

Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg

 Perspektiven aus regionalen Klimamodellen
– Langfassung –



Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg

 Perspektiven aus regionalen Klimamodellen
– Langfassung –

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
KONTAKT	Dr. Kai-Achim Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de
AUFTRAGGEBER	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
BEARBEITUNG	Andreas Wagner, Dr. Kai Gerlinger, Erkin Chomoev, Markus Mast HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Haid-und-Neu-Straße 7 76131 Karlsruhe www.hydron-gmbh.de Dr. Kai-Achim Höpker (LUBW) Daniel Schulz-Engler (LUBW)
BEZUG	Kostenloser Download unter: www.lubw.baden-wuerttemberg.de
ISBN	978-3-88251-377-6
STAND	Februar 2013

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG	7
1 AUSGANGSLAGE UND AUFGABENSTELLUNG	8
2. ZUSAMMENSTELLUNG UND BEWERTUNG DES AKTUELLEN KENNTNISSTANDS ZU DEN REGIONALEN KLIMAPROJEKTIONEN	9
2.1 Grundlagen der regionalen Klimaprojektionen	9
2.3 Bewertung von regionalen Klimaprojektionen in Baden-Württemberg	15
2.4 Unsicherheiten innerhalb der Modellkette	19
3 AUSGEWÄHLTE REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN IN BADEN-WÜRTEMBERG	21
3.1 Überblick über die regionalen Klimaprojektionen	21
3.2 Beschaffung und Aufbereitung der regionalen Klimaprojektionen	24
3.3 Ausgewertete Kennzahlen	27
A. Kennzahlen der Lufttemperatur	27
B. Kennzahlen des Niederschlags	28
C. Kennzahlen der Globalstrahlung	29
D. Kennzahlen der Windgeschwindigkeit	29
4 BESTIMMUNG DES AUSWERTE-ENSEMBLES	30
4.1 Entscheidungskriterien für die Bewertung von Klimaprojektionen	30
4.2 Ermittlung des Auswerte-Ensembles und des reduzierten Auswerte-Ensembles	32
5 AUSWERTUNG DER BEOBACHTUNGSDATEN UND DER REGIONALEN KLIMAPROJEKTIONEN	36
5.1 Form der Auswertung der regionalen Klimaprojektionen	36
5.2 Quantitativer und qualitativer Vergleich der regionalen Klimaprojektionen	41
5.2.1 Kennzahlen der Temperatur	41
5.2.2 Kennzahlen des Niederschlags	46
5.2.3 Kennzahlen der Globalstrahlung	50
5.2.4 Kennzahlen der Windgeschwindigkeit	52
5.2.5 Analyse des Niederschlags anhand eines reduzierten Auswerte-Ensembles	53
5.3 Auswirkungen unterschiedlicher räumlicher Auflösung der Klimaprojektionen	57
5.4 Einschätzung der Modellunsicherheiten des Auswerte-Ensembles	58
6 ZUKUNFTSBEZOGENE KLIMATISCHE LEITPLANKEN FÜR DIE ENTWICKLUNG VON ANPASSUNGSSTRATEGIEN	62
7 VERZEICHNIS DER ANLAGEN	74
8 LITERATUR	156

Zusammenfassung

Für die Ableitung zukünftiger klimatischer Rahmenbedingungen für Baden-Württemberg wurden Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen ausgewertet. Unter „regionalen Klimaprojektionen“ werden dabei die Ergebnisse von Modellketten bestehend aus der Vorgabe eines Emissions-szenarios für die Entwicklung der zukünftigen Treibhaus-gaskonzentrationen, aus globalen Klimamodellen und aus regionalen Klimamodellen verstanden.

Um die Zuverlässigkeit der Aussagen zu erhöhen, wurden für die Einschätzung des Klimawandels in Baden-Württemberg die Ergebnisse von 29 verschiedenen Kli-maprojektionen analysiert (Ensemble-Ansatz). Die Kli-maprojektionen wurden für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zu-kunft (2071-2100) gemeinsam ausgewertet.

Aus den 29 Klimaprojektionen wurden zunächst fünf Kli-maprojektionen ausgeschlossen, die für Baden-Württem-berg aufgrund von deutlich unrealistischen Ergebnissen für die Simulation des derzeitigen Klimas ungeeignet er-scheinen.

Somit standen 24 Klimaprojektionen für die Auswertung der nahen Zukunft zur Verfügung. Für die ferne Zukunft sind generell weniger Klimaprojektionen verfügbar, hier wurden 15 Klimaprojektionen ausgewertet. Aus den vier Klimaparameter Temperatur, Niederschlag, Globalstrah-lung und Windgeschwindigkeit wurden 28 Kennzahlen (wie z.B. Anzahl der Sommertage) abgeleitet und für die Landesfläche von Baden-Württemberg analysiert. Aus der Änderung der Werte für beide Zeiträume in der Zukunft zum Ist-Zustand ergeben sich die Klimasignale für jede Kennzahl.

Durch die Auswertungen der verschiedenen Klimapro-jektionen war es möglich, die zu erwartenden zukünftigen Entwicklungen aufzuzeigen:

- Für alle Kennzahlen der Temperatur ergibt sich eine deutliche Veränderung der Werte in der Zukunft im Vergleich zum Ist-Zustand und somit ein starkes Kli-masignal mit hoher Richtungssicherheit. Es kann von einer Temperaturzunahme in der Zukunft ausgegan-gen werden.
- Der Klimaparameter Niederschlag ist schwieriger zu simulieren als die Temperatur. Entsprechend sind die Streuungen der Klimaprojektionen in der Regel höher als bei der Temperatur. Die Stärke des Klimasignals ist je nach Kennzahl unterschiedlich und die Richtungs-sicherheit ist weniger deutlich als bei den Kennzahlen der Temperatur.
- Die Kennzahlen der Globalstrahlung sind geprägt von hohen Streuungen. Die Änderungen zur Zukunft hin sind im Mittel sehr klein.
- Für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit sind kaum Änderungen zur Zukunft hin zu erwarten. Die Stärke des Klimasignals ist gering.

Mit Hilfe einer statistischen Auswertung wurde die Band-breite der Klimaprojektionen analysiert und Werte für die Kennzahlen als „klimatische Leitplanken“ angegeben. Diese Werte können für Vulnerabilitätsanalysen oder die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen herangezogen werden. Durch die durchgeführte Bewertung mit Anga-be der Streuungen und der Richtungssicherheit kann die Zuverlässigkeit und Belastbarkeit der jeweiligen Kennzahl eingeschätzt werden. Damit lassen sich basierend auf den derzeitig verfügbaren Klimaprojektionen qualitative als auch quantitative Aussagen zum Klimawandel in Baden-Württemberg treffen.

Zu diesem Bericht liegt auch eine Kurzfassung mit dem Ti-tel „Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg– Perspektiven aus regionalen Klimamodellen – Kurzfassung“ – vor, die auf der Internetseite der LUBW herunterladbar ist.

1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Der Klimawandel und seine Folgen sind auch auf der regionalen Ebene messbar. Daher hat das Land Baden-Württemberg schon frühzeitig damit begonnen, den Klimawandel und seine ökologischen, ökonomischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen zu untersuchen. Eine Einschätzung der Folgen für die Regionen in Baden-Württemberg wurde in wichtigen Bereichen in den zurückliegenden Jahren im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben wie KLIWA, KLARA und „Herausforderung Klimawandel Baden-Württemberg“ durchgeführt (UM & LUBW 2012).

Da die Forschungsarbeiten zum Klimawandel ständig fortgeführt werden und weiterhin große Unsicherheiten bestehen, beschäftigt sich die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) kontinuierlich mit den aktuellen Fragen und Erkenntnissen zu diesem Thema. Grundlage für die Abschätzung des Klimawandels sind regionale Klimaprojektionen. Diese sind Ergebnisse der Modellketten bestehend aus Annahmen zur Entwicklung der Treibhausgase und den Berechnungen von globalen und regionalen Klimamodellen. Damit können die Daten bereitgestellt werden für unterschiedliche Fragestellungen und erforderliche Anpassungen z.B. in den Bereichen der Raumplanung oder der Wasserwirtschaft.

Durch die Auswertung von verschiedenen regionalen Klimaprojektionen bezogen auf Baden-Württemberg werden in dieser Untersuchung die Grundlagen geschaffen, um die Folgen des Klimawandels basierend auf den derzeit vorliegenden Klimaprojektionen besser einzuschätzen.

Im vorliegenden Bericht wird zunächst ein Überblick über die Grundlagen der Klimamodellierung gegeben. Dabei wird insbesondere der aktuelle Wissensstand im Bereich der regionalen Klimaprojektionen und über die derzeit laufenden Aktivitäten aufgezeigt.

Im Anschluss werden die für die Auswertung ausgewählten regionalen Klimaprojektionen skizziert. Die Klimaprojektionen wurden von unterschiedlichen Institutionen

beschafft und für die Auswertungen aufbereitet. Die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen lagen in unterschiedlichen Formaten sowie Auflösungen vor und waren daher zunächst zu vereinheitlichen.

Die ausgewählten regionalen Klimaprojektionen werden hinsichtlich der Veränderungen bestimmter, aus meteorologischen Parametern abgeleiteten Kennzahlen (wie z.B. Anzahl der Sommertage) vom Ist-Zustand (1971-2000) zur nahen Zukunft (2021-2050) und fernen Zukunft (2071-2100) untersucht. Durch die Auswahl von mehreren Global- und Regionalmodellen als ein Ensemble-Datensatz wird die mögliche Schwankungsbreite der Simulationsergebnisse verschiedener Klimaprojektionen aufgezeigt. Die Ensembleanalysen ermöglichen, neben den absoluten Veränderungen der Modelle auch Erkenntnisse über die Schwankungsbreite verschiedener Klimaprojektionen bereitzustellen, so dass die Ergebnisse besser bewertet werden können.

Durch diesen umfassenden Vergleich der regionalen Klimaprojektionen werden klimabezogene Rahmenbedingungen („klimatische Leitplanken“) für die Entwicklung einer baden-württembergischen Anpassungsstrategie zur Verfügung gestellt. Diese Rahmenbedingungen können für Vulnerabilitätsabschätzungen und die Formulierung von Anpassungsmaßnahmen weiter verwendet werden.

Die Leitung des Projekts auf Seiten der LUBW oblag Dr. K.-A. Höpker (LUBW). Projektbegleitend wurden zudem Herr Dr. G. Schädler (Institut für Meteorologie und Klimatologie des Karlsruher Instituts für Technologie) und Herr V. Kolokotronis (LUBW) beratend eingebunden.

2. Zusammenstellung und Bewertung des aktuellen Kenntnisstands zu den regionalen Klimaprojektionen

2.1 Grundlagen der regionalen Klimaprojektionen

Entsprechend den Erkenntnissen des Vierten Sachstandsberichts (AR4) des IPCC¹ (IPCC 2007) gibt es klare Belege für die Klimaänderung. Diese kann bereits eindeutig anhand von Messdaten in der Erwärmung des globalen Klimasystems nachgewiesen werden. Auch in Baden-Württemberg ist der Klimawandel bereits am Anstieg der Lufttemperatur (Bild 2-1) sowie in den Veränderungen weiterer Messdaten ersichtlich [GERLINGER 2009, RUDOLF et al. 2009]. Zudem zeigen sich erste Veränderungen in der Umwelt und Natur Baden-Württembergs, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind [UM & LUBW 2012].

Dabei liegen die Ursachen für die Klimaerwärmung sehr wahrscheinlich in dem vom Menschen verursachten Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Wegen der Trägheit des Klimasystems werden sich die Wirkungen der heutigen deutlich höheren Treibhausgasemissionen erst in den kommenden Jahrzehnten bemerkbar machen. Somit kann von einer weiteren Erwärmung der Erde ausgegangen werden.

Daher müssen einerseits auch weiterhin große Anstrengungen zur Emissionsminderung unternommen werden. Andererseits wird es auch zunehmend wichtig, Maßnahmen für die Anpassung an den nicht vermeidbaren Klimawandel zu entwickeln und zu realisieren. Diese Anpassungsmaßnahmen haben zum Ziel, die Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas zu verringern und künftige Gefährdungen zu vermeiden.

Die Folgen des Klimawandels werden weitreichende Konsequenzen in allen Bereichen des Lebens haben. Dazu zählen auch die Raumplanung und Raumentwicklung insgesamt sowie einzelne Teilbereiche davon wie die Wasserwirtschaft, die Freiraumsicherung, die Siedlungs- und Verkehrsplanung sowie die Energieversorgung [ARL 2009].

Um rechtzeitig Anpassungsmaßnahmen in Angriff nehmen zu können, ist es erforderlich, auf Regionen bezogene Aussagen zur zukünftigen Klimaänderung bereitzustellen. Daher stellt die LUBW für die Entwicklung der baden-württembergischen Anpassungsstrategie klimabezogene Rahmenbedingungen für einen Zeitraum der „nahen“ Zukunft (z.B. 2021 bis 2050) und für einen Zeitraum der „fernen“ Zukunft (z.B. 2071 bis 2100) bereit. Diese Rahmenbedingungen liefern die Grundlagen für Vulnerabilitätsabschätzungen und die Formulierung von Anpassungsmaßnahmen.

Ausgangspunkt für die Abschätzung der regionalen Auswirkungen der Klimaänderung sind Annahmen zu den weiteren Entwicklungen der Emissionen wie z.B. der CO₂-Konzentration. Diese sind allerdings von ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen abhängig, die grundsätzlich nicht vorhersagbar sind. Daher wurden unterschiedliche Emissionsszenarien definiert (SRES-Szenarien (SRES: Special Report on Emissions Scenarios; IPCC 2001)), die die möglichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert berücksichtigen.

