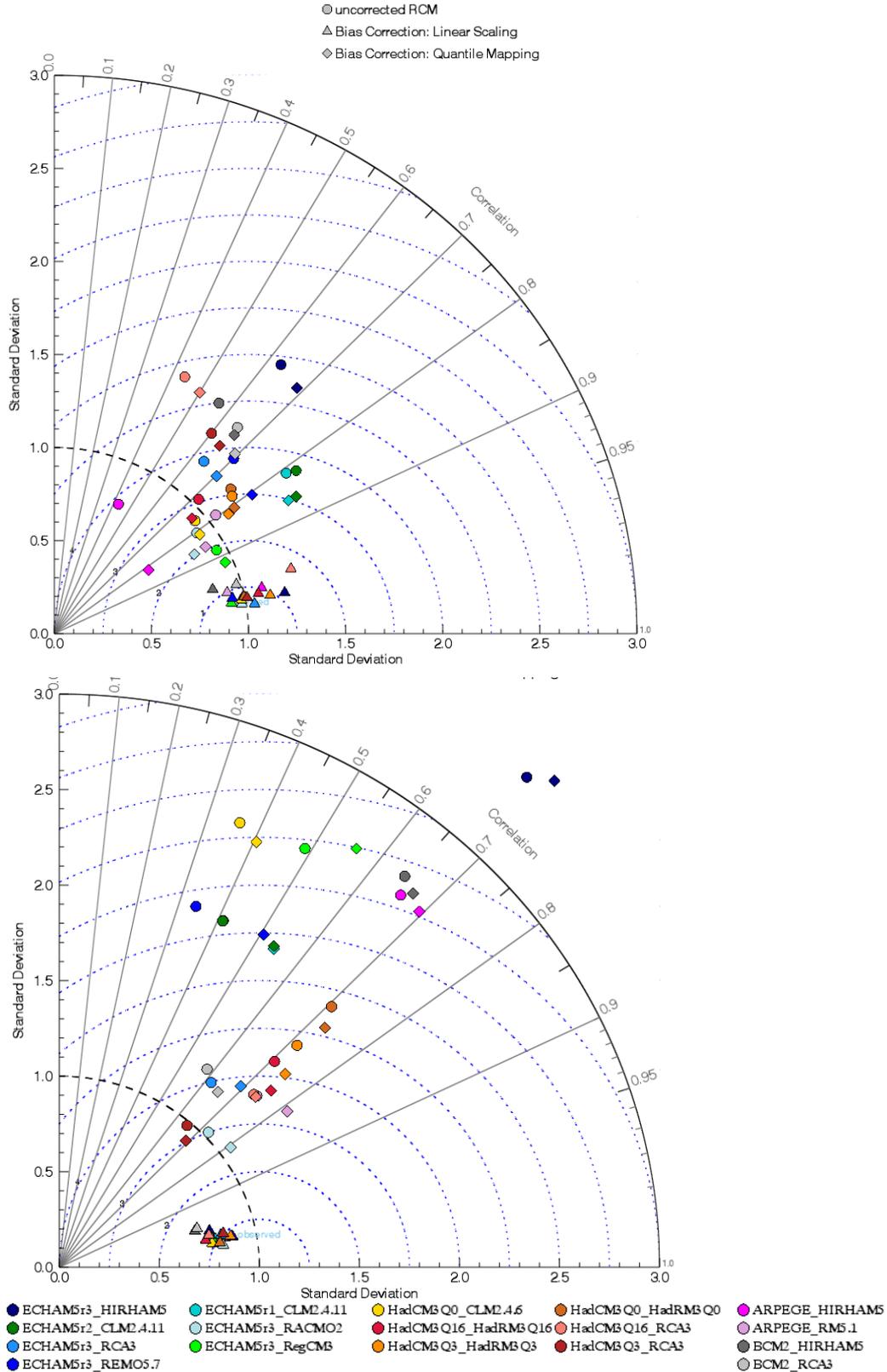


Abbildung 4: Taylor diagramme der 95. Perzentile des Niederschlags für 17 Klimaprojektionen für das Einzugsgebiet des Rheins in den Sommermonaten (oben) und Wintermonaten (unten).

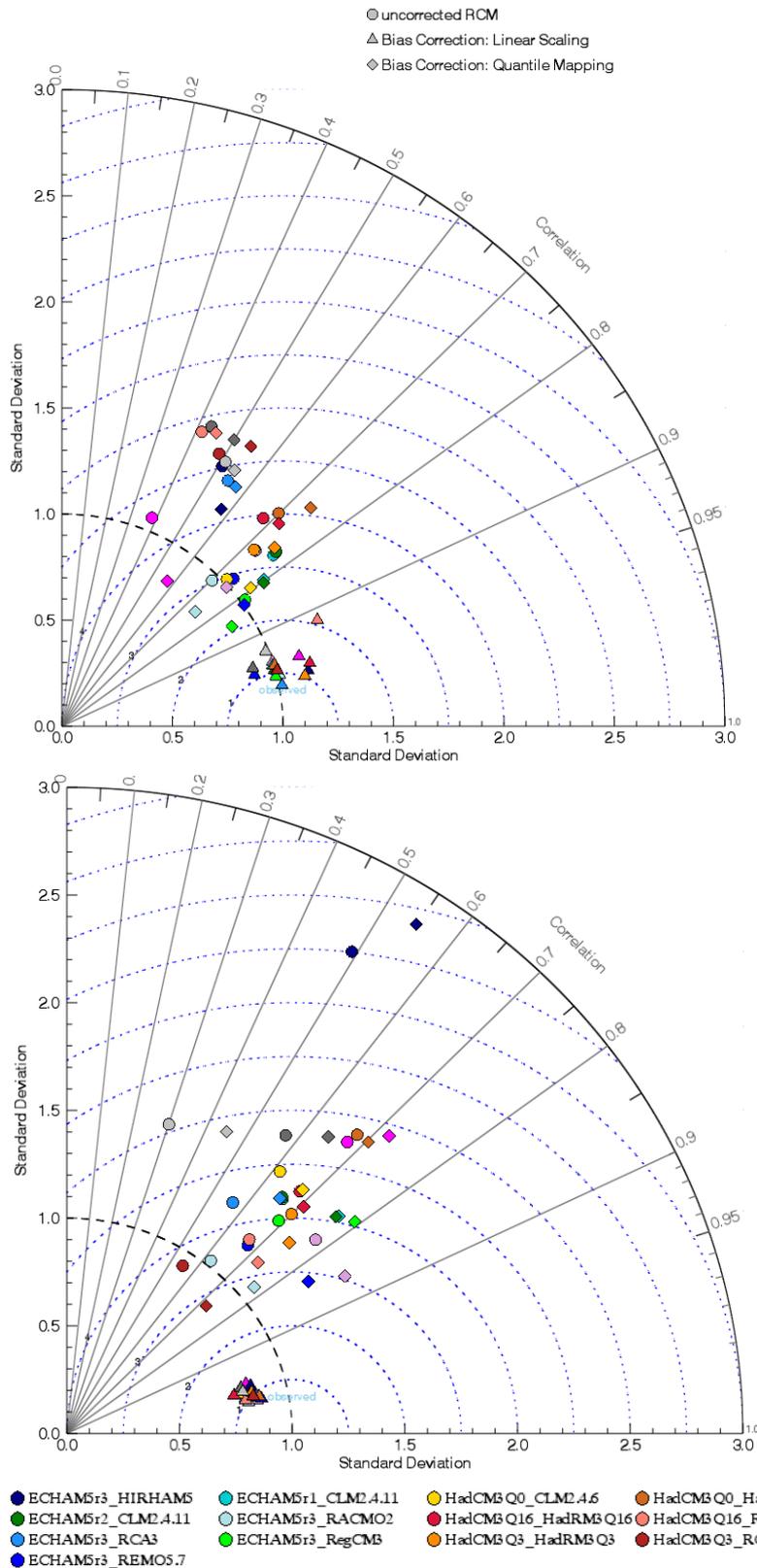


Abbildung 5: Taylordiagramm der 95. Perzentile des Niederschlags für 17 Klimaprojektionen für das Einzugsgebiet der Donau in den Sommer- (oben) und Wintermonaten (unten)

7.3 Kernaussagen zu den Ergebnissen

7.3.1 Aussagen für das gesamte Untersuchungsgebiet

In den Abbildungen 6 bis 10 sind zur Angabe der Spannbreiten der zu erwarteten Änderungen jeweils die Isolinien der Änderung des Jahresmittels der Lufttemperatur, der mittleren Niederschlagssumme im Sommer und Winter, der Globalstrahlung sowie der Kennzahl "Heiße Tage" für das 15. und 85. Perzentil dargestellt. Dabei beziehen sich die Änderungen der nahen (2021-2050) bzw. fernen (2071-2100) Zukunft auf den Referenzzeitraum 1961-1990.