Die Szenarien werden in die vier Hauptgruppen A1, A2, B1 und B2 unterteilt. Dabei ist B1 das Szenario mit den geringsten, A1B mit mittleren und A1 mit den höchsten Treibhausgasemissionen und somit stärksten Temperaturerhöhungen bis 2100 (Bild 2-2). Die meisten Modellrechnungen werden mit den Vorgaben der Szenarien B1, A2 und insbesondere A1B durchgeführt.

¹ Der Vierte Sachstandsbericht (Fourth Assessment Report, AR4) des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) der Vereinten Nationen aus dem Jahr 2007 ist der jüngste Bericht in einer Reihe, die regelmäßig den wissenschaftlichen Kenntnisstand über die globale Erwärmung zusammenfasst. Die im Abstand von fünf bis sechs Jahren herausgegebenen IPCC-Berichte gelten weithin als Konsensposition innerhalb der Fachwelt, was den Einfluss des Menschen auf das Erdklima betrifft.

Jahresmitteltemperaturen in Baden-Württemberg (1901-2012)

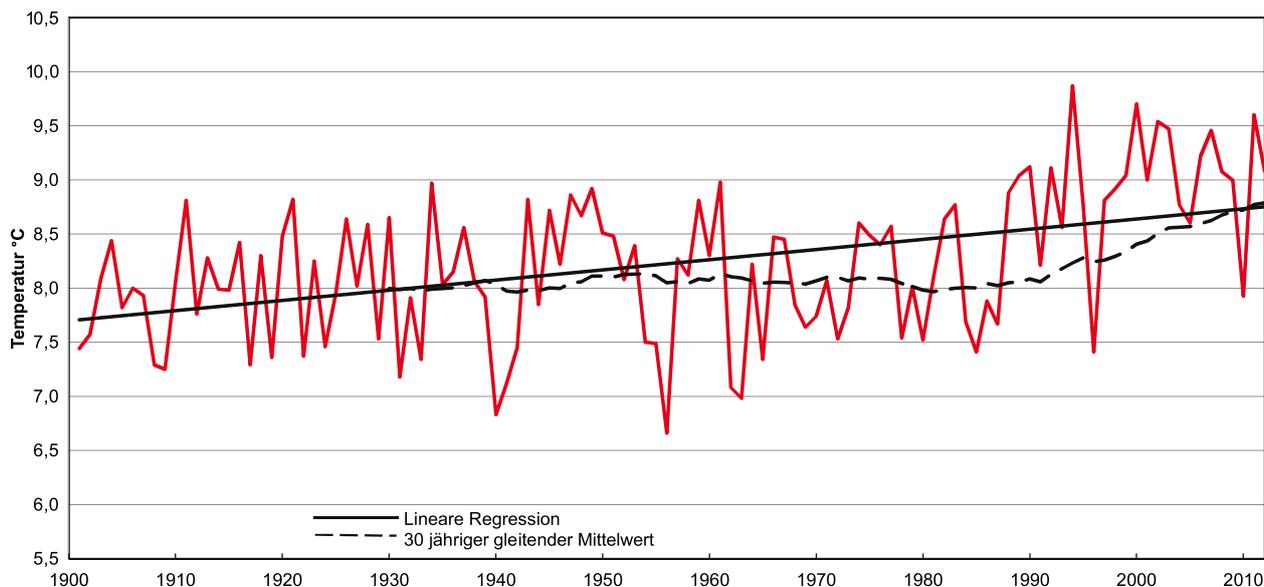


Bild 2-1: Jahresmitteltemperaturen in Baden-Württemberg 1901 bis 2012 (Daten des DWD, Bearbeitung LUBW)

Unter Verwendung der SRES-Emissionsszenarien werden zur Berechnung und Projektion des Klimas für die Zukunft globale Zirkulationsmodelle (GCM) verwendet. Die GCM simulieren die dreidimensionalen komplexen Vorgänge der Atmosphäre, wobei meist ein Ozeanmodell angekoppelt ist (gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modelle (AOGCM²)). Beispiele für solche gekoppelte Modelle sind das GCM ECHAM4 mit dem Ozeanmodell OPY3 oder das GCM ECHAM5 mit dem Ozeanmodell OM. Zusätzlich sind oft weitere Modelle an das GCM angegliedert (z.B. ein Schnee- und Eismodell oder ein Vegetationsmodell).

Das ECHAM-Modell gehört auch zu dem multimodel-Datensatz aus dem Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) des World Climate Research Program, der zur Erstellung des AR4 des IPCC verwendet wurde [MEEHL et al. 2007]. Derzeit werden die Arbeiten des CMIP5 zum 5. Sachstandsbericht des IPCC durchgeführt, bei dem u.a. die ECHAM6-Version eingesetzt werden soll [TAYLOR et al. 2011, GIORGETTA 2011].

Allerdings sind die GCM aufgrund der komplexen Prozesse und der zur Verfügung stehenden Computerkapazitäten in ihrer räumlichen Modellauflösung limitiert.

So liegen z.B. die Ergebnisse des gekoppelten globalen Klimamodells ECHAM5 nur in einem Raster mit einem horizontalen Gitterabstand von ca. 250 km vor. Ein Gebiet wie z.B. Europa wird durch dieses Raster nur sehr vergrößert repräsentiert und auch die Topographie der Erdoberfläche wird damit nur recht ungenau dargestellt.

Für die Erstellung von Klimaszenarien auf der regionalen Skala werden daher globale Klimamodelle und Regionalisierungsverfahren zusammen eingesetzt. Bei den Regionalisierungsverfahren erfolgt ein Downscaling, also ein Herunterskalieren und Regionalisieren der globalen Antriebsdaten des GCM auf eine feinere regionale Auflösung.

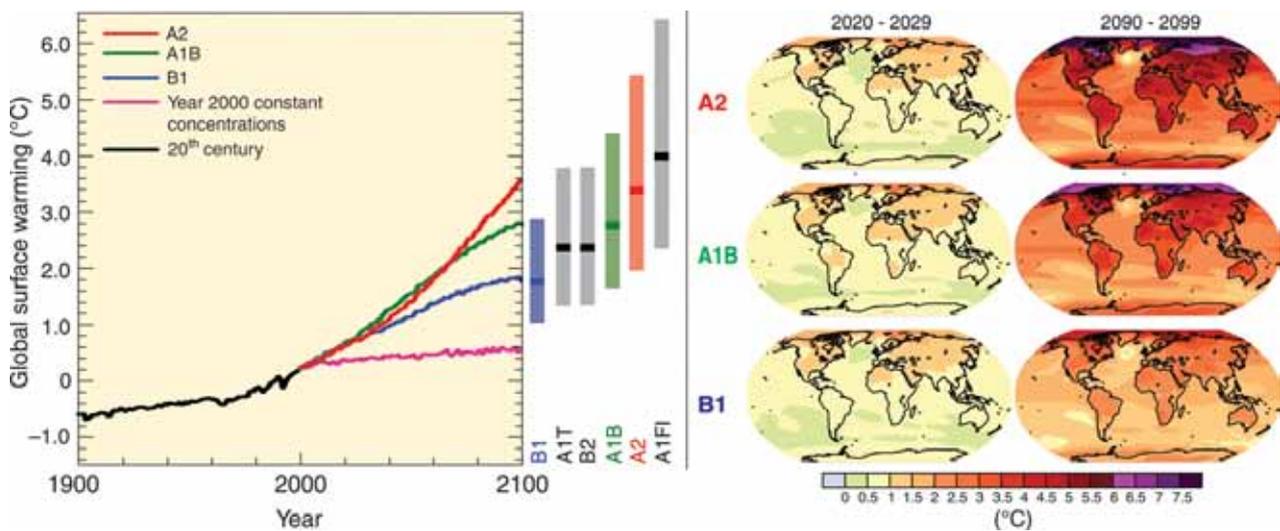


Bild 2-2: Beobachtete und abgeschätzte Entwicklung der mittleren globalen Lufttemperatur in Abhängigkeit vom angenommenen SRES-Emissionsszenario. Die farbigen Balken rechts außen geben für die SRES-Emissionsszenarien die Bandbreite der Streuung aufgrund der Verwendung eines Ensembles aus verschiedenen Klimamodellen an (nach IPCC 2007).

Dabei wird zwischen statistischen Verfahren und dynamischen regionalen Klimamodellen unterschieden [KLIWA 2006]:

- Die statistischen Methoden gehen z.B. davon aus, dass zwischen der großräumigen Druck- und Temperaturverteilung über dem Nordatlantik und Europa und den Witterungsgrößen an ausgewählten Standorten statistische Beziehungen bestehen. Diese können für das gegenwärtige Klima aufgrund von Messdaten bestimmt werden. Auf dieser Grundlage werden die GCM-Ergebnisse in Form von Temperatur- und Niederschlagsverläufen auf einzelne, regional höher aufgelöste Gebiete abgebildet. Statistische Regionalisierungsverfahren setzen somit voraus, dass die am historischen Datenmaterial gewonnenen Informationen zwischen großräumigen Feldern (z.B. Druckverteilungen) und lokalen Wetterelementen auf die Klimamodellsimulationen mit dem GCM für das Zukunftsszenario angewendet werden dürfen.

Die Ergebnisse der statistischen Regionalmodelle liegen nur an den Messstationen vor, die für die Modellerstellung verwendet wurden. Somit werden keine flächendeckenden Informationen über die zu erwartende Klimaänderung zur Verfügung gestellt.

In Deutschland werden häufig die statistischen Modelle STAR (PIK, Potsdam)³ und WETTREG (CEC, Potsdam)⁴ angewandt.

- Dynamische regionale Klimamodelle (RCM) basieren auf den gleichen Prinzipien wie GCM, aber sie betrachten nur einen Ausschnitt auf der Erde. Daher benötigen sie zur Simulation geeignete Randbedingungen an den Rändern des Modellgebietes. Typischerweise wird dabei von regionalen Klimamodellen ein Gebiet wie z.B. Europa mit einer horizontalen Skala von 1.000 bis 5.000 km Seitenlänge abgedeckt. Der Antrieb eines RCM an den seitlichen Modellrändern erfolgt mit den Ergebnissen aus dem GCM, wodurch das regionale Modell dann eine höhere Auflösung als das übergeordnete globale Modell hat (vgl. Bild 2-3).

Wird solch eine eingebettete („genestete“) Modellkette mehrmals verwendet (also von einem GCM zu einem RCM mit grober Auflösung, dann zu einem RCM mit feiner Auflösung), so kann die räumliche Auflösung über der betrachteten Region schrittweise erhöht werden.

Die RCM stellen die Ergebnisse bezogen auf Raster zur Verfügung, wobei die Rasterweite dann deutlich feiner ist als das Raster des verwendeten GCM (z.B. 10x10 km).

³ Kurzbeschreibung von STAR unter www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html

⁴ Kurzbeschreibung von WETTREG unter www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/WettReg/wettreg.html.

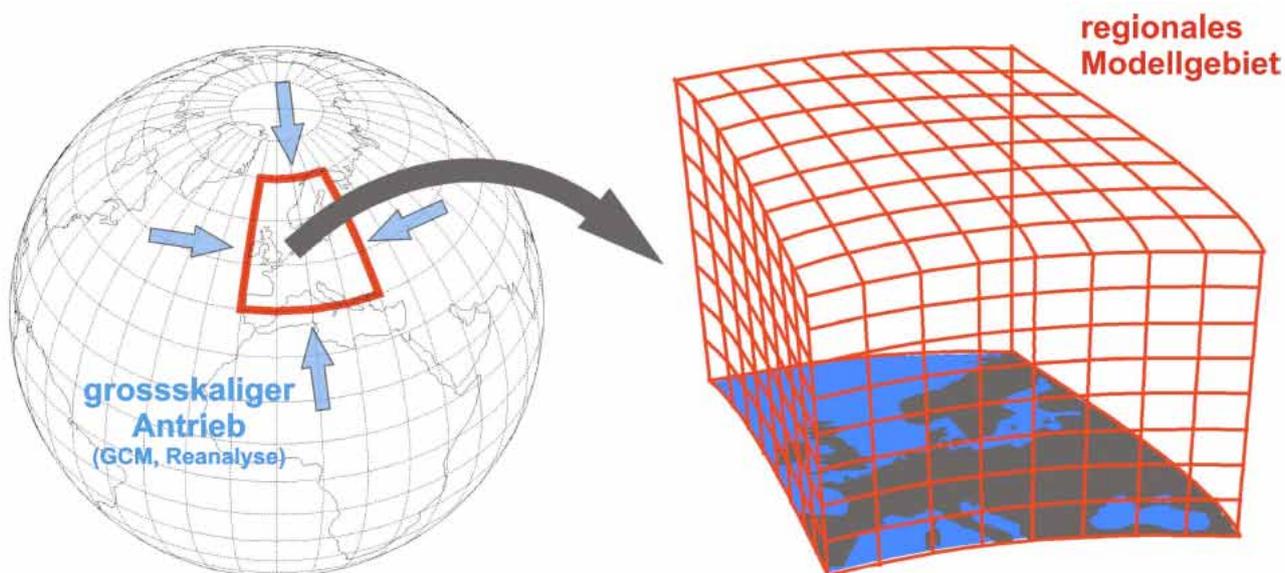


Bild 2-3: Antrieb eines Regionalmodells durch ein Globalmodell (Bosshard et al. 2011)

In Deutschland wird häufig das regionale Klimamodell REMO (RegionalModell)⁵ des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI-M) sowie das COSMO-CLM-Modell⁶ (früher als CLM-Modell bezeichnet) angewandt. Das Modell COSMO-CLM (Klimaversion des Lokalmodells des Deutschen Wetterdienstes) ist eine Gemeinschaftsentwicklung von etwa 25 verschiedenen Institutionen.

Die statistischen Verfahren und die regionalen Klimamodelle zur Regionalisierung der Ergebnisse der Globalmodelle werden zusammenfassend als „regional climate downscaling“ Techniken oder Regionalisierungsverfahren bezeichnet.

Die Ergebnisse der GCM zusammen mit den Ergebnissen der Folge Modelle innerhalb einer Modellkette werden entsprechend IPCC DDC (2007) als „Klimaprojektion“ bezeichnet. Eine „Klimaprojektion“ ist eine Modellausgabe, also eine durch Klimamodelle abgeleitete Abschätzung des zukünftigen Klimas unter Annahme eines Szenarios.

Ein „Szenario“ ist umfassender definiert, da darunter nach IPCC DDC (2007) eine kohärente, intern konsistente und plausible Beschreibung eines zukünftigen Zustandes eines Systems verstanden wird. Das Szenario wird bewusst ausgewählt, es beschreibt eine mögliche und nach aktuellem Verständnis plausible Entwicklung, die die Grundlage für weitere Überlegungen bietet (nach VAN VUUREN et al. 2011).

Unter „regionalen Klimaprojektionen“ werden daher im Weiteren die Ergebnisse der Modellkette bestehend aus Emissionsszenario, GCM und Regionalisierungsverfahren verstanden.

⁵ Beschreibung von REMO unter www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/weberblick/atmosphaere-imerdsystem/regionale-klimamodellierung/remo-uba.html.

⁶ Beschreibung des COSMO-CLM unter www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/CLM/clm.html sowie unter <http://www.clm-community.eu/>

2.2 Bewertung von regionalen Klimaprojektionen in Europa und Deutschland

Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Datensätzen aus globalen und regionalen Klimamodellen nimmt ständig zu. Daher bestehen bereits auf internationaler Ebene mehrere Projekte, die sich mit dem Vergleich und der Bewertung der verschiedenen GCM, RCM und daraus folgenden regionalen Klimaprojektionen in Europa beschäftigen:

- Im Bereich von Europa wurden regionale Klimamodelle und statistische Verfahren im Rahmen des Projekts STARDEX⁷ („Statistical and regional downscaling of extremes for European regions“) verglichen (STARDEX 2005).
- Klimaprojektionen für Europa liegen aus dem Projekt PRUDENCE⁸ vor. Dabei wurde eine Modellkette mit den beiden Globalmodellen HadCM3 und ECHAM4 und acht verschiedenen regionalen Klimamodellen (darunter REMO) verwendet [CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2007, DÉQUÉ et al. 2007, JACOB et al. 2007]. Als Emissionsszenarien gingen die SRES-Szenarien A2 und B2 ein.
- Aktuelle regionale Klimaprojektionen mit einer Auflösung von ca. 25 x 25 km² stehen aus dem ENSEMBLES-Projekt⁹ („ENSEMBLE-basierte Vorhersagen zum Klimawandel und dessen Auswirkungen“) zur Verfügung [VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009]. In dem Projekt wurden parallele Anwendungen europäischer Klimamodelle (verschiedene Global- und Regionalmodelle) mit einheitlichen bzw. vergleichbaren Eingangsdaten durchgeführt [HAYLOCK et al. 2008]. Zudem werden weitere Randbedingungen variiert (z.B. verschiedene Emissionsszenarien). Durch dieses Modell-Ensemble ist es möglich, für simulierte Klimaänderungen sowie deren Auswirkungen Unsicherheitsbänder bzw. Wahrscheinlichkeiten zuzuweisen.

- Vergleiche zwischen den Ergebnissen der regionalen Klimaprojektionen und Beschreibungen vorhandener Unsicherheiten wurden v.a. basierend auf den ENSEMBLES- und PRUDENCE-Daten in mehreren Studien durchgeführt [z.B. CHRISTENSEN et al. 2007, EKSTRÖM et al. 2007, HAGEMANN et al. 2004, JACOB et al. 2007].
- Vergleichbar wie im ENSEMBLES-Projekt sollen mehr als 20 aktuelle RCM basierend auf den GCM des CMIP5 innerhalb des CORDEX-Projekts¹⁰ („Coordinated regional climate downscaling experiment“) als Teil der Aktivitäten der Task Force on Regional Climate Downscaling (TFRCD) ausgewertet werden [GIORGI et al. 2009, GIORGI 2011]. Für Europa werden dabei Rechenläufe auf einem ca. 10 km-Raster durchgeführt, die Ende 2010 unter Verwendung von Reanalysedaten begonnen haben [JACOB 2010, GOBIET & JACOB 2011]. Die Formatkonventionen sind definiert und die Plattform für die Datenbereitstellung ist bereits im Aufbau¹¹.
- Auch im Rahmen des Projekts RheinBlick2050 erfolgte eine Bewertung der RCM-Ergebnisse des ENSEMBLES-Projekts durch den Vergleich mit Messdaten. Ziel des Projektes RheinBlick2050 war die Erstellung gemeinsamer konsistenter Klima- und Abflussprojektionen für das internationale Rheingebiet, um die zukünftigen Veränderungen hydrometeorologisch relevanter Größen im Rheineinzugsgebiet zu erfassen [GÖRGEN et al. 2010]. Fünf der insgesamt 26 zur Verfügung stehenden regionalen Klimaprojektionen wurden dabei als unplausibel identifiziert, während mit den 21 anderen regionalen Klimaprojektionen Berechnungen durchgeführt wurden. Die Federführung des RheinBlick2050-Projekts lag bei der KHR¹².
- In den Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz (CH2011 2011)¹³ wurde auf Grundlage der ENSEMBLES-Daten und den Emissionsszenarien A2 und A1B sowie einem RCP-Szenario für drei repräsentative Regionen in der Schweiz die Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags für drei Zeiträume des 21. Jahrhunderts berechnet.

7 <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>

8 <http://prudence.dmi.dk/>

9 <http://www.ensembles-eu.org>

10 http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF_RCD_CORDEX.html

11 <http://cordex.dmi.dk/joomla/>

12 <http://www.cbr-kehr.org>

13 <http://cb2011.ch>

- Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat im Rahmen des Projektes ZWEK („Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdatensätzen für die Klimafolgenabschätzung“) vier regionale Klimaprojektionen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland untersucht. Dabei wurden die Simulationsergebnisse der statistischen Modelle WETTREG und STAR sowie die dynamischen Modelle CLM und REMO ausgewertet und gegenübergestellt [RUDOLF et al. 2009]. Ergebnisse der ersten Projektphase z. B. zu den Temperatur- und Niederschlagsdaten sind im Internet¹⁴ oder unter Bundesregierung (2008) verfügbar.
- Der DWD ist ebenfalls im Rahmen des KLIWAS-Projekts¹⁵ beteiligt, um die verfügbaren Klimaprojektionen zu validieren und zu bewerten. Im KLIWAS-Projekt werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und die möglichen Handlungsoptionen behandelt. Um zu belastbaren Aussagen zur Spannweite möglicher Klimaänderungen zu kommen, werden hydrometeorologische Informationen aus einem „Ensemble“ von verschiedenen Klimamodellen verwendet. Projektgebiet sind alle internationalen Stromgebiete mit deutschen Gebietsanteilen, aber die detaillierteren Auswertungen beziehen sich zunächst auf den Rhein [BFG 2008].
- Im Rahmen der Arbeiten des DWD zum Deutschen Klimaatlas¹⁶ werden zur Darstellung der Spannbreiten der zu erwartenden Änderungen statistische Auswertungen von 19 bis 21 (je nach Verfügbarkeit) untersuchten Klimaprojektionen (mit Emissionsszenario A1B) durchgeführt. Dabei werden zum einen die Trends der einzelnen regionalen Klimamodelle für ganz Deutschland angegeben. Zum anderen werden die regionalen Unterschiede innerhalb Deutschlands und die Spannweite der Ensemble-Ergebnisse statistisch als Karten des 15., 50. und 85. Perzentils dargestellt.
Grundlage der Untersuchung ist eine vom DWD durchgeführte weitergehende Regionalisierung der Ergebnisse der ausgewählten Regionalmodelle auf 5x5 km².

Dabei wurden Regionalisierungsverfahren eingesetzt, die auch bei der Bereitstellung eines Referenz-Beobachtungsdatensatzes (HYRAS-Datensatz) durch den DWD verwendet werden.

Die Klimaprojektionen werden vom DWD sowohl hinsichtlich ausgewählter Parameter (Lufttemperatur und Niederschlag) als auch andere abgeleiteter Kennzahlen dargestellt, die möglicherweise Hinweise auf die zu erwartenden Folgen des Klimawandels geben können [IMBERY & NAMYSLO 2011, BECKER et al. 2012]. Für die abgeleiteten Kennzahlen werden allgemeine Größen dargestellt (z. B. Frost- oder Sommertage) sowie Größen, die insbesondere für die stark wetter- und klimaabhängige Landwirtschaft relevant sind (z. B. Maisreife oder Grünlandertrag). Insgesamt können im Klimaatlas des DWD die Ergebnisse von 15 verschiedenen Kennzahlen analysiert werden.

Die Zusammenstellung der regionalen Klimaprojektionen zeigt, dass trotz der Verbesserungen an den globalen und regionalen Klimamodellen die regionalen Effekte der Klimaänderung immer noch nicht eindeutig bestimmbar sind. Insbesondere die möglichen Veränderungen des Niederschlags weisen noch immer ein großes Maß an Unsicherheit auf. Aber auch bei der Lufttemperatur werden noch relativ große Spannbreiten der möglichen zukünftigen Änderungen angegeben.

Die vorliegenden Abweichungen sind sowohl auf die GCM wie auch auf die RCM zurückzuführen. Eine Überprüfung der Genauigkeit der RCM lässt sich durch deren Anwendung mit beobachteten meteorologischen Daten oder mit Re-Analysedaten und dem Vergleich mit dem Beobachtungswerten der Jetztzeit durchführen [TOMASSINI & BÜLOW 2009, ARNOLD et al. 2009].

¹⁴ <http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/other-regional-model-data/zwek/>

¹⁵ <http://www.kliwas.de>

¹⁶ <http://www.dwd.de/klimaatlas>

2.3 Bewertung von regionalen Klimaprojektionen in Baden-Württemberg

Die LUBW beschäftigt sich schon seit vielen Jahren mit den Auswirkungen des Klimawandels, z.B. im Rahmen des Kooperationsvorhabens „Klimaänderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA). Im KLIWA-Projekt der Länder Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes wurden bereits die regionalen Klimaszenarien aus REMO, WETTREG und STAR unter Verwendung des GCM ECHAM4 (Emissionsszenario B2) bezogen auf einzelne Regionen in Süddeutschland detailliert einheitlich ausgewertet und dargestellt [KLIWA 2006, BRONSTERT et al. 2006, GERLINGER 2004].

Auch im Rahmen des Projekts KLARA („Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung“) der LUBW wurden hauptsächlich die Ergebnisse der Modellkette aus ECHAM4 und das statistische Modell STAR verwendet [STOCK 2005].

Nach Vorliegen der Berechnungsergebnisse des GCM ECHAM5 wurden im KLIWA-Projekt Auswertungen und Analysen unter Verwendung des Emissionsszenarios A1B [LUBW & LUWG 2007, LUBW & LUWG 2008, LUBW 2009] mit folgenden Klimaprojektionen durchgeführt:

- Dynamisches Regionalmodell REMO-UBA [JACOB et al. 2008] (horizontale Auflösung 10 x 10 km², Zeitraum 1950-2100)
- Dynamisches Regionalmodell CLM (Version 2.4.11) [HOLLWEG et al. 2008] (horizontale Auflösung ca. 20 x 20 km², Zeitraum 1960-2100)
- Statistisches Modell WETTREG2006 [SPEKAT et al. 2007] (horizontale Auflösung: stationsbezogene Daten, Zeitraum 1950-2100)

Die Ergebnisse dieser regionalen Klimaprojektionen sind für die Fläche der Bundesrepublik Deutschland verfügbar, sie wurden im KLIWA-Projekt aber nur bezogen auf das KLIWA-Untersuchungsgebiet ausgewertet.

Seit 2009 liegen aus einer Weiterentwicklung des WETTREG-Modells („WETTREG2009“) im Auftrag der LUBW und des LUWG neue Daten für den Ist-Zustand und für das Zukunftsszenario vor [LUBW & LUWG 2009a]. Da-

bei wurde das WETTREG-Modell verbessert und z.B. die Zugbahnen von Tiefdruckgebieten („storm tracks“) mit berücksichtigt. Die WETTREG2009-Daten wurden im KLIWA-Projekt bereits im Rahmen der Abflusssimulation für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms analysiert [LUBW 2010a].