Der Bereich zwischen den gewählten unteren und oberen Schwellwerten umfasst 70% des betrachteten Ensembles und kann als ‚stabiles‘ Signal des Klimaprojektionsensemble ohne Berücksichtigung statistischer Ausreißer beschrieben werden.

Niederschläge

Durch die Ensembleauswertungen der Klimasimulationen zeichnet sich in den Trends für die nahe Zukunft kein eindeutiges Signal ab. Die projizierten relativen Änderungen der mittleren Niederschläge weisen eine sehr geringe Zunahme von bis zu 15 % (größtenteils im nordöstlichen KLIWAS-Gebiet) bis zu einer Abnahme von 25 % (im Elsass für den Sommer und im Alpenraum für den Winter) auf (Abb. 6). Im Gegensatz dazu zeigt sich für die ferne Zukunft eine Tendenz zur Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten, während in den Wintermonaten eine Niederschlagszunahme wahrscheinlich ist (Abb.7).

Lufttemperatur

Für die Änderung des Jahresmittels der Lufttemperatur für den Zeitraum 2021 bis 2050 ist für Deutschland eine Zunahme von mindestens 0,5 °C wahrscheinlich. Dabei ist eine Temperaturzunahme um mehr als 2 °C (Norddeutschland) bzw. 2,5 °C (Süddeutschland) jedoch eher unwahrscheinlich (Abb.8 oben). Für den Zeitraum 2071 bis 2100 kann eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von mindestens 1,5 °C und maximal 3,5 °C in Norddeutschland bzw. 5 °C in Süddeutschland als wahrscheinlich angesehen werden (Abb. 8 unten).

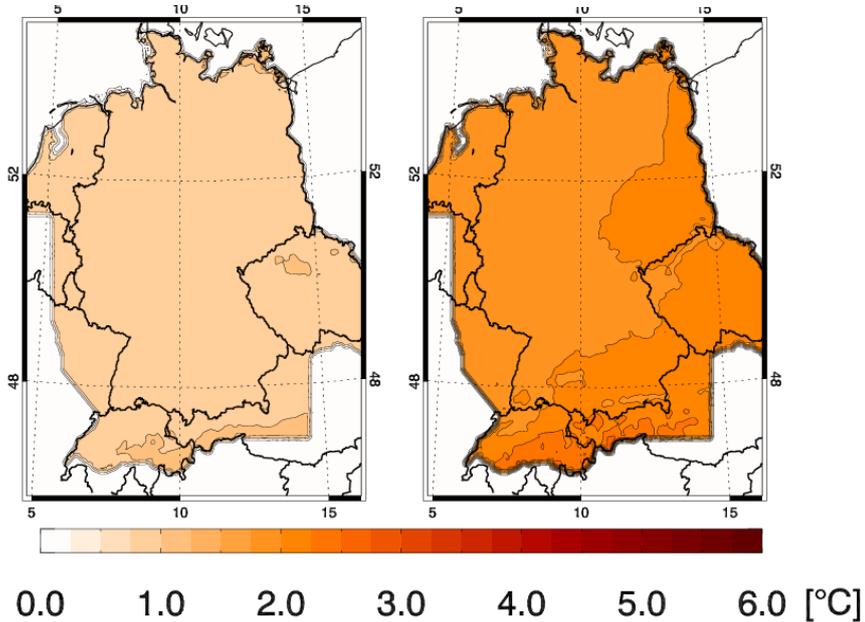
Globalstrahlung

Die mittleren Werte der Globalstrahlung werden sich bis zur Mitte des Jahrhunderts wenig ändern. Für das Ende des Jahrhunderts kann von einer Abnahme der Globalstrahlungswerte in den Wintermonaten um 5 % bis 20 % und in den Sommermonaten bis zu 10 % in Norddeutschland sowie mit einer leichten Zunahme im Sommer von maximal 15 % in Süddeutschland ausgegangen werden (Abb. 9). Dies kann analog zu den Änderungen des Niederschlags und den damit einhergehenden Änderung der Wolkenbedeckung interpretiert werden.

2021-2050

15^{tes} Perzentil

85^{tes} Perzentil



2071-2100

15^{tes} Perzentil

85^{tes} Perzentil

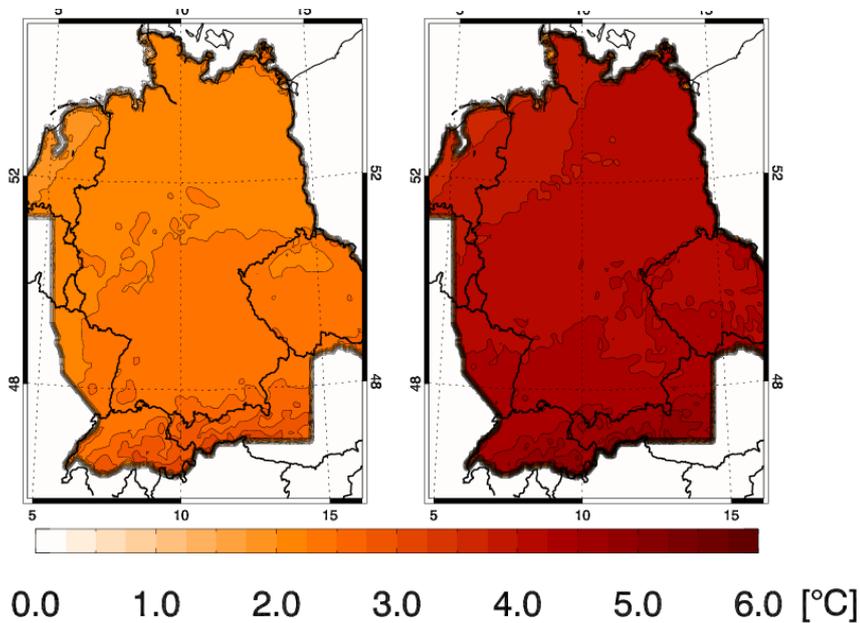


Abbildung 8: Projizierte Änderung des Jahresmittels der Lufttemperatur, Mittel über die Projektionszeiträume 2021-2050 (oben) und 2071-2100 (unten)