Durch die Verwendung von Beobachtungsdaten bei den statistischen Verfahren wird die Genauigkeit für Zeiträume, die zeitlich von der Jetztzeit weit entfernt sind und in denen andere klimatische Bedingungen herrschen, unsicherer. Aktuell liegen WETTREG2010-Daten vor, bei deren Berechnung das Konzept der so genannten Transwetterlagen weiter geführt wurde [KREIENKAMP et al. 2010a, KREIENKAMP et al. 2010b]. Dabei werden die atmosphärischen Zirkulationsmuster um diese Transwetterlagen ergänzt, die in der Gegenwart praktisch nicht auftreten, aber in den Szenarios des antreibenden Modells an Häufigkeit zunehmen. Durch das Einbeziehen der Transwetterlagen soll das Problem der statistischen Verfahren umgangen werden, dass diese Verfahren auf den Beobachtungsdaten und somit dem Wettergeschehen der Jetztzeit aufsetzen.

Gegenüber älteren WETTREG-Versionen liegt die Erwärmung für WETTREG2010 während dieses Jahrhunderts am oberen Rand des durch alle verfügbaren Klimamodelle aufgespannten Korridors. Eine Auswertung der WETTREG2010-Daten im Rahmen des KLIWA-Projekts liegt derzeit nur in einzelnen Teilgebieten vor.

Das nicht-hydrostatische dynamische Regionalmodell CLM wurde mittlerweile umbenannt und weiterentwickelt zu COSMO-CLM. Die derzeitige offizielle Modellversion der CLM-Entwicklergemeinschaft ist die CLM_3-Modellversion. Einzelne Entwicklergruppen haben bereits eine COSMO-CLM_4-Modellversion.

So wurden vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bereits 2009 die räumlich hochaufgelösten Modellergebnisse (7 x 7 km²-Raster) der COSMO-CLM-Version 4.2 bereitgestellt. Zur Vereinfachung der Schreibweise wird im weiteren Text anstelle von COSMO-CLM die Abkürzung CCLM verwendet.

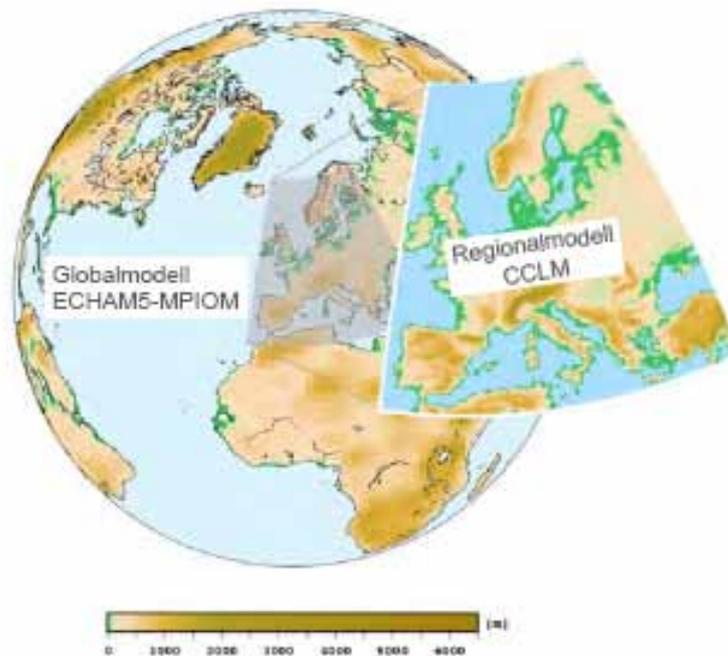


Bild 2-4: Einbettung des Regionalmodells COSMO-CLM in das Globalmodell ECHAM5-OM (nach SGA/MPI-M 2013)

Der Antrieb des CCLM-Modells erfolgt in der Regel durch das GCM ECHAM5 mit dem Ozeanmodell OM (vgl. Bild 2-4).

Da ECHAM eine horizontale Auflösung von ca. 250 km aufweist, würde bei einer direkten Regionalisierung der ECHAM-Daten von der globalen Skala auf die regionale Skala des CCLM-Modells mit $7 \times 7 \text{ km}^2$ ein Skalensprung mit einem Faktor größer als 20 auftreten. Um dies zu vermeiden, werden die Simulationen mit dem CCLM in zwei Regionalisierungsschritten durchgeführt (sogenanntes Zwei-Schritte-Nesting). Zuerst wird eine Simulation auf einem groben Gitter mit $0,44^\circ$ Auflösung (ca. 50 km) durchgeführt, die von den globalen Daten angetrieben wird. Anschließend erfolgt eine weitere Simulation auf einem feinen Gitter mit $0,0625^\circ$ (bzw. ca. 7 km) Auflösung, die ihre Randwerte vom gröberen Gitter erhält (Bild 2-5).

Die CCLM-Ergebnisse der Version 4.2 wurden im Rahmen des KLIWA-Projekts ausgewertet und mit Beobachtungsdaten verglichen [LUBW & LUWG 2009b]. Auf Grund der relativ hohen Übereinstimmung zwischen Beobachtungsdaten und den CCLM-Daten des Ist-Zustands wurden mit den CCLM-Daten der Version 4.2 Wasserhaushaltssimulationen für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms durchgeführt [LUBW 2010a].

Die Simulationen des Modells ECHAM5-OM wurden mit unterschiedlichen Berechnungszeitpunkten gestartet. Die einzelnen Modellrechnungen können sich daher in verschiedenen Phasen der natürlichen Klimavariabilität befinden. Daher liegen für den Antrieb der Regionalmodelle durch das GCM drei verschiedene Ausgangsdatensätze („runs“) vor. Für die vom IMK durchgeführten Berechnungen mit CCLM der Version 4.2 wurde der run1 von ECHAM5-OM ausgewertet. Aktuell sind am IMK Berechnungsergebnisse für die CCLM-Version 4.8 mit ECHAM5-OM und den runs 1, 2 und 3 vorhanden.

Um die Ergebnisse von regionalen Klimaprojektionen zu verbessern, können die Ergebnisse für einzelne Parameter wie z.B. dem Niederschlag einer Datenkorrektur („bias correction“) in einem Post-Prozessing unterzogen werden. Durch die Bias-Korrektur werden die Ergebnisse der Regionalmodelle an die Ergebnisse aus Beobachtungsdaten angepasst. Im RheinBlick2050-Projekt wurden verschiedene Verfahren zur Bias-Korrektur analysiert und verwendet [GÖRGEN et al. 2010].

Die Schwierigkeit bei der statistischen Nachbearbeitung von Klimaprojektionsdaten durch die Bias-Korrektur liegt in der Wahrung der raumzeitlichen Korrelationen der betrachteten meteorologischen Variablen untereinander („Konsistenz der Parameter“) [DEUTSCHLÄNDER et al. 2009].

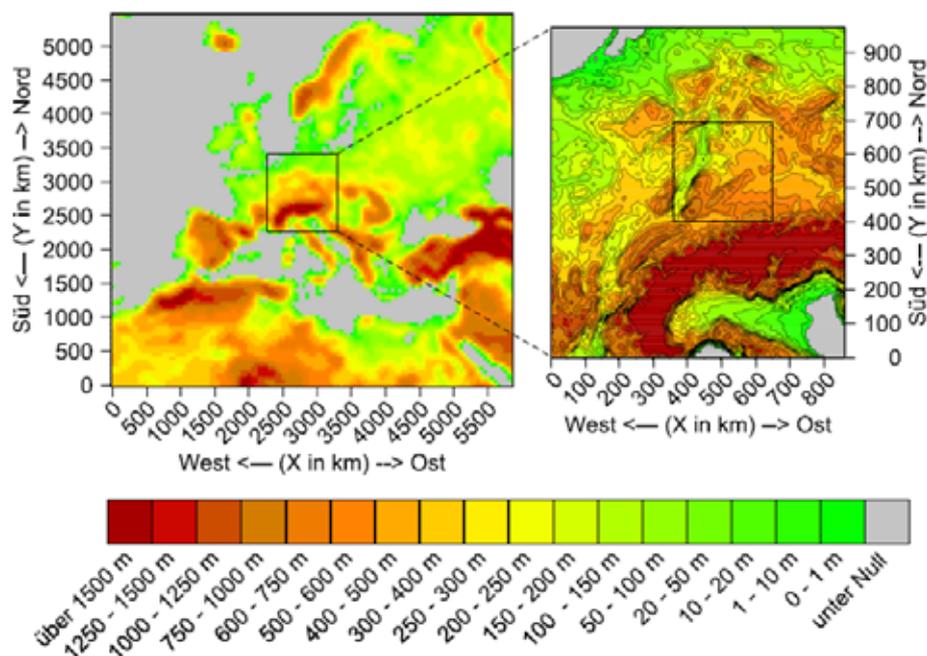


Bild 2-5: Modellgebiet der CCLM-Simulationen des IMK: links erste Nesting-(Regionalisierungs)-Stufe (Auflösung der Orographie: ca. 50 km); rechts zweite Nesting-Stufe (Auflösung der Orographie ca. 7 km) (Enke et al. 2010)

Vom IMK wurden die Berechnungsergebnisse des CCLM-Modells der Version 4.8 für die Lufttemperatur, den Niederschlag und der Globalstrahlung nach Anwendung verschiedener Verfahren der Bias-Korrektur zur Verfügung gestellt [BERG et al. 2012].

Für die Bias-Korrektur mit Hilfe einer linearen Skalierung wird für die Korrektur der Niederschlags- und Lufttemperaturdaten der HYRAS-Datensatz des DWD und für die Korrektur der Globalstrahlung ein Datensatz basierend auf Satellitenmessungen verwendet. Mit diesen CCLM-Daten wurden Wasserhaushaltssimulationen für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms durchgeführt [LUBW & LUWG 2012].

Das IMK ist auch im Projekt PaRK („Probabilistische Abschätzung regionaler Klimaänderungen“) vertreten, welches Teil des baden-württembergischen Projekts „Herausforderung Klimawandel“ war. In diesem Projekt sollte eine wissenschaftliche Methode zur Abschätzung der Klimaentwicklung während der nächsten Dekaden (2010 bis 2030) unter Verwendung mehrerer komplementärer Methoden und Datenquellen (probabilistisch-dynamische Ensemblesimulationen und statistische Downscaling-Verfahren, globale und regionale Modelle) entwickelt und angewandt werden. Im Rahmen dieses Projekts wurden

auch Simulationen mit dem CCLM-Modell unter Verwendung der Globalmodelle CGCM3¹⁷ und HadRM¹⁸ durchgeführt.

Ziel des PaRK-Projekts ist die Ermittlung der „wahrscheinlichsten Entwicklung einschließlich der Unsicherheiten“. Das Projekt wurde vom IMK koordiniert und hat als Projektpartner das meteorologische Institut der Universität Bonn und die CEC GmbH in Potsdam [PANITZ et al. 2009]. Ergebnisse des 2010 beendeten Projekts finden sich z.B. in LUBW (2010b) oder ENKE et al. (2010).

Die CCLM-Daten wurden auch vom IMK für die Bearbeitungen im Rahmen des CEDIM-Projekts „Hochwasser im Klimawandel“ bereitgestellt [SCHÄDLER et al. 2012].

Eine Zusammenstellung der derzeitigen Ergebnisse und Konsequenzen der auf Baden-Württemberg ausgerichteten Projekte KLIWA, KLARA und „Herausforderung Klimawandel“ ist in UM & LUBW (2012) verfügbar. Darin sind auch konkret auf Baden-Württemberg bezogene Vorüberlegungen zu Anpassungsstrategien enthalten. Für den Bereich der Anpassungsstrategien liegen zudem vom

17 <http://www.ec.gc.ca/ccmac-ccma/default.asp?lang=En&n=4A642EDE-1>

18 <http://www.metoffice.gov.uk/climate-change/resources/badley>

Umweltbundesamt (UBA) umfangreiche Untersuchungen vor [z.B. ZEBISCH et al. 2005] bzw. besteht mit KomPass¹⁹ ein eigenes fortlaufendes Projekt des UBA.

Die Forschungsergebnisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Verwendung einer Modellkette bestehend aus **einem** Emissionsszenario, **einem** GCM und **einem** Regionalisierungsverfahren nicht ausreicht, das Spektrum der möglichen Klimaänderungen eindeutig zu beschreiben.

Die Unsicherheiten in den Modellen und Annahmen sind auch weiterhin so groß, dass es zuverlässiger erscheint, eine Ergebnisbandbreite durch die Anwendung verschiedener Modelle (Ensemble) zu erhalten.

Werden den Regionalmodellen komplexe Wirkmodelle (z.B. Wasserhaushaltsmodelle) nachgeschaltet, kann aufgrund des hohen Aufwands der Ensembleansatz bislang nur mit einer begrenzten Anzahl von Klimaprojektionen durchgeführt werden. Hier empfiehlt sich die Auswahl einer am besten geeigneten Klimaprojektion anhand von definierten Kriterien, um Aussagen zu den zukünftig zu erwartenden Veränderungen zu erhalten [IKSR 2011]. Dies wird z.B. im KLIWA-Projekt umgesetzt [KLIWA 2006]. Auch die Vorgabe fester Klimaszenarien (z.B. zukünftige Temperaturerhöhung um 1 °C [KNMI 2006]) ist ein möglicher Weg, um Aussagen zu den zukünftig zu erwartenden Veränderungen zu erhalten [IKSR 2011].

Da bei den Ensemble-Rechnungen nicht nur eine Simulation zur Ermittlung des Klimaänderungssignals, sondern eine ganze Reihe von Simulationen durchgeführt wird, sind diese Ensemble von Simulationen statistisch auszuwerten. Hierdurch werden nicht nur Erkenntnisse über den vermutlich wahrscheinlichsten Wert gewonnen, sondern auch über die Unsicherheit des Ergebnisses. Somit werden wichtige Informationen zur Beurteilung des Änderungssignals bereitgestellt.

Zur Erzeugung von Ensembles werden verschiedene Ansätze verwendet [LUBW 2010b]:

- Multi-Modell-Ensembles: es werden die Simulationen verschiedener GCM oder RCM verwendet.
- Anfangswert-Ensemble: die Modelle werden zu verschiedenen Startzeitpunkten initialisiert. Somit können sich die einzelnen Modellrechnungen in verschiedenen Phasen der natürlichen Klimavariabilität befinden.
- Randwert-Ensemble: Für die regionalen Klimaprojektionen werden verschiedene globale Modelle als Antrieb verwendet.
- „Perturbed Physics Ensemble“: Gewisse physikalische Prozesse werden in den dynamischen Modellen durch Parametrisierungen vereinfacht. Diese Parametrisierungen in den Modellen werden verändert.

Der Ensemble-Ansatz wird auch im KLIWA-Projekt verstärkt umgesetzt [WEBER 2009]. So wurden z.B. für die Auswertungen der CCLM-Version 4.8 des IMK im Rahmen des KLIWA-Projekts die drei zur Verfügung stehenden runs des ECHAM5-Modells verwendet (Anfangswert-Ensemble), um die Initialisierungsunsicherheit besser bewerten zu können [GERLINGER & MEUSER 2013].

Da im KLIWA-Projekt bereits verschiedene Klimaprojektionen ausgewertet wurden, ergibt sich in der Zusammenchau ebenfalls ein Modellensemble.

In der vorliegenden Untersuchung werden neben den im KLIWA-Projekt verwendeten Klimaprojektionen noch weitere regionale Klimaprojektionen in ein Ensemble aufgenommen. Dieses Vorgehen ermöglicht es zum einen, die Ergebnisse aus vorliegenden Projekten wie z.B. KLIWA im Vergleich mit den anderen Mitgliedern des Ensembles einzuordnen.

Zum anderen können die internen Variabilitäten und Modellunsicherheiten bei der Betrachtung eines Ensembles aus einer größeren Anzahl von Mitgliedern in Form einer Ergebnisspanne besser abgeschätzt werden. Die Verwendung eines Ensemble-Ansatzes wird u.a. auch vom IPCC (2007), dem EU-Guidance-Dokument 24 [EUROPEAN COMMUNITIES 2009] sowie im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie [BUNDESREGIERUNG 2008] empfohlen.

¹⁹ http://www.anpassung.net/chn_115/nn_701050/DE/Home/homepage_node.html?_nnn=true

2.4 Unsicherheiten innerhalb der Modellkette

Jeder Baustein der Modellkette vom Globalmodell zum Regionalmodell enthält Unsicherheiten, die zu der Gesamt-Unsicherheit der regionalen Klimaprojektion beitragen. Um den Einfluss der einzelnen Bausteine besser zu verstehen, ist es hilfreich, die relative Bedeutung der einzelnen Unsicherheitsquellen zu erfassen und möglichst zu quantifizieren.

Die Unsicherheiten innerhalb der Modellkette lassen sich auf folgende Hauptursachen zurückführen:

- Durch die chaotische Dynamik des Klimas überlagern die natürlichen Klimaschwankungen die anthropogen verursachten Veränderungen.
- Aufgrund der Komplexität des Klimas sind die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bisher nicht vollständig erfasst. Somit können Klimamodelle die zukünftigen Entwicklungen nicht vorhersagen, sondern lediglich wahrscheinliche Bandbreiten von Veränderungen projizieren.
- Der Antrieb des Klimawandels erfolgt durch die Treibhausgase, die in der Zukunft ausgestoßen werden. Deren Menge kann aber nur abgeschätzt werden, da sie direkt durch Faktoren wie die wirtschaftliche Entwicklung und die Ergebnisse internationaler Klimaverhandlungen abhängt, die nicht vorhersehbar sind. Hier müssen sich Klimaforscher mit Annahmen und Szenarien behelfen.
- Die regionalen Auswirkungen von Klimaveränderungen auf natürliche Systeme, wie z.B. den Wasserhaushalt, sind hochkomplex und werden noch erforscht. Eine besondere Rolle hierbei spielen Kippunkte des Klimasystems.

Die Vergrößerung der Unsicherheit in der Modellkette von globalen Klimaszenarien zu regionalen Klimafolgen und Maßnahmen ist in Bild 2-6 dargestellt. Somit können sich einzelne Unsicherheiten ausgleichen, aber auch aufaddieren. Daher ist es wichtig zu analysieren, welcher Baustein der Modellkette welchen Anteil an der Unsicherheit der gesamten Modellkette beisteuert.

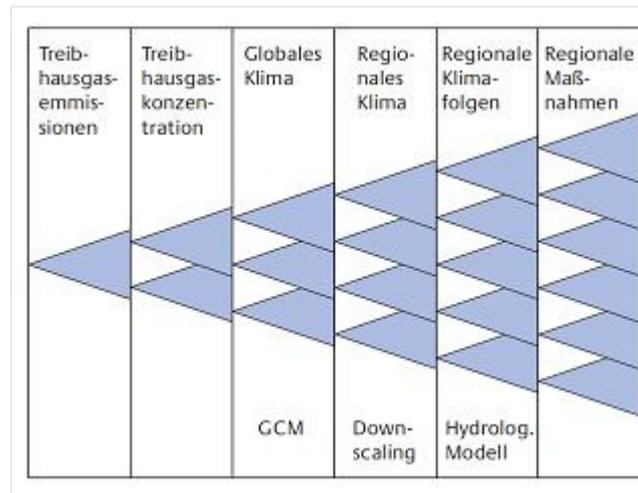


Bild 2-6: Vergrößerung der Unsicherheiten innerhalb der Modellkette [nach Viner 2002]

So zeigte die Verwendung der Ergebnisse der verschiedenen Regionalmodelle zur Modellierung des Abflusses, dass die Auswahl des antreibenden Globalmodells einen größeren Einfluss hat als die Wahl des Emissionsszenarios oder des Regionalmodells [GRAHAM et al. 2007, NOBREGA et al. 2011, GOBIET & JACOB 2011]. Ein Auswertungsschema, mit dem verschiedene Unsicherheitsquellen innerhalb der Modellkette in ihrer relativen Bedeutung für die Bandbreite der Abflussprojektionen bewertet werden können, findet sich z.B. in KRAHE et al. (2009).

Um die Unsicherheit der Regionalmodelle abzuschätzen, können die Auswertungen für den Ist-Zustand mit zwei unterschiedlichen Datensätzen für den Antrieb des Regionalmodells durchgeführt werden: zum einen können die Daten des GCM, zum anderen können Re-Analysedaten verwendet werden. Re-Analysedaten werden auf Grundlage von Beobachtungsdaten erstellt, so dass die Ergebnisse des Laufs mit Re-Analysedaten weniger stark von der Realität abweichen als die des Laufs mit GCM-Daten. Werden somit beide Auswertungen für den Ist-Zustand durchgeführt, kann der Einfluss des GCM und die Güte des RCM abgeschätzt werden.

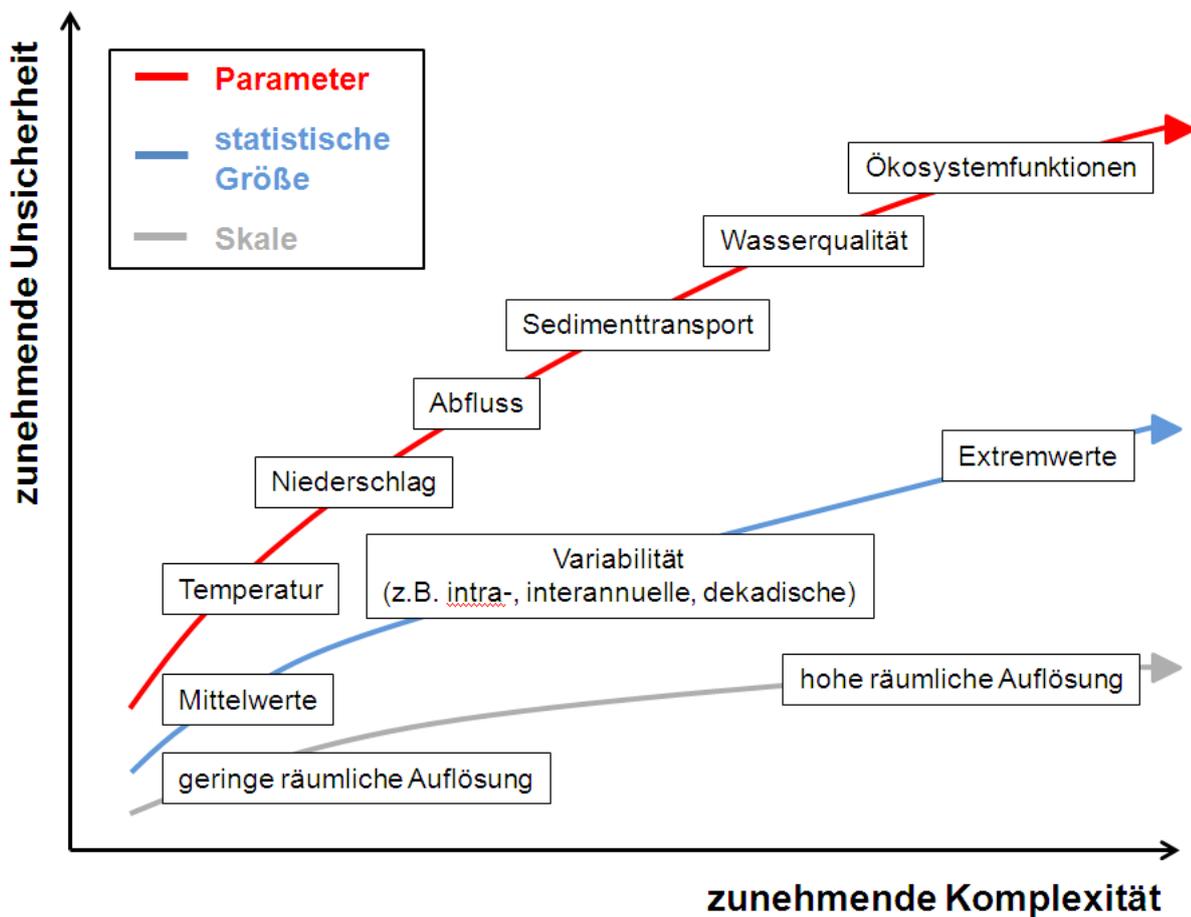


Bild 2-7: Zunahme der Unsicherheit mit der Komplexität der Vorhersagezielgrößen [nach PIANC 2008]

Eindeutig ist, dass mit zunehmender Komplexität der Zielgröße, für die eine Aussage in Folge des Klimawandels gewünscht wird, auch die Unsicherheit der Projektion zunimmt. Dies gilt für komplexe Ökosysteme wie aber auch für Extremwerte oder kleine räumliche Skalen (Bild 2-7). Bei einer Interpretation der Ergebnisse dieser Untersuchung muss dieser Zusammenhang zwischen Komplexität/räumlicher Skala und Unsicherheit berücksichtigt werden.

Durch die Anwendung eines Multi-Model-Ensemble-Ansatzes, bei dem mehrere GCM und Regionalisierungsverfahren angewandt werden, können die jeweiligen Unsicherheiten besser erfasst und bewertet werden [vgl. JACOB et al. 2012]. Die Kombination der verschiedenen Global- und Regionalmodelle in dieser Untersuchung hat den Vorteil, außer einem multimodel-Ensemble als auch ein Anfangswert- und Randwert-Ensemble abzudecken. Damit können auch die Einflüsse der verschiedenen Glieder der Modellkette untersucht werden.

Somit ist der hier vorgestellte Ensemble-Ansatz ein Weg, um mit den noch bestehenden Unsicherheiten und Streuungen in den Klimaprojektionen umzugehen.

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Unsicherheiten bieten zahlreiche mögliche Auswertungsvarianten. Daher wird hier zunächst eine erste Einschätzung der Unsicherheit durch den Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Regionalmodelle durchgeführt. Die Auswertung umfasst zum einen den Vergleich der Simulation des Ist-Zustands mit den Beobachtungswerten. Dabei liegen hier nur Ergebnisse von Regionalmodellen vor, die mit GCM-Daten und nicht mit Re-Analysedaten angetrieben wurden. Zum anderen werden die Ergebnisse der Regionalmodelle jeweils gruppiert betrachtet (z.B. alle Modelle mit ECHAM als GCM im Vergleich zu den Regionalmodellen mit RCA) und für die Zeiträume der Zukunftsszenarien ausgewertet. Diese Auswertungen finden sich im Kapitel 5.4.

3 Ausgewählte regionale Klimaprojektionen in Baden-Württemberg

3.1 Überblick über die regionalen Klimaprojektionen

Für die Abschätzung der Klimaänderung auf der regionalen Ebene von Baden-Württemberg werden verschiedene Klimaprojektionen ausgewertet. Es wird somit der Ensemblesansatz verfolgt, wobei sowohl ein Multi-Model-Ensemble (Auswahl verschiedener GCM und RCM) und eine Anfangswert-Ensemble (Auswahl verschiedener runs eines GCM) umgesetzt werden.

Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden regionalen Klimaprojektionen in Baden-Württemberg wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber eine erste Auswahl von 30 Klimaprojektionen getroffen. Darunter war für die Auswertung auch die Klimaprojektion aus dem Globalmodell des Hadley-Centers mit dem CCLM-Modell vorgesehen, welche aber vom IMK nicht zur Verfügung gestellt werden konnte. Dadurch wurden statt 30 Klimaprojektionen 29 Klimaprojektionen zunächst aufbereitet und ausgewertet. Aus diesem Gesamt-Ensemble wurde dann eine Auswahl von Klimaprojektionen getroffen, die detaillierter ausgewertet werden.

Eine Übersicht der 29 Klimaprojektionen, ihre ursprüngliche und auszuwertende Auflösung und die im weiteren Bericht und in den Anlagen verwendeten Kürzel zur Bezeichnung der Klimaprojektionen finden sich in Tabelle 3-1. Die Kürzel bestehen zunächst aus einem Buchstaben für das Globalmodell (beim ECHAM-Modell ergänzt um die Angabe des runs, bei den Hadley-Center-Modellen ergänzt durch die Angabe der Version). Anschließend folgt in den Kürzeln eine Bezeichnung für das Regionalmodell (beim CCLM-Modell ergänzt um die Angabe der räumlichen Auflösung).

In der Tabelle in Anlage A-01 sind umfassendere Informationen zu den 29 Klimaprojektionen (wie z.B. Entwickler, Herkunftsland, Referenz, Quelle) aufgeführt. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die 29 regionalen Klimaprojektionen gegeben, der in Kapitel 3.2 vertieft wird:

- Daten aus ENSEMBLES (15 Klimaprojektionen): Die Daten aus 15 Klimaprojektionen aus dem ENSEMBLES-Projekt (25x25 km²-Rasterdaten) sind frei verfügbar und wurden von der entsprechenden Internetseite heruntergeladen.
- CCLM-Daten der Version 4.8, Bias-Korrektur durch lineare Skalierung (CCLM-4.8 ls) (acht Klimaprojektionen). Für die Berechnung der CCLM-Daten wurden verschiedene Globalmodelle verwendet, so dass folgende Modellvarianten verfügbar sind:
 - a. CCLM-Modell mit Globalmodell ECHAM5 (run1, run2 und run3): Diese drei Datensätze wurden vom IMK zur Verfügung gestellt und für die Wasserhaushaltsmodellierungen im KLIWA-Projekt umformatiert.
 - b. CCLM-Modell mit Globalmodell CGCM3: Dieser Datensatz wurde zudem vom IMK bereitgestellt und anschließend umformatiert.Für alle CCLM-Ergebnisse wurde bereits vom IMK eine Bias-Korrektur für Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung mittels linearer Skalierung durchgeführt. Insgesamt ergeben sich acht Klimaprojektionen des CCLM-Modells, da die CCLM-Daten sowohl in der vom IMK verwendeten Auflösung 7x7 km² als auch in der aggregierten Auflösung 25x25 km² (vergleichbar wie die Daten aus ENSEMBLES) ausgewertet werden.
- REMO-Rechenlauf (eine Klimaprojektion): Der mit REMO durchgeführte Rechenlauf für das Umweltbundesamt wurde von der CERA-Datenbank heruntergeladen und umformatiert. Der Datensatz steht in einer räumlichen Auflösung von 10x10 km² und als Stundenwerte zur Verfügung.
- WETTREG (drei Klimaprojektionen): Neben der Analyse der dynamischen Modelle wurden auch die Ergebnisse des statistischen Modells WETTREG zum Vergleich und zur Ergänzung herangezogen. Für WETTREG liegen regionale Klimaprojektionen aus verschiedenen Modellversionen vor, die entsprechend des Jahrs ihrer Veröffentlichung gekennzeichnet werden [KREIENKAMP et al. 2010A]. Hier werden die WETTREG-Daten 2003, 2006 und 2010 analysiert. Alle WETTREG-Modelldaten liegen als Stationsdaten vor.

Tabelle 3-1: Ausgewählte 29 regionale Klimaprojektionen des Gesamt-Ensembles (mit Auflösung und Kürzel)

SRES-Szenario	GCM	RCM	Original-Auflösung	Ausgewertete Auflösung	Kürzel
A1B	HadCM3Q0	CLM 2.4.6	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q0_CLM
		HadRM3Q0	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q0_H3Q0
	HadCM3Q16	HadRM3Q16	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q16_H3Q16
		C4IRCA3	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q16_RCA
	HadCM3Q3	HadRM3Q3	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q3_H3Q3
		SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q3_RCA
	BCM	SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	B_RCA
		HIRHAM5	25x25 km ²	25x25 km ²	B_HIRHAM5
	ARPEGE	HIRHAM5	25x25 km ²	25x25 km ²	A_HIRHAM5
		RM5.1	25x25 km ²	25x25 km ²	A_RM5.1
	ECHAM5-r3	SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_RCA
			REGCM3	25x25 km ²	25x25 km ²
		RACMO2.1	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_RACMO2
			REMO 5.7	25x25 km ²	25x25 km ²
		HIRHAM5	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_HIRHAM5
			CCLM-4.8 ls#	7x7 km ²	25x25 km ²
		CCLM-4.8 ls#	7x7 km ²	7x7 km ²	E3_CCLM-7
			ECHAM5-r2	CCLM-4.8 ls#	7x7 km ²
	ECHAM5-r1	CCLM-4.8 ls#	7x7 km ²	7x7 km ²	E2_CCLM-7
			CLM 2.4.11	20x20 km ²	25x25 km ²
CCLM-4.8 ls#		7x7 km ²	25x25 km ²	E1_CCLM-25	
		CCLM-4.8 ls#	7x7 km ²	7x7 km ²	E1_CCLM-7
REMO 2005		10x10 km ²	25x25 km ²	E1_REMO	
		CLM 2.4.11	20x20 km ²	25x25 km ²	E1_CLM
WETTREG2006		Stationen	25x25 km ²	E1_WETTREG06	
		WETTREG2010	Stationen	25x25 km ²	E1_WETTREG10
CGCM3	CCLM-4.8 ls#	7x7 km ²	25x25 km ²	C_CCLM-25	
	CCLM-4.8 ls#	7x7 km ²	7x7 km ²	C_CCLM-7	
B2	ECHAM4	WETTREG2003#	Stationen	25x25 km ²	E_WETTREG03

#: Klimaprojektion nicht für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) verfügbar

Alle aufgeführten Klimaprojektionen basieren auf dem SRES-Emissionsszenario A1B. Der Vergleich des Verlaufs des Anstiegs der Emissionen in den letzten Jahren mit den Annahmen in den Emissionsszenarien zeigt, dass das Emissionsszenario A1B relativ gut mit dem tatsächlichen Anstieg übereinstimmt und somit als Trendfortschreibung betrachtet werden kann (Bild 3-1).

In Folge neuerer Anforderungen wurden die SRES-Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre zu den sogenannten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) weiterentwickelt [MOSS et al. 2008, TREBER 2008, MOSS et al. 2010, VAN VUUREN et al. 2011]. Die neuen vier RCP-Szenarien sollen die bisherigen SRES-Szenarien ablösen und dem 5. Sachstandsbericht des IPCC zugrunde liegen, der voraussichtlich 2014 erscheinen wird. Auf der

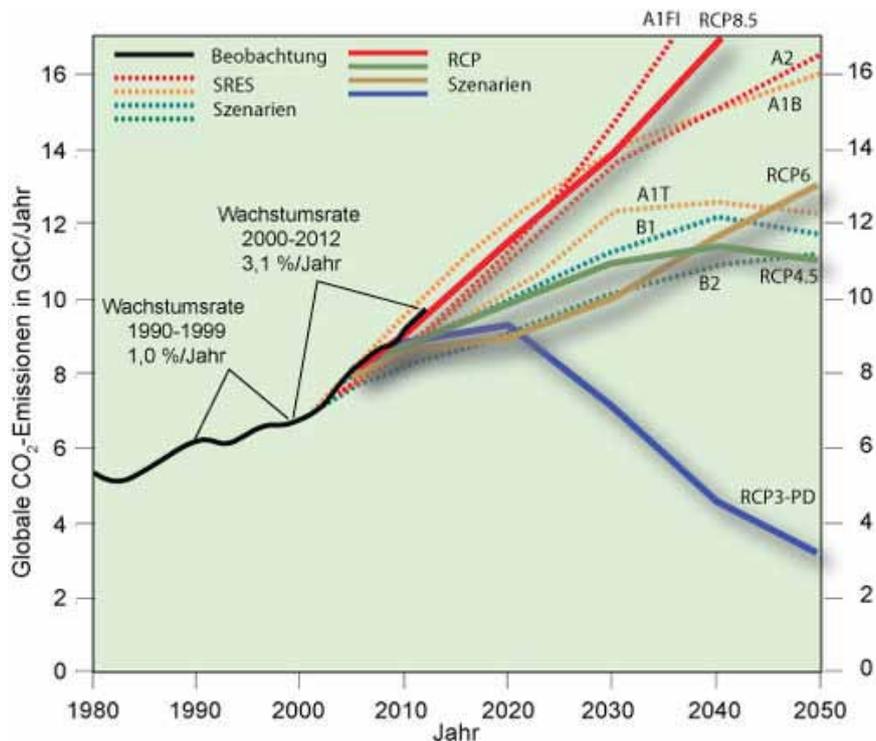


Bild 3-1: Verlauf der CO₂-Emissionen aus den SRES-Emissionsszenarien und den RCP-Szenarien im Vergleich zum tatsächlichen Anstieg (Bildungserver 2013)

Basis der RCP-Szenarien werden zurzeit neue globale Klimasimulationen und anschließend neue regionale Klimaprojektionen gerechnet.

Bild 3-1 zeigt die Entwicklung der CO₂-Konzentrationen der RCP-Szenarien im Vergleich zu den SRES-Szenarien. Dabei stellt das RCP8.5-Szenario die Obergrenze der möglichen Entwicklungen auf. Je nach betrachteter Kenngröße (Strahlungsantrieb, CO₂-Emission) liegt das A1B-Szenario näher an RCP6 oder näher an RCP8.5. Da erst jetzt mit den RCP-Szenarien Modellberechnungen und Auswertungen durchgeführt werden, wird es einige Zeit dauern, bis aussagekräftige Ergebnisse und Erfahrungen vorliegen. Aus diesem Grund sind die vorliegenden Ergebnisse auf Basis des SRES-Szenarios A1B weiterhin aktuell.

Die WETTREG2003-Daten, die schon etwas älter sind, basieren anstelle auf dem SRES-Emissionsszenario A1B auf dem Emissionsszenario B2. Allerdings sind die Auswirkungen beziehungsweise die Folgen für die Klimaparameter beider Emissionsszenarien für die nahe Zukunft bis zum Jahr 2050 vergleichbar (IPCC 2001, ENKE et al. 2008). Auch das zu Grund liegende ältere Globalmodell ECHAM4 gilt auch heute noch als qualitativ vergleichbar

zum aktuellen ECHAM5-Modell [BUND-LÄNDER-FACHGESPRÄCH 2010].

Auf diese Weise ist ein Vergleich der ECHAM4- und ECHAM5-Modellversion sowie der unterschiedlichen WETTREG-Ergebnisse gegeben. Dafür wird in Kauf genommen, dass die WETTREG2003-Daten abweichend vom übrigen Datensatz auf dem Emissionsszenario B2 beruhen. Für die Darstellung von Bandbreiten möglicher Änderungen ist ein Ensemble von mehreren Szenarien zulässig [BUND-LÄNDER-FACHGESPRÄCH 2010].

Da sich bei der Auswertung der Klimaprojektionen zeigte, dass die Ergebnisse der ECHAM4-WETTREG2003-Klimaprojektion meist gut zu den anderen Klimaprojektionen passen, wird diese Klimaprojektion im Weiteren gemeinsam mit den Klimaprojektionen auf Basis des A1B-Szenarios betrachtet.

3.2 Beschaffung und Aufbereitung der regionalen Klimaprojektionen

Das Gesamt-Ensemble der 29 regionalen Klimaprojektionen lag zunächst in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen vor. Um die Klimaprojektionen miteinander vergleichen zu können, war es daher erforderlich, von der Original-Auflösung der Daten zu einer einheitlichen Auflösung für alle Klimaprojektionen für die Auswertung zu kommen. Daher wurden die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen auf ein einheitliches Raster mit $25 \times 25 \text{ km}^2$ Auflösungen überführt, wie es im ENSEMBLES-Projekt verwendet wurde.

Dazu wurden die einzelnen Datensätze mit Hilfe bilinearer Interpolation auf das gemeinsame Raster interpoliert. Lediglich die WETTREG-Stationsdaten und die Stationsdaten der Messwerte wurden unter Verwendung eines Kriging-Interpolations-Verfahrens (External Drift Kriging) auf das gemeinsame Raster regionalisiert.

Für die vier Klimaprojektionen des CCLM-Regionalmodells werden zusätzlich die Daten in der Original-Auflösung des $7 \times 7 \text{ km}^2$ -Raster analysiert, um auch regionale Aussagen über die Verteilung der Klimagrößen in Baden-Württemberg treffen zu können. Somit werden die zwei räumlichen Auflösungen $25 \times 25 \text{ km}^2$ und $7 \times 7 \text{ km}^2$ untersucht.