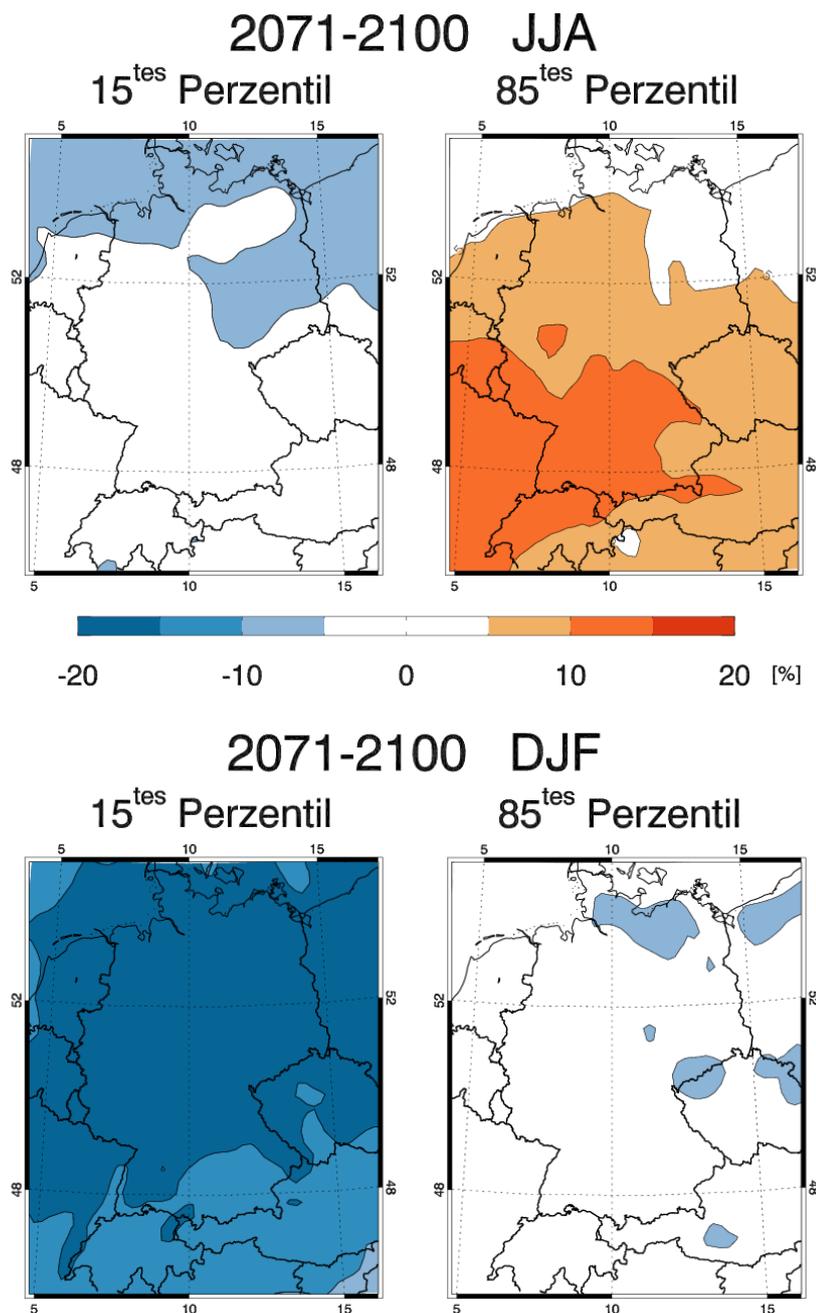


Abbildung 9: Projizierte Änderung des Jahresmittels der Globalstrahlung, Mittel über den Projektionszeitraum 2071-2100 für die Sommermonate (JJA, oben) und Wintermonate (DJF, unten)

Besondere Bedeutung bei der Frage nach den Folgen des Klimawandels kommt der Untersuchung von extremen Witterungsbedingungen zu. Viele Bereiche unserer Gesellschaft weisen eine große Vulnerabilität gegenüber Wetterextremen und ihren unmittelbaren Folgen auf. Für die im Rahmen von KLIWAS gestellten Fragestellungen ist es von beträchtlichem Nutzen, Einschätzungen über die zukünftig zu erwartenden Änderungen von Wetterextremen zu erlangen. Entsprechend wurde in Projekt 1.02 ebenfalls untersucht, inwieweit sich Häufigkeit und Intensität von Trocken- und Hit-

zeperioden oder Perioden langanhaltender Niederschläge in Folge des Klimawandels ändern könnten.

Aus den Referenz- und Klimasimulationsdaten können auch Kennwerte wie „Heiße Tage“ und „Eistage“ mithilfe der Temperaturtagesmaxima berechnet werden. Unter der Annahme eines mittleren Tagesgangs wurden Maxima bei den Beobachtungsdaten abgeschätzt. Die Kennzahl "Heiße Tage" stellt z. B. mit einer Auszählung der Tage mit mindestens 30°C eine Maßzahl für ein "extremes Wetter" dar. Sowohl für den Zeitraum 2021 bis 2050 wie auch von 2071 bis 2100 ist es wahrscheinlich, dass die Anzahl "Heiße Tage" zunehmen wird (Abb. 10). Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist es dabei wahrscheinlich, dass eine Zunahme um 5 bis 10 "Heiße Tage" in Norddeutschland bzw. 10 bis 15 "Heiße Tage" in Süddeutschland nicht überschritten wird. Für das Ende des Jahrhunderts ist eine maximale Zunahme der "Heißen Tage" um 10 bis 15 Tage (Norddeutschland) bzw. 30 bis 35 Tage (Südwestdeutschland) zu erwarten.

Validierung und
Bewertung von
Klimaprojektionen -
Bereitstellung von
Klimaszenarien für
den Binnenbereich

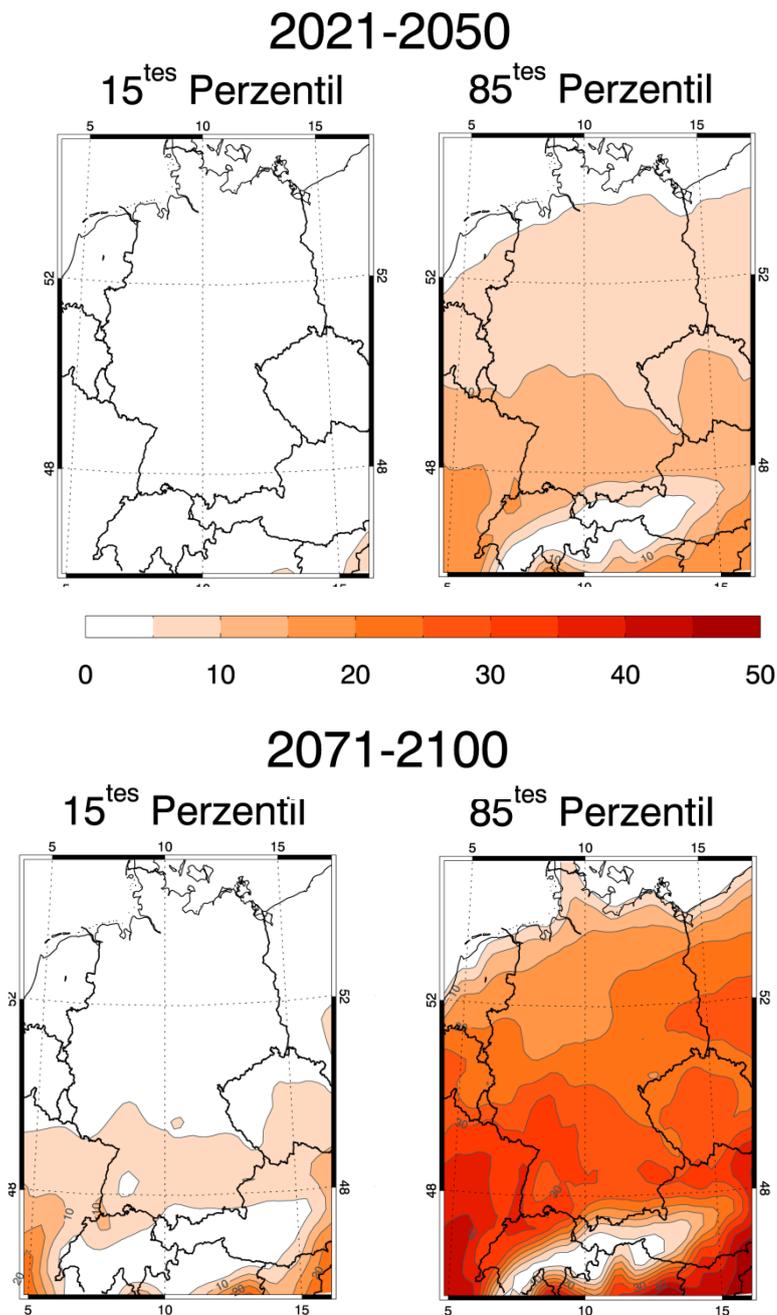


Abbildung 10: Projizierte Änderung der mittleren Anzahl heißer Tage, Mittel über die Projektionszeiträume 2021-2050 (oben) und 2071-2100 (unten)

In den Abbildungen 11 bis 13 sind Änderungen sowohl der mittleren Anzahlen wie auch der Variabilität für die Klimakennwerte ‚längste Periode trockener Tage‘ (consecutive dry days, cdd) und ‚längste Periode Regentage‘ (consecutive wet days, cwd) für die Einzugsgebiete Rhein, Elbe und Donau dargestellt. Die Spannweiten der Ergebnisse der Ensembleauswertungen werden hier mit Hilfe von Box-Whisker-Plots dargestellt, bei denen die Spitzen jeweils die Minima und Maxima des Klimaprojektionsensembles darstellen, der obere und untere Rand des Rechtecks jeweils die

85. und 15. Perzentile, der Stern das Ensembledittel und der Balken im Rechteck den Ensemblemedian.

Für beide Kennwerte und die drei Einzugsgebiete ist eine Zunahme der Spannbreite zum Ende des 21. Jahrhunderts zu erkennen, wobei die Dauer des längsten Ereignisses und somit auch die Zunahme der Spannbreite bei den Trockenperioden größer ist als bei den Feuchtperioden. Diese starke Zunahme der Ensemblebandbreite kann sicher auch aus den in den Klimamodellen innewohnenden Unsicherheiten erklärt werden. Ungeachtet dessen ändert sich die Länge der längsten Niederschlagsereignisse sowohl für die nahe wie auch die ferne Zukunft nicht, beziehungsweise kaum. Dabei schwankt das 15. Perzentil um maximal einen Tag und das 85. Perzentil um maximal drei Tage.

Die längste andauernde Periode von Trockenphasen muss für die drei Flusseinzugsgebiete differenziert betrachtet werden. Am Rhein ist eine leichte Zunahme um zwei bis vier Tage für die nahe Zukunft und 4 bis 14 Tage für die ferne Zukunft zu erkennen. Für die Donau werden keine Änderungen für beide Zukunftsperioden bis zu einer Zunahme von maximal 10 Tage für die ferne Zukunft erwartet. Die Änderungssignale für die Elbe sind hingegen nicht eindeutig. Für die nahe Zukunft ist eine leichte Tendenz zur Abnahme zu erkennen (eins bis drei Tage), wobei für die ferne Zukunft die Veränderung zwischen einer leichten Abnahme (bis maximal drei Tage) und einer Zunahme von bis zu 12 Tagen schwankt.

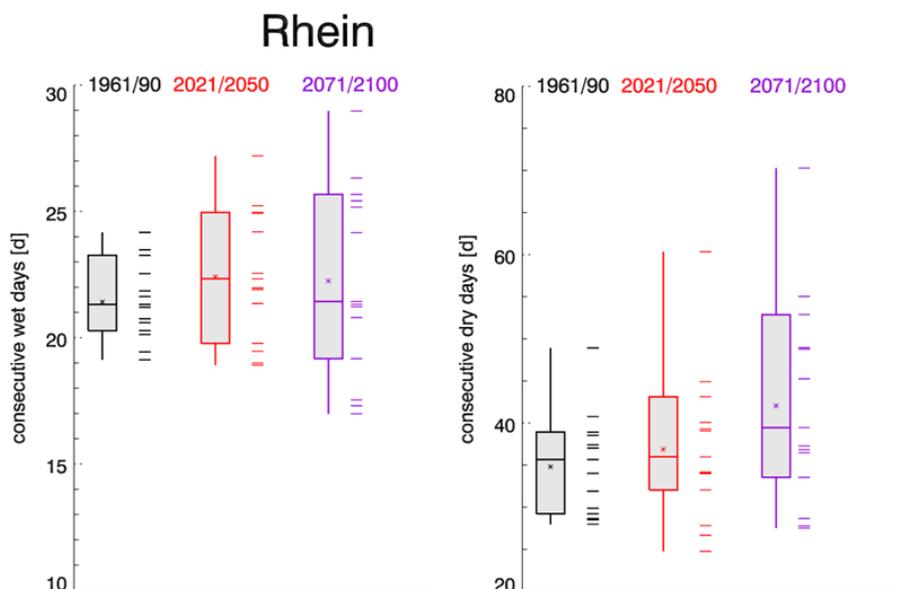


Abbildung 11: Box-Whisker-Plots der längsten Feucht- (links) und Trockenperiode aus 17 Klimaprojektionen für die Zeiträume 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 im Einzugsgebiet des Rheins.

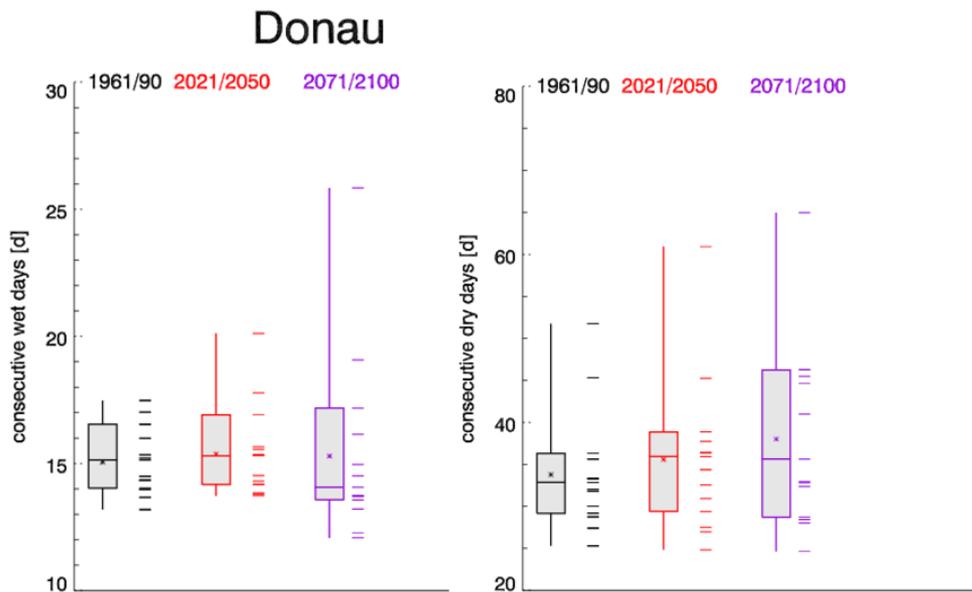


Abbildung 12: Box-Whisker-Plots der längsten Feucht- (links) und Trockenperiode aus 17 Klimaprojektionen für die Zeiträume 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 im Einzugsgebiet der Donau.

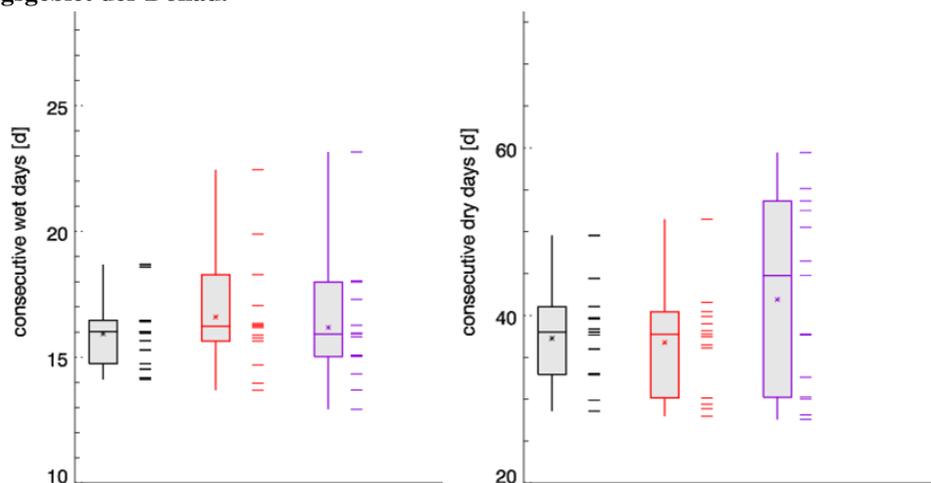


Abbildung 13: Box-Whisker-Plots der längsten Feucht- (links) und Trockenperiode aus 17 Klimaprojektionen für die Zeiträume 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 im Einzugsgebiet der Elbe.