Für alle 29 Klimaprojektionen wurden die Daten für die drei jeweils 30 Jahre umfassenden Zeiträume des Ist-Zustands 1971 bis 2000 und des Zukunftsszenarios 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 heruntergeladen. Die Daten des CCLM- und des WETTREG2003-Modells liegen allerdings nur bis 2050 vor, so dass nur die nahe Zukunft 2021 bis 2050 aufbereitet wurde. Dies führt dazu, dass das Ensemble für die nahe Zukunft aus mehr regionalen Klimaprojektionen besteht als das Ensemble für die ferne Zukunft.

Somit unterscheiden sich die verfügbaren Zeiträume der regionalen Klimaprojektionen, ihre räumliche Auflösung und ihre Formate:

- Die acht ausgewählten regionalen Klimaprojektionen des CCLM-Modells werden quantitativ für den Zeitraum des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021 bis 2050) ausgewertet.

Die CCLM-Daten des IMK sind im netCDF-Format in binärer Form und wurden vor ihrer Weiterverarbeitung umfangreich bearbeitet (z.B. Umstellung des Raum-Zeitbezugs, Auswahl des Modellausschnitts). Alle CCLM-Modelldaten wurden direkt vom IMK zur Verfügung gestellt.

Grundlegende Arbeiten zur Aufbereitung der CCLM-Daten auf Basis des ECHAM5-Modells mit den drei runs wurden bereits im Rahmen eines KLIWA-Projekts durchgeführt. Bei den CCLM-Daten wurden innerhalb dieser Untersuchung noch die CCLM-Ergebnisse auf Grundlage des Globalmodells CCGM aufbereitet.

Um die Ergebnisse des CCLM-Modells mit den Daten der anderen regionalen Klimaprojektionen vergleichen zu können, werden die CCLM-Daten außer in ihrer ursprünglichen Auflösung von $7 \times 7 \text{ km}^2$ auch aggregiert auf die Rastergröße der ENSEMBLES-Daten mit $25 \times 25 \text{ km}^2$ analysiert.

- Die Aufbereitungen der 15 Klimaprojektionen der ENSEMBLES-Daten waren relativ aufwendig, da die Daten im netCDF-Format nicht einheitlich vorliegen (unterschiedliche Koordinatensysteme, Zeitachsen, ...). Diese Daten wurden bei der ENSEMBLES-Projektstelle besorgt. Anschließend wurden die 15 Klimaprojektionen aufgrund ihres uneinheitlichen Formats auf ein einheitliches Format angepasst und umgerechnet.

Die 15 Klimaprojektionen des ENSEMBLES-Projekts liegen für ein $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Modellraster vor. Die ENSEMBLES-Daten wurden auf das gemeinsame Modellgitter innerhalb Baden-Württemberg projiziert. Neben dem Ist-Zustand und dem Zeitraum der nahen Zukunft 2021-2050 wird auch der Zeitraum der fernen Zukunft 2071 bis 2100 ausgewertet und analog aufbereitet.

- Die Klimaprojektion des REMO-Rechenlaufs (ECHAM5 run1), die in der Auflösung 10x10km² vorliegt, wurde ebenfalls auf das Modellgitter der Größe 25x25km² aggregiert und jeweils für die zwei Zeiträume des Zukunftsszenarios sowie für den Ist-Zustand ausgewertet.

Da die REMO-Klimaprojektion als Stundenwerte bis zum Jahr 2100 vorliegt, wurden umfangreichere Datenmengen heruntergeladen. Diese wurden dann zu Tageswerte aggregiert, um die Vergleichbarkeit zu den anderen Klimaprojektionen herzustellen. Die Daten der anderen Klimaprojektionen liegen bereits als Tageswerte vor.

- Ebenfalls ausgewertet werden die Ergebnisse der zwei CLM-Modellszenarien, wieder jeweils für die zwei Zeiträume des Zukunftsszenarios sowie für den Ist-Zustand. Die CLM-Modelldaten, die ursprünglich auf einem 20x20 km²-Raster vorliegen, wurden auch auf das 25x25 km²-Raster aggregiert.

- Neben den Daten der dynamischen Regionalmodelle CCLM, REMO und CLM sowie der dynamischen Modelle aus ENSEMBLES werden auch die Ergebnisse des statistischen WETTREG-Modells ausgewertet. Die Aufbereitung und Analyse der WETTREG-Daten war weitaus umfangreicher als bei den Daten der dynamischen Modelle, da für einen Zeitraum WETTREG-Daten mit jeweils 10 Realisationen vorliegen, d.h. zehn Datensätze, wobei jede Realisation mit der gleichen Wahrscheinlichkeit eintritt. Zudem liegen bei den WETTREG2006-Daten für jede Dekade zwei Simulationen vor. Durch diesen Datenumfang der WETTREG-Daten soll die Klimavariabilität besser beschrieben werden.

Somit umfassen die WETTREG2006-Daten für den Ist-Zustand und die nahe und ferne Zukunft nicht insgesamt 90 Jahre wie die dynamischen Modelle, sondern 9 Dekaden * 10 Realisationen * 2 Simulationen * 10 Jahre pro Dekade = jeweils 1.800 Jahre Modelldaten.

Bei den WETTREG2010-Daten werden transiente Zeitreihen für 10 Realisationen verwendet. Dabei umfasst im Gegensatz zu den WETTREG2006-Daten jede Dekade 10 Jahre, also eine Simulation.

Der Datenumfang bei den WETTREG2003-Daten ist geringer. Die WETTREG2003-Daten liegen nicht für die ferne Zukunft vor und enthalten auch nur 10 Realisationen für die nahe Zukunft, aber nicht für den Ist-Zustand.

Alle WETTREG-Daten wurden vollständig ausgewertet, d.h. es werden alle 10 Realisationen verwendet und als 10 einzelne Klimaprojektionen behandelt. Anschließend wurden diese 10 Klimaprojektionen gemittelt, um für jede der drei WETTREG-Datensätze die gewünschten Abbildungen zu erstellen und die Analysen durchzuführen.

Die WETTREG-Daten wurden von der LUBW bzw. von CEC Potsdam zur Verfügung gestellt.

Die WETTREG-Daten liegen nicht wie die Ergebnisse der dynamischen Regionalmodelle als flächendeckende Modellraster vor, sondern nur stationsbezogen. Daher kann die Auswertung der WETTREG-Daten erst nach Umrechnung auf die Fläche der 25x25 km²-Raster erfolgen.

Für die Umrechnung der WETTREG-Daten auf das 25x25 km²-Raster wurde ein recht aufwändiges External-Drift-Kriging-Verfahren eingesetzt. Die notwendigen Algorithmen stammen aus dem im Internet frei zugänglichen Softwarepaket GSLIB (Geostatistical Software Library and User's Guide) (Deutsch & Journel 1998). Die zu interpolierenden Parameter sind neben der Nähe zu verwendeten Stationen in erster Linie von der Geländehöhe abhängig. Entsprechend wird als abhängige Größe („Drift-Größe“) die Geländehöhe verwendet. So wird eine sinnvolle Regionalisierung der Stationsdaten auf die Landesfläche von Baden-Württemberg gewährleistet.

Auch für die WETTREG-Daten werden getrennt voneinander Auswertungen für die zwei Zeiträume des Zukunftsszenarios sowie für den Ist-Zustand durchgeführt (mit Ausnahme der WETTREG2003-Daten, die nicht für die ferne Zukunft vorliegen).

Zusätzlich zu den regionalen Klimaprojektionen werden als Vergleichsbasis gemessene Daten des Zeitraums des Ist-Zustands an Stationen verwendet. Als Vergleichsgrundlage für die Beobachtungsdaten liegen für Baden-Württemberg die Stationsdaten von 318 Niederschlagsstationen und davon 79 Klimastationen mit minimalen und maximalen Tagestemperaturen für den Ist-Zustand zur Verfügung. Diese Stationsmessungen sind die für WETTREG2010 ausgewählten und qualitätsgeprüften Messstationen und wurden von CEC Potsdam zur Verfügung gestellt.

Die Stationsdaten wurden ebenfalls auf das 25x25 km² Raster des ENSEMBLES-Datensatzes interpoliert, um eine einheitliche Grundlage für die Auswertungen zur Verfügung zu haben. Dies geschieht wie bei den WETTREG-Daten unter Verwendung eines External-Drift-Kri-ging-Verfahrens, bei dem die Geländehöhe mit einbezo-gen wird.

Der auszuwertende Zeitbereich für die Klimaprojektionen ist der Ist-Zustand (1971-2000), die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100). Für alle Klima-projektionen wurden entsprechend diese Zeitbereiche auf-bereitet. Für folgende Datensätze gibt es Ausnahmen:

- Die Stationsmessungen liegen nur für den Zeitbereich des Ist-Zustands vor.
- Für die CCLM-Daten und die WETTREG2003-Daten existieren keine Daten für die ferne Zukunft, sondern nur für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft.
- Einige ENSEMBLES-Datensätze reichen nur bis zum Jahr 2099 anstatt 2100:
 - H3Q0_CLM
 - H3Q16_RCA
 - B_HIRHAM5
 - E1_HIRHAM5

Außerdem gibt es unterschiedliche Zeitstempel bei eini-gen Klimaprojektionen:

- Die WETTREG-Daten liegen grundsätzlich ohne Schaltjahre vor
- In den folgenden Klimaprojektionen des Hadley-Glo-balmodells haben alle Monate 30 Tage:
 - H3Q0_CLM
 - H3Q0_H3Q0
 - H3Q3_H3Q3
 - H3Q3_RCA
 - H3Q16_H3Q16

Durch die unterschiedliche Tageszahl eines Monats, durch das fehlende Jahr 2100 oder durch fehlende „Schalttage“ bei einigen Modellen sind keine Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Klimapro-jektionen über längere Zeiträume zu erwarten, da die Mit-tel über Zeiträumen von 30 Jahren betrachtet werden.

Tabelle 3-2: Ausgewertete 28 Kennzahlen

Temperatur		Niederschlag	
Jahresmitteltemperatur		Niederschlagssumme im Jahr	
Heiztag		Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalb-jahr	
Kühlgradtage		Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalb-jahr	
Vegetationsbeginn		Anzahl der Tage ohne Niederschlag	
Tropennacht		Anzahl der Tage mit Starkniederschlag	
Frosttag		Starkniederschlags-Höhe	
Datum letzter Frost		Niederschlagssumme im meteorologischen Frühjahr	
Heißer Tag (Tropentag)		Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode	
Sommertag		Trockenperioden in der Vegetationsperiode	
Eistag		Längste Dauer von Trockenperioden	
Windgeschwindigkeit		Globalstrahlung	
Mittlere Windgeschwindigkeit		Summe der Globalstrahlung/Jahr	
Standardabweichung der Windgeschwindig-keit		Standardabweichung der Globalstrahlung	
Maximale mittlere Windgeschwindigkeit		Minimale mittlere Globalstrahlung	
Anzahl der Tage > 8 m/s Windgeschwindig-keit		Maximale mittlere Globalstrahlung	

Aus den Ergebnissen der regionalen Klimaprojektionen wurden folgende Parameter ausgelesen:

- Mittlere Tagestemperatur (2m) [°C] oder [K]
- Maximum der Tagestemperatur (2m) [°C] oder [K]
- Minimum der Tagestemperatur (2m) [°C] oder [K]
- Tägliche Niederschlagshöhe [mm] oder [kg/m²*s]
- Tägliche Globalstrahlung [W/m²] oder [kJ/m²]
- Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s] oder [Bft]

Bei einigen Klimaprojektionen sind nicht alle Parameter verfügbar. Dies liegt entweder daran, dass nicht alle Parameter auf der entsprechenden Datenbank zur Verfügung gestellt wurden oder aber Daten fehlerhaft sind. Folgende Daten sind betroffen:

- E1_CLM: Globalstrahlung nicht verfügbar
- E2_CLM: Globalstrahlung nicht verfügbar
- E1_REMO: Niederschlag für die ferne Zukunft nicht verfügbar

In den Tabellen in Anlage A sind jeweils die verfügbaren Klimaprojektionen pro Parameter und somit die Anzahl für die einzelnen Zeiträume (Ist-Zustand, nahe und ferne Zukunft) aufgeführt.

3.3 Ausgewertete Kennzahlen

Für diese Untersuchung werden Auswertungen auf Grundlage der vier meteorologischen Parameter Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung durchgeführt. Bestimmte Kennzahlen, deren Bestimmung auf den vier meteorologischen Parametern basiert, werden für die Landesfläche von Baden-Württemberg untersucht und daraus Erkenntnisse abgeleitet. Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über die in Abstimmung mit dem Auftraggeber ausgewählten 28 Kennzahlen. Die Definitionen der 28 Kennzahlen werden im Weiteren erläutert (Kürzel für die Kennzahl in kursiver Schrift in Klammern).

A. Kennzahlen der Lufttemperatur

Jahresmitteltemperatur („T-mittel“)

Die Jahresmitteltemperatur [°C] beschreibt das arithmetische Mittel aller Tagesmitteltemperaturen im betrachteten Zeitbereich.

Heiztag („Heiztag“)

Ein Tag wird als Heiztag definiert, wenn die Tagesmitteltemperatur unter 15 °C liegt. Die Anzahl der Heiztage pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage]. Entgegen der sonst üblichen Definition wird hier statt des Medians der Temperatur das arithmetische Mittel der Temperatur benutzt, da nur dieser Mittelwert für Tageswerte in den Klimaprojektionen vorliegt. Es sind kaum Unterschiede durch die Verwendung des arithmetischen Mittels anstelle des Medians zu erwarten.

Kühlgradtage („Kühlgradtage“)

Aus dem Wert für die Kühlgradtage kann abgeleitet werden, wie viel Energie notwendig ist, um Gebäude auf eine angenehme Raumtemperatur abzukühlen.