7.3.2 Aussagen zu den Einzugsgebieten: Nahe Zukunft (Lufttemperatur und Niederschlag)

Im Folgenden werden die für KLIWAS relevantesten meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag für den Winter (Dezember bis Februar) und den Sommer (Juni bis August) für die einzelnen Einzugsgebiete betrachtet. Hierzu sind jeweils die modellierten prozentualen Abweichungen aus dem Ensemble der aufbereiteten Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021 bis 2050) bezogen auf den Referenzzeitraum (1961 bis 1990) dargestellt. Die Änderungssignale werden für die jeweiligen Teileinzugsgebiete tabellarisch dargestellt. Die 15. und 85. Perzentile aus den

Ensembleauswertungen stellen dabei jeweils die unteren und oberen Grenzen der in den Tabellen eingetragenen Spannbreiten dar.

Für das Einzugsgebiet der Elbe ergeben die post-prozessierten Klimaprojektionen im Mittel einen sommerlichen Temperaturanstieg von 1 °C bis 2 °C¹ für die nahe Zukunft (2021 bis 2050). Für den Winter ergeben sich ähnliche Werte (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Mittlere Änderungen der Lufttemperatur und Niederschläge im Elbe-Einzugsgebiet für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) verglichen mit dem Beobachtungszeitraum (1961 bis 1990); Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft. Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Modellsimulationen.

ELBE		2021 bis 2050
Lufttemperatur Sommer	Elbe	+1 K bis +2 K
	Vltava	+1 K bis +2 K
	Eger	+1 K bis +2 K
	Labe	+1 K bis +2 K
	Mittellelbe	+1 K bis +2 K
	Saale	+1 K bis +2 K
	Havel	+1 K bis +2 K
	Unternelbe	+1 K bis +2 K
	Tideelbe	+1 K bis +2 K
Lufttemperatur Winter	Elbe	+0,5 K bis +2,5 K
	Vltava	+1 K bis +2,5 K
	Eger	+1 K bis +2,5 K
	Labe	+1 K bis +2,5 K
	Mittellelbe	+1 K bis +3 K
	Saale	+1 K bis +3 K
	Havel	+1 K bis +2,5 K
	Unternelbe	+1 K bis +2,5 K
	Tideelbe	+1 K bis +2,5 K
Niederschlag Sommer	Elbe	-5 % bis +10 %
	Vltava	-10 % bis +10 %
	Eger	-5 % bis +10 %
	Labe	-10 % bis +15 %
	Mittellelbe	-5 % bis +10 %
	Saale	-5 % bis +15 %
	Havel	-5 % bis +5 %
	Unternelbe	-10 % bis +5 %
	Tideelbe	-10 % bis +5 %
Niederschlag Winter	Elbe	-5 % bis +15 %
	Vltava	-10 % bis +15 %
	Eger	-5 % bis +15 %
	Labe	-5 % bis +20 %
	Mittellelbe	-10 % bis +15 %
	Saale	-5 % bis +15 %
	Havel	-5 % bis +15 %
	Unternelbe	0 % bis +15 %
	Tideelbe	0 % bis +15 %

Tabelle 4: Mittlere Änderungen der Lufttemperatur und Niederschläge im Donau-Einzugsgebiet für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) verglichen mit dem Beobachtungszeitraum (1961 bis 1990);

¹ Physikalisch richtig werden Temperaturänderungen in Kelvin (K) angegeben. Die Änderung von 1 K ist gleich der Änderung 1 °C. In diesem Bericht wurden °C für die bessere Verständlichkeit benutzt.

Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft. Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Modellsimulationen.

DONAU		2021 bis 2050
Lufttemperatur Sommer	Donau	+1 K bis +2 K
	Obere Donau	+1 K bis +2 K
	Inn	+1,5 K bis +2,5 K
Lufttemperatur Winter	Donau	+0,5 K bis +2,5 K
	Obere Donau	+1 K bis +2,5 K
	Inn	+1 K bis +2,5 K
Niederschlag Sommer	Donau	-10 % bis +5 %
	Obere Donau	-10 % bis +5 %
	Inn	-5 % bis +5 %
Niederschlag Winter	Donau	-10 % bis +10 %
	Obere Donau	-15 % bis +10 %
	Inn	-10 % bis +10 %

Tabelle 5: Mittlere Änderungen der Lufttemperatur und Niederschläge im Rhein-Einzugsgebiet für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) verglichen mit dem Beobachtungszeitraum (1961 bis 1990); Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft. Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Modellsimulationen.

RHEIN		2021 bis 2050
Lufttemperatur Sommer	Rhein	+1 K bis +2 K
	Hochrhein / Alpenrhein	+1,5 K bis +2,5 K
	Oberrhein / Neckar	+1 K bis +2 K
	Mosel	+1 K bis +2 K
	Main	+1 K bis +2 K
	Maas	+1 K bis +2 K
	Mittel-, Niederrhein	+1 K bis +2 K
Lufttemperatur Winter	Rhein	+0,5 K bis +2,5 K
	Hochrhein / Alpenrhein	+1 K bis +2,5 K
	Oberrhein / Neckar	+1 K bis +2,5 K
	Mosel	+1 K bis +2,5 K
	Main	+1 K bis +3 K
	Maas	+1 K bis +2,5 K
	Mittel-, Niederrhein	+1 K bis +2,5 K
Niederschlag Sommer	Rhein	-10 % bis +5 %
	Hochrhein / Alpenrhein	-10 % bis +5 %
	Oberrhein / Neckar	-15 % bis 0 %
	Mosel	-15 % bis 0 %
	Main	-10 % bis +5 %
	Maas	-15 % bis +5 %
	Mittel-, Niederrhein	-10 % bis +5 %
Niederschlag Winter	Rhein	-5 % bis +10 %
	Hochrhein / Alpenrhein	-15 % bis +10%
	Oberrhein / Neckar	-10 % bis +15 %
	Mosel	0 % bis +15 %
	Main	-5 % bis +15 %
	Maas	0 % bis +15 %
	Mittel-, Niederrhein	0 % bis +15%

Bei den Niederschlägen weicht die Sommer- von der Wintersaison deutlicher ab. Für die nahe Zukunft wird eine mittlere Niederschlagsänderung von -5 % bis +10 % für den Sommer, bzw. -5 % bis +15 % Änderung im Winter erwartet.

Die Untersuchungen zum Klimawandel an der Donau zeigen, dass sich die klimatischen Parameter in ähnlicher Weise ändern werden wie an der Elbe (siehe Tabelle 4), mit einer Tendenz zu höheren Temperaturen an der Donau.

Die Ergebnisse der Klimamodellierung für das Rhein-Einzugsgebiet sind in Tabelle 5 dargestellt.

Wie für ganz Deutschland, so ist für das Rheineinzugsgebiet im Mittel mit Temperaturanstiegen um 1 °C bis 2 °C bis Mitte des Jahrhunderts zu rechnen. Für die Niederschläge können wir bis zur Mitte des Jahrhunderts weder für den meteorologischen Winter (Dezember bis Februar), noch für den meteorologischen Sommer (Juni bis August) eindeutige Trends erkennen.

7.3.3 Aussagen zu den Einzugsgebieten: Ferne Zukunft (Lufttemperatur und Niederschlag)

Im Folgenden werden die für KLIWAS relevanten meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag für den Winter (Dezember bis Februar) und den Sommer (Juni bis August) betrachtet. Hierzu sind jeweils die modellierten prozentualen Abweichungen der fernen Zukunft (2071 bis 2100) bezogen auf den Referenzzeitraum (1961 bis 1990) dargestellt.

Für das Einzugsgebiet der Elbe ergeben unsere post-prozessierten Klimaprojektionen im Mittel einen sommerlichen Temperaturanstieg von 2,5 °C bis 4 °C für die ferne Zukunft (2071 bis 2100). Für den Winter ergeben sich ähnliche Werte (siehe Tabelle 6).

Bei den Niederschlägen weicht die Sommer- von der Wintersaison deutlicher ab. Für die ferne Zukunft variieren unsere Ergebnisse von -25 % bis -5 % im Sommer, bzw. +5 % bis +25 % im Winter. Das heißt, dass für die ferne Zukunft eindeutige Trends in Richtung Niederschlagsabnahme im Sommer, bzw. Niederschlagszunahme im Winter zu erkennen sind.

Die Untersuchungen zum Klimawandel an der Donau zeigen, dass sich die klimatischen Parameter in ähnlicher Weise ändern werden wie an der Elbe (siehe Tabelle 7), mit einer Tendenz zu höheren Temperaturen an der Donau.

Die Ergebnisse der Klimamodellierung für das Rhein-Einzugsgebiet sind in Tabelle 8 dargestellt.

Wie für ganz Deutschland, so ist für das Rheineinzugsgebiet im Mittel mit Temperaturanstiegen um bis zu 5 °C bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Für die Nie-

derschläge in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) zeigen unsere Projektionen trockenere Sommer und feuchtere Winter.

Tabelle 6: Mittlere Änderungen der Lufttemperatur und Niederschläge im Elbe-Einzugsgebiet für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) verglichen mit dem Beobachtungszeitraum (1961 bis 1990); Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft. Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Modellsimulationen.

ELBE		2071 bis 2100
Lufttemperatur Sommer	Elbe	+2,5 K bis +4 K
	Vltava	+3 K bis +5 K
	Eger	+2,5 K bis +4,5 K
	Labe	+2,5 K bis +5 K
	Mittel-elbe	+2,5 K bis +4,5 K
	Saale	+2,5 K bis +4,5 K
	Havel	+2,5 K bis +4,5 K
	Unter-elbe	+2,5 K bis +4,5 K
Tide-elbe	+2,5 K bis +4 K	
Lufttemperatur Winter	Elbe	+2,5 K bis +5 K
	Vltava	+2,5 K bis +5 K
	Eger	+2,5 K bis +5,5 K
	Labe	+2,5 K bis +5,5 K
	Mittel-elbe	+2,5 K bis +5,5 K
	Saale	+2,5 K bis +5 K
	Havel	+2,5 K bis +5 K
	Unter-elbe	+2,5 K bis +5 K
Tide-elbe	+2,5 K bis +5 K	
Niederschlag Sommer	Elbe	-25 % bis -5 %
	Vltava	-20 % bis 0 %
	Eger	-25 % bis 0 %
	Labe	-20 % bis 0 %
	Mittel-elbe	-25 % bis 0 %
	Saale	-25 % bis -5 %
	Havel	-25 % bis -5 %
	Unter-elbe	-25 % bis 0 %
Tide-elbe	-25 % bis -5 %	
Niederschlag Winter	Elbe	+5 % bis +25 %
	Vltava	+5 % bis +30 %
	Eger	+5 % bis +30 %
	Labe	+5 % bis +30 %
	Mittel-elbe	0 % bis +20 %
	Saale	+5 % bis +20 %
	Havel	0 % bis +20 %
	Unter-elbe	+5 % bis +20 %
Tide-elbe	+10 % bis +25 %	

Tabelle 7: Mittlere Änderungen der Lufttemperatur und Niederschläge im Donau-Einzugsgebiet für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) verglichen mit dem Beobachtungszeitraum (1961 bis 1990); Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft. Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Modellsimulationen.

DONAU		2071 bis 2100
Lufttemperatur Sommer	Donau	+3 K bis +5 K
	Obere Donau	+3,5 K bis +5 K
	Inn	+3,5 K bis +5,5 K
Lufttemperatur Winter	Donau	+2 K bis +5 K
	Obere Donau	+2,5 K bis +5 K
	Inn	+2,5 K bis +5 K
Niederschlag Sommer	Donau	-25 % bis -5 %
	Obere Donau	-25 % bis -5 %
	Inn	-25 % bis -10 %
Niederschlag Winter	Donau	-5 % bis +25 %
	Obere Donau	-5 % bis +25 %
	Inn	-5 % bis +20 %

Tabelle 8: Mittlere Änderungen der Lufttemperatur und Niederschläge im Rhein-Einzugsgebiet für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) verglichen mit dem Beobachtungszeitraum (1961 bis 1990); Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft. Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Modellsimulationen.

RHEIN		2071 bis 2100
Lufttemperatur Sommer	Rhein	+3 K bis +5 K
	Hochrhein / Alpenrhein	+4 K bis +5 K
	Oberrhein / Neckar	+3,5 K bis +5 K
	Mosel	+3 K bis +5 K
	Main	+3 K bis +4,5 K
	Maas	+3 K bis +4,5 K
	Mittel-, Niederrhein	+3 K bis +4 K
Lufttemperatur Winter	Rhein	+2 K bis +5 K
	Hochrhein / Alpenrhein	+3 K bis +4,5 K
	Oberrhein / Neckar	+3 K bis +4,5 K
	Mosel	+3 K bis +4,5 K
	Main	+3 K bis +5 K
	Maas	+2,5 K bis +4,5 K
	Mittel-, Niederrhein	+3 K bis +5 K
Niederschlag Sommer	Rhein	-30 % bis -10 %
	Hochrhein / Alpenrhein	-35 % bis -15 %
	Oberrhein / Neckar	-30 % bis -10 %
	Mosel	-35 % bis -15 %
	Main	-30 % bis -10 %
	Maas	-35 % bis -15 %
	Mittel-, Niederrhein	-30 % bis -10 %
Niederschlag Winter	Rhein	0 % bis +25 %
	Hochrhein / Alpenrhein	-5 % bis +20 %
	Oberrhein / Neckar	0 % bis +25 %
	Mosel	+5 % bis +25 %
	Main	+5 % bis +25 %
	Maas	+5 % bis +25 %
	Mittel-, Niederrhein	+5 % bis +20 %

8 Diskussion und Ausblick

Das Projekt KLIWAS 1.02 hat ein Ensemble von 17 regionalen Klimaprojektionen aufbereitet und ausgewertet. Dieses Ensemble steht für die Auswertung verschiedener Fragestellungen zu den möglichen Auswirkungen des Klimawandels in Mitteleuropa, insbesondere den weiteren Projekten in KLIWAS zur Verfügung. Die Evaluation der aufbereiteten Projektionen ergab eine gute Übereinstimmung für den Kontrollzeitraum (1961-1990) mit den hochaufgelösten Daten des HYRAS-Projekts (KLIWAS 1.01) für die mittleren Zustände der betrachteten Variablen, bei der Analyse der Extremwertverteilungen ist weiterer Entwicklungsbedarf sowohl in den einzelnen Modellen wie auch der Bias-Korrektur-Verfahren festzustellen.

Neben der Aufbereitung wurden Verfahren zur statistischen Auswertung des Projektionsensembles entwickelt. Mit Hilfe dieser Verfahren sind sowohl Aussagen über zu erwartende Änderungen wie auch den Spannbreiten möglicher zukünftiger klimatischer Zustände möglich.

Für die Änderung des Jahresmittels der Lufttemperatur im Zeitraums 2021 bis 2050 ist für Deutschland von einer Zunahme um mindestens 0,5 °C (15. Perzentil) auszugehen. Das 85. Perzentil weist in Süddeutschland Werte etwas über 2 °C, in Norddeutschland etwas darunter auf. Für den Zeitraum 2071 bis 2100 wird für ganz Deutschland mindestens eine Erhöhung um 1,5 °C erwartet (15. Perzentil). Das 85. Perzentil zeigt für Norddeutschland einen Wert von 3,5 °C und für Süddeutschland etwa 5 °C.

Für die mittleren Sommerniederschläge lassen die ausgewerteten Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) eine eher geringe und für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) eine leichte bis mäßige Abnahme bis maximal 25 % erwarten. Speziell im früheren Zeitraum könnten die Niederschlagsmengen während der Monate Juni, Juli und August in einigen Regionen Deutschlands aber auch nahezu unverändert bleiben. Im Winter (Abb. 3 unten) muss demgegenüber mit einer Zunahme von bis zu 15 % (2021 bis 2050) bzw. für die ferne Zukunft auch bis zu 25 % gerechnet werden.

Die berechneten Änderungssignale entsprechen vergleichbaren Untersuchungen für Mitteleuropa (z.B. Themeßl et al. 2012, Nilson et al. 2010).

Neben der in diesem Projekt aufbereiteten Variablen Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung sind insbesondere für hydrologische und ökologische Fragestellungen die Verdunstung und damit die Variablen Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit von großer Bedeutung. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der Abhängigkeit der Luftfeuchte von der Lufttemperatur, eine Berücksichtigung der Erhaltung der Konsistenz der meteorologischen Parameter unabdingbar ist. Weiterhin erfordert die

Impaktforschung einen hochaufgelösten Datensatz für Windrichtungen und Windgeschwindigkeit. Für die Windkomponenten müssen Methoden zur Disaggregation und Biaskorrektur der u- und v-Komponenten des Windes entsprechend der orografischen und mesoskaligen Gegebenheiten entwickelt werden.

Des Weiteren wird angestrebt, bestehende Verfahren zu verbessern oder neue Methoden zu entwickeln. Sie sollten möglichst mit neuen Erkenntnissen der Forschung hinterlegt sein, die sich beispielsweise

- mit der Erhaltung der Konsistenz zwischen den Parametern
- mit der Erhaltung der zeitlichen (Tagesgang) und räumlichen (z.B. Höhenabhängigkeit) Konsistenz sowie
- mit dem instationären Verhalten des Biases auseinandersetzt.

Neben den Regionalisierungs- und Korrekturmethode stellt auch die Entwicklung der Klimamodelle und deren Klimasimulationen, die in das Forschungsprogramm eingegangen sind, eine wichtige Rolle dar. Wurden in diesem Projekt Eingangsdatensätze auf der Basis der Emissionsszenarien des 4. IPCC-Sachstandberichts (IPCC 2007) verwendet, können in der Zukunft weitere Klimasimulationen auf der Basis der RCP-Szenarien (Representative Concentration Paths; Moss et al. 2010) in das bestehende Ensemble integriert und ausgewertet werden. Hierzu stehen der Impaktforschung ab 2014 die regionalen Klimamodellergebnisse aus dem EURO-CORDEX-Projekt (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain; Giorgi et al. 2009) bereit.

Ebenfalls wächst die Nachfrage an mittelfristigen Klimaprognosen (im Bereich von Jahren bis Dekaden) von hydrometeorologischen Parametern, um innerhalb dieses Zeithorizonts verlässliche Aussagen zu Niedrig- oder Hochwasserereignissen treffen zu können. Hierfür könnten die Ergebnisse aus dem MiKlip-Projekt (Mittelfristige Klimaprognosen; <http://www.fona-miklip.de/>) herangezogen werden. Dieses Projekt wurde am 01.09.2011 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung initiiert.

9 Danksagung

Wir möchten insbesondere dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung für die Initiierung und Förderung des Ressortforschungsprogramms KLIWAS danken.

Einen weiteren Dank gilt den Datenproduzenten und Datenbereitstellern der regionalen Klimamodellsimulationen, die in diesem Projekt ihre Anwendung fanden.

Hierzu zählt vor allem das EU FP6 ENSEMBLES Projekt mit der Auftragsnummer 505539. “The ENSEMBLES data used in this work was funded by the EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539) whose support is gratefully acknowledged.”

Des Weiteren bedanken wir uns beim Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) für die Datenbereitstellung

- der Konsortialläufe des CLM, finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
- des REMO-UBA Laufs, finanziert durch das Umweltbundesamt sowie
- des REMO-BFG Laufs, finanziert durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde

sowie dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für ihren CLM-Lauf in der räumlichen Auflösung von 7 km. Zugleich möchten wir uns bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde bedanken, die uns ihre vorhandenen Klimaprojektionsdaten zur Verfügung gestellt hat.

Überdies sind wir allen Kooperationspartnern in KLIWAS sowie den Kolleginnen und Kollegen der Referate KU 11 und KU41 des DWD dankbar, die beratend und unterstützend zum Projekt 1.02 beigetragen haben.

10 Literatur

- Anonni A., Luzet C., Gubler E. & Ihde J. (2003): Map projections for Europe. 119-122. 2003.
- Bacher J. (1996): Clusteranalyse: Anwendungsorientierte Einführung. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. Ausgabe: 3. Auflage. Oldenbourg.
- Buser, C.M., Künsch, H.R., Schär C. (2010): Bayesian multi-model projections of climate: generalization and application to ENSEMBLES results. *Clim Res* 44:227–241
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, R., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W. K., Laprise, R., Magana Rueda, V., Mearns, L., Menendez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., Arritt, R., Benestad, R., Beniston, M., Bromwich, D., Caya, D., Comiso, J., de Elia, R., Dethloff, K. et al. (2007): Regional climate projections, *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, University Press, Cambridge, Chapter 11, 847-940.
- Christensen, J., Kjellstrom, E., Giorgi, F., Lenderink, G., and Rummukainen, M. (2010): Weight assignment in regional climate models, *Clim. Res.*, 44, 179–194.
- Déqué, M., Somot, S. (2010): Weighted frequency distributions express modelling uncertainties in the ENSEMBLES regional climate experiments. *Clim Res* 44:195–209
- Doms G. & Schättler U. (2002): Rotated spherical coordinates. In: A description of nonhydrostatic regional model LM – Part I: Dynamics and Numerics – Deutscher Wetterdienst, 21-27.
- Frick, C., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Steiner, H., Rauthe, M., Gratzki, A. (2014): Erstellung von flussgebietsbezogenen Referenzdaten. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.01. KLIWAS-28/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_28/2014_1.01
- Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin*, 58, 175–183.
- Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. and Volken, D. (2010): As-

assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project, CHR report, I-23, 229 pp.

- Hardenbicker, P., Becker, A., Fischer, H., (2014): Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.02. KLIWAS-49/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_49/2014_5.02
- Hashino, T., Bradley, A. A., and Schwartz, S. S. (2007): Evaluation of biascorrection methods for ensemble streamflow volume forecasts, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 939–950, doi:10.5194/hess-11-939-2007.
- Hein, B., Wyrwa, J., Viergutz, C., Schöl, A. (2014): Projektionen für den Sauerstoffhaushalt des Elbe-Ästuars - Folgen für die Sedimentbewirtschaftung und das ökologische Potenzial. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.08. KLIWAS-42/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_42/2014_3.08
- Hillebrand, G., Pohlert, T., Breitung, V. (2014): Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.01. KLIWAS-48/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_48/2014_5.01
- Hofer M., MÖLG T., Marzeion B. & Kaser G. (2010): Empirical-Statistical Downscaling of Reanalysis Data to High-Resolution Air Temperature and Specific Humidity above a Glacier Surface (Cordillera Blanca, Peru). In: *Journal of Geophysical Research*. Ausgabe: Vol. 115, D12120.
- Huth R. (2005): Downscaling of Humidity Variables: A Search for Suitable Predictors and Predictands. In: *International Journal of Climatology*. Ausgabe: Vol. 25 Empirical-Statistical Downscaling of Reanalysis Data to High-Resolution Air Temperature and Specific Humidity above a Glacier Surface (Cordillera Blanca, Peru). In: *Journal of Geophysical Research*. Ausgabe: Vol. 115, 243-250.
- Imbery, F., Plagemann, S., and Namyslo, J. (2013): Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS, *Adv. Sci. Res.*, 10, 91-98, doi:10.5194/asr-10-91-2013.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Basis*. Contributions of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomons, S., Qin, D., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L. Cambridge, UK and New York, NY, USA: 996
- 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

- Kanzow Ch. (2005): Numerik linearer Gleichungssysteme – Direkte und iterative Verfahren. Springer Verlag. Berlin Heidelberg.
- Keßler S. (2012): Leitfaden. Dokumentation und Versionierung von Datenprodukten der KLIWAS-Modellkette. KLIWAS Schriftenreihe. 08/2012.
- Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., and Boehm, U. (2009a): Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, doi:10.1594/WDCC/CLM C20 2 D2.
- Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., and Boehm, U. (2009b): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, doi:10.1594/WDCC/CLM A1B 1 D2
- Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., and Boehm, U. (2009c): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, doi:10.1594/WDCC/CLM A1B 2 D2.
- Knutti, R., G. Abramowitz, M. Collins, V. Eyring, P.J. Gleckler, B. Hewitson, and L. Mearns, 2010: Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. In: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland.
- Kotlarski S., Hagemann S., Krahe P., Podzun R., and Jacob D. (2012): The Elbe River Flooding 2002 as seen by an extended regional climate model, J. Hydrol., 472–473, 169–183.
- Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., and Boehm, U. (2009): Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, doi:10.1594/WDCC/CLM C20 1 D2.
- Maraun, D. (2012): Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums, Geophys. Res. Lett., 39, L06706, doi:10.1029/2012GL051210.

- Michaelsen J. (1987): Cross-Validation in Statistical Climate Forecast Models. In: *Journal of Climate and Applied Meteorology*. Ausgabe: Vol. 26 Issue 11, 1589-1600
- Moss R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756
- Murphy, J. M., Sexton, D. M. H., Jenkins, G. J., Boorman, P. M., Booth, B. B. B., Brown, C. C., Clark, R. T., Collins, M., Harris, G. R., Kendon, E. J., Betts, R. A., Brown, S. J., Howard, T. P., Humphrey, K. A., McCarthy, M. P., McDonald, R. E., Stephens, A., Wallace, C., Warren, R., Wilby, R. and Wood, R. A. (2009). UK Climate Projections Science Report: Climate change projections. Exeter, Met Office Hadley Centre.
- Nilson, E., Carambia, M., and Krahe, P. (2010): Low flow changes in the Rhine River basin, in: Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the Rhein- Blick2050 Project, CHR Report No. I-23, edited by: Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., and Volken, D., 115–119.
- Nilson, E., Krahe, P., Lingemann, I., Horsten, T., Klein, B., Carambia, M., Larina, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01
- Piani, C., Haerter, J., and Coppola, E. (2010a): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 187–192.
- Piani, C., Weeden, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S., and Haerter, J (2010b): Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models, *J. Hydrol.*, 395, 199–215.
- Plagemann, S.; F. Imbery, U. Riediger (2014): A Central European precipitation climatology - Part III: An ensemble of evaluated high resolution climate projections. *Meteorol. Z.*, 2014. In preparation.
- Posselt, R., Müller, R., Stöckli, R., and Trentmann, J. (2011): CM-SAF Surface Radiation MVIRI Data Set 1.0 – Monthly Means/Daily Means/Hourly Means, Satellite Application Facility on Climate Monitoring.
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L. P., Jones, C., Meier, H. E. M., Samuelsson, P., Willén, U. (2004): European climate in the late 21st

- century: regional simulations with two driving 19 global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics*, 22: 13-31.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., and Gratzki, A. (2012): HYRAS – Hydrometeorological reference data for German river basins, 12th EMS Annual Meeting & 9th European Conference on Applied Climatology ECAC, MC2/ASI14, EMS2012-87.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., and Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology – PartI: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), *Meteorol. Z.*, Band 22 Heft 3, p. 235 - 256.
- Riediger, U, A. Gratzki. (2014): Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. *Meteorol. Z.*, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2014/0519
- Rummukainen, M. (2010): State-of-the-art with regional climate models. *Clim Change* 1:82–96
- Schiemann, R. & Frei, C. (2010): How to quantify the resolution of surface climate by circulation types: An example for Alpine precipitation. – *Physics and Chemistry of the Earth* 35(9-12), 403-410
- Snyder J. (1987): *Map Projections – A Working Manual*.
<http://pubs.usgs.gov/pp/1395/report.pdf>.
- Stott, P. and Forest, C. (2007): Ensemble climate predictions using climate models and observational constraints, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2029–2052.
- Taubenheim J. (1969): *Statistische Auswertung Geophysikalischer und Meteorologischer Daten*. Geest & Portig. Leipzig 1969.
- Teutschbein, C. and Seibert, J. (2012): Is bias correction of Regional Climate Model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions?, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 12765–12795, doi:10.5194/hessd-9-12765-2012.
- Thiemeßl, M. J., Gobiet, A., and Heinrich, G. (2012): Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal, *Climatic Change*, 112, 449–468.
- Urban D. & Mayerl J. (2008): *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH. Wiesbaden 2008.
- Van der Linden, P. and Mitchell, J. F. B. (2009): *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*, Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.

VDI-Richtlinien 3789 Blatt 3 (2001): Umweltmeteorologie – Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen – Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich. Ausgabe: VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft. Band: 1.b.

Viner, D. (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies. Climatic Research Unit, University of East Anglia, United Kingdom

Whiteman C.D. (2000): Mountain Meteorology – Fundamentals and Applications. Ausgabe: 1, 312-319

Wilby, R., Wood, R. A. (2009): UK Climate Projections Science Report: Climate change projections. Met Office Hadley Centre, Exeter.

11 Abkürzungen

BMVBS	Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CDC	Climate Data Center
CERA	Climate and Environmental Retrieval and Archive
CORDEX	Coordinated Downscaling Experiment
DOWTEMP	DOWnscaling von TEMPeraturwerten
DWD	Deutscher Wetterdienst
DOWGLOB	DOWnscaling von GLOBalstrahlung in Klimaprojektionen
DOWNIE	DOWnscaling von NIEderschlagssummen in Klimaprojektionen
DOWREF	DOWnscaling von RELativer Feuchte in Klimaprojektionen
DOWTEMP	DOWnscaling von LuftTEMPeratur in Klimaprojektionen
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
GISC	Global Information System Centre
GTOPO30	Global TOPOgraphic data (30-arc seconds)
HYRAS	Erstellung hydrologisch relevanter Raster- und Gitterpunktdatensätze für das Bundesgebiet und die internationalen Flussgebietsanteile Rhein, Donau und Elbe auf der Basis qualitätsbewerteter meteorologischer Beobachtungsdaten
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt
LCC	Lambert Conformal Conic Coordinate Reference System
MiKlip	Mittelfristige Klimaprognosen
NDRY	Anzahl trockener Tage ($R < 1$ mm pro Tag) für ein Zeitintervall
NetCDF	NETwork Common Data Format (binäres Dateiformat)
OMO	Other MOdel data
R	Niederschlagsmenge in mm/Tag
R10mm	Anzahl von Niederschlagstagen mit $R \leq 10$ mm pro Tag für ein Zeitintervall

Rx5day	Maximale Niederschlagsmenge zusammenhängender 5-Tages-Niederschläge ($R \leq 1\text{ mm pro Tag}$)
RCP	Representative Concentration Pathways
REGNIE	REGionalisierung von NIEderschlagswerten
SRTM03	Shuttle Radar Topography Mission (3-arc seconds)
TOT	Mittlere Niederschlagssumme nasser Tage ($R \leq 1\text{ mm pro Tag}$) für ein Zeitintervall
WebWerdis	Webbased Weather Request and Distribution System



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de



**BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE**



Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

**Bundesanstalt für
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de



IMPRESSUM

Herausgeber:

Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: 0261 / 1306-0
Fax: 0261 / 1306-5302
E-Mail: kliwas@bafg.de
Internet: <http://www.kliwas.de>

Redaktion: KLIWAS-Koordination
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Autoren: Sabrina Plagemann, Dr. Florian Imbery,
Joachim Namyslo, DWD

Layout: Christin Hantsche und Tobias Knapp,
Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie - Rostock

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_29/2014_1.02