Ein Tag wird als Kühltag definiert, wenn die Tagesmitteltemperatur 18,3 °C (65° Fahrenheit) überschreitet. Für die Ermittlung der Kühlgradtage wird an allen Kühltagen (also den Tagen, an denen die Lufttemperatur den gewählten Basiswert der Lufttemperatur von 18,3 °C überschreitet) die Differenz aus dem Basiswert und dem Temperatur-Mittelwert des Tages berechnet. Beträgt also z.B. die mittlere Lufttemperatur eines Tages 20 °C, so ist die Differenz zum Basiswert von 18,3 °C 1,7 Kelvin. Die Temperaturdifferenzen an den jeweiligen Kühltagen werden für alle Kühltage aufaddiert. Dadurch ergibt sich die Einheit [Kelvin*Tage]. Bezugszeitraum ist ein Kalenderjahr.

Vegetationsbeginn („Veg-beginn“)

Für die Definition des Vegetationsbeginns wurde vom Auftraggeber die Berechnung nach Janssen (2011) vom DWD vorgeschlagen. Dabei wird die Blattentfaltung der Stachelbeere als Vegetationsbeginn definiert. Aus Beobachtungen wurde eine rein empirische Formel abgeleitet. Der Vegetationsbeginn ist dabei definiert als der Tag, an dem die Temperatursumme der Tagesmitteltemperatur ab dem 18. Februar über 164 °C liegt. Es wird die Anzahl der Tage seit Jahresbeginn bis zu dem Tag, an dem der Vegetationsbeginn auftritt, angegeben [Tage seit Jahresbeginn].

Tropennacht („Tropennacht“)

Ein Tag bzw. Nacht wird als Tropennacht definiert, wenn das Temperaturminimum größer oder gleich 20 °C ist. Die Anzahl der Tropennächte pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage].

Frosttag („Frosttag“)

Ein Tag wird als Frosttag definiert, wenn das Temperaturminimum unter 0 °C liegt. Die Anzahl der Frosttage pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage].

Datum letzter Frost („letzter Frost“)

Das Datum des letzten Frosts liegt in der ersten Jahreshälfte und beschreibt das Datum, an dem das Temperaturminimum zuletzt unter 0 °C absinkt. Es wird die Anzahl der Tage seit Jahresbeginn bis zu dem Tag angegeben, an dem das Temperaturminimum zuletzt unter 0 °C absinkt [Tage seit Jahresbeginn].

Heißer Tag („Tropentag“)

Als Heißer Tag oder Tropentag wird ein Tag definiert, an dem das Temperaturmaximum größer oder gleich 30 °C ist. Die Anzahl der Heißen Tage pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage].

Sommertag („Sommertag“)

Als Sommertag wird ein Tag definiert, an dem das Temperaturmaximum mindestens 25 °C erreicht. Die Anzahl der Sommertage pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage].

Eistag („Eistag“)

Als Eistag wird ein Tag definiert, bei dem das Temperaturmaximum unter 0 °C liegt. Die Anzahl der Eistage pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage].

B. Kennzahlen des Niederschlags

Niederschlagssumme im Jahr („N-Jahr“)

Als Niederschlagssumme im Jahr wird die Gesamtniederschlagssumme des Jahres bezeichnet [mm].

Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr

(„N-Hyd-Winter“)

Die Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr ist die Gesamtniederschlagssumme, die in den Monaten November (Vorjahr) bis April fällt [mm].

Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr

(„N-Hyd-Sommer“)

Die Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr ist die Gesamtniederschlagssumme, die in den Monaten Mai bis Oktober fällt [mm].

Anzahl der Tage ohne Niederschlag („N-Tage-Trocken“)

Bei der Bezeichnung „Anzahl der Tage ohne Niederschlag“ handelt es sich um die Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe unter 1 mm/Tag pro Kalenderjahr [Anzahl Tage]. Je nach Messprinzip des Niederschlagsmessgeräts („Sammler“, „Tropfer“ oder „Wägeprinzip“) ist die Messgenauigkeit sehr unterschiedlich. Durch Definition eines Grenzwertes von 1 mm, bei dem die Messgenauigkeit keine Rolle spielt, wird eine stabilere und vergleichbare Kennzahl definiert.

Anzahl der Tage mit Starkniederschlag („N-Tage-StarkN“)

Hierbei werden die Tage eines Jahres gezählt, an denen die Niederschlagssumme eine Höhe von 25 mm überschreitet [Anzahl Tage].

Starkniederschlags-Höhe („StarkN“)

Die Starkniederschlags-Höhe ist die Summe des maximalen Niederschlags an einem Tag innerhalb eines Kalenderjahrs [mm].

Niederschlag_{Frühjahr} („N-Frühj“)

Als Niederschlag_{Frühjahr} wird die Niederschlagssumme im meteorologischen Frühjahr, also in den Monaten März bis Mai, bezeichnet [mm].

Niederschlag_{Vegetationsperiode} („N-Veg-Per“)

Als Niederschlag_{Vegetationsperiode} wird die Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode, also in den Monaten Mai bis September, bezeichnet [mm].

Trockenperioden_{Vegetation} („Trockenper-Veg“)

Unter Trockenperioden_{Vegetation} wird die durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode (Mai bis September) definiert. Als Trockenperioden werden zusammenhängende Zeiträume bezeichnet, bei denen pro Tag unter 1 mm Niederschlag fällt [Anzahl Tage].

Trockenperioden_{maximal} („Trockenper-Max“)

Als Trockenperioden_{maximal} wird die längste Dauer einer Trockenperiode pro Jahr bezeichnet [Anzahl Tage] (vgl. Definition Trockenperiodevegetation).

C. Kennzahlen der Globalstrahlung

Summe der Globalstrahlung/Jahr („Glob-Jahr“)

Die Summe der Globalstrahlung pro Jahr bezeichnet die eingefallene solare Leistung pro Quadratmeter im Jahr [kWh/m²].

Standardabweichung der Globalstrahlung („Glob-Stabw“)

Die Standardabweichung der Werte der Globalstrahlung ist ein Maß für die Schwankungsbreite der Globalstrahlung [W/m²].

Minimale mittlere Globalstrahlung („Glob-Min“)

Das Minimum der täglichen Globalstrahlungswerte wird pro Kalenderjahr ausgewertet [W/m²].

Maximale mittlere Globalstrahlung („Glob-Max“)

Das Maximum der täglichen Globalstrahlungswerte wird pro Kalenderjahr ausgewertet [W/m²].

D. Kennzahlen der Windgeschwindigkeit

Mittlere Windgeschwindigkeit („Wind-Jahr“)

Die mittlere Windgeschwindigkeit ist das arithmetische Mittel der täglichen Windgeschwindigkeiten eines Jahres [m/s].

Standardabweichung der Windgeschwindigkeit („Wind-Stabw“)

Die Standardabweichung der Werte der Windgeschwindigkeit wird ebenfalls aus den täglichen Windgeschwindigkeiten eines Tages gebildet und ist damit ein Maß, wie stark die Windgeschwindigkeiten variieren [m/s].

Maximale mittlere Windgeschwindigkeit („Wind-Max“)

Als maximale mittlere Windgeschwindigkeit wird der maximale Wert pro Kalenderjahr verstanden [m/s].

Anzahl der Tage > 8 m/s Windgeschwindigkeit („Wind-Tag-8ms“)

Die Anzahl der Tage eines Jahres, an denen die Windgeschwindigkeit im Mittel über 8 m/s liegt, ist eine Maßzahl, die für den Betrieb von Windkraftanlagen interessant ist [Anzahl Tage].

4 Bestimmung des Auswerte-Ensembles

4.1 Entscheidungskriterien für die Bewertung von Klimaprojektionen

Die Grundgesamtheit der ausgewerteten Klimaprojektionen für Baden-Württemberg besteht zunächst aus 25 Klimaprojektionen. Da die vier CCLM-Projektionen zusätzlich noch räumlich höher aufgelöst vorliegen, ergeben sich insgesamt als Gesamt-Ensemble 29 Klimaprojektionen.

Die Auswahl dieser 29 Klimaprojektionen erfolgte zusammen mit dem Auftraggeber und orientierte sich an verfügbaren Klimaprojektionen v.a. aus den Projekten ENSEMBLES [VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009], CEDIM [SCHÄDLER et al. 2012] und KLIWA sowie an vergleichbaren Auswertungen [z.B. BECKER et al. 2012, GÖRGEN et al. 2010, CH2011 (2011)]. Somit wurden Klimaprojektionen gewählt, die weitestgehend bereits in anderen Auswertungen analysiert und überprüft wurden.

Dennoch ist einem ersten Schritt die prinzipielle Eignung jeder Klimaprojektion hinsichtlich der gewünschten Zielstellung und der Auswerteregion zu untersuchen. Befindet sich innerhalb eines Ensembles eine oder mehrere Klimaprojektionen, deren Werte unplausibel sind, so haben diese Ausreißer einen Einfluss auf die statistische Analyse der Klimaprojektionen im Ensemble. Insbesondere bei der relativ geringen Grundgesamtheit von 29 Klimaprojektionen können die Ergebnisse einer oder mehrerer Klimaprojektionen, deren Werte stark von den anderen Klimaprojektionen abweichen, zu einer starken Beeinflussung von Mittelwerten, Spannbreiten oder ähnlichen Kennwerten einer Ensemble-Betrachtung führen. Eine Auswahl soll damit unwahrscheinliche Klimaprojektionen ausschließen.

Allerdings ist das Auftreten von abweichenden Werten in einer Klimaprojektion allein kein ausreichender Grund, eine Klimaprojektion zu verwerfen, da ja gerade die Spannweite der Ergebnisse der Klimaprojektionen von Interesse sein kann. Durch das Ausscheiden von einzelnen Ensemble-Mitgliedern wird freiwillig auf Informationen verzichtet. Dies wird aber in Kauf genommen, um nicht die Gesamtaussage des Ensembles zu verfälschen. Somit können nur dann Klimaprojektionen aus dem Ensemble ausgeschlossen werden, wenn deren Werte eindeutig unplausibel erscheinen.

Als Entscheidungshilfe, die zur Auswahl der Klimaprojektionen dienen, sind prinzipiell zwei Vergleichsarten sinnvoll:

- a) Wie verhält sich die Klimaprojektion des Ist-Zustands hinsichtlich bestimmter Kennzahlen im Vergleich zu den Beobachtungsdaten?

Für den Vergleich mit den Beobachtungsdaten spricht, dass so Klimaprojektionen identifiziert werden können, die ein klimatisches Verhalten für den Ist-Zustand unplausibel simulieren (z.B. Jahres-Niederschlag von 4.500 mm im Schwarzwald).

Allerdings ist zu berücksichtigen, dass immer Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Klimaprojektionen und den Beobachtungsdaten auftreten werden. Die Ergebnisse von Klimaprojektionen stellen grundsätzlich einen statistisch möglichen Zustand eines bestimmten Zeitraums dar und nicht die wirklichen Werte. Nur bei den Rechenläufen für Klimaprojektionen, bei denen anstelle der Daten eines Globalmodells Re-Analysedaten für den Antrieb der Regionalmodelle verwendet werden, sind die Abweichungen zu Beobachtungsdaten geringer. Die Ergebnisse solcher Rechenläufe standen für diese Auswertung aber nicht zur Verfügung.

- b) Wie verhält sich die Klimaprojektion hinsichtlich bestimmter Kennzahlen im Vergleich von Ist-Zustand zu Zukunftsszenario?

Aus der Differenz der Werte für das Zukunftsszenario zum Ist-Zustand wird das Klimasignal, also die Änderung eines Wertes aufgrund des Klimawandels, ermittelt. Eine mögliche Auswahl, welches Klimasignal der Klimaprojektionen noch plausibel erscheint, ist sehr subjektiv, da keine Vergleichswerte aus der Zukunft existieren. Nur Klimaprojektionen, deren Klimasignal deutlich von den Ergebnissen anderer Klimaprojektionen abweicht und unplausible Werte bezüglich verschiedener meteorologischer Parameter in der Zukunft liefert, können so identifiziert werden.

Voruntersuchungen an dem Gesamtensemble der 29 Klimaprojektionen haben gezeigt, dass es schwierig ist, aufgrund der Problematik der objektiven Einstufung eines Klimasignals als unplausibel eine Auswahl zu treffen. Zudem bestehen relativ geringe Unterschiede zwischen den Klimasignalen der Klimaprojektionen. Daher wird hier dem Vergleich der Klimaprojektionen zu den Beobachtungsdaten als Entscheidungskriterium zur Auswahl von geeigneten Klimaprojektionen zur Darstellung des Klimas in Baden-Württemberg den Vorzug gegeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass die zum Vergleich der Klimaprojektionen herangezogenen regionalisierten Beobachtungsdaten in der Lage sind, ausgewählte meteorologische Parameter und somit das gegenwärtige Klima gut wiederzugeben.

Um die Güte der regionalen Klimaprojektionen einschätzen zu können, werden also die Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand ausgewertet und mit Beobachtungsdaten verglichen. Daher werden neben den Klimaprojektionen die definierten Kennzahlen auch für die interpolierten Beobachtungsdaten ausgewertet. Die dazu bereits z.T. vorliegenden Auswertungen aus dem KLIWA-Projekt [KLIWA 2006] werden dabei berücksichtigt.

Die Reduktion der Ensemble-Mitglieder anhand der Kennzahlen Lufttemperatur, Jahresniederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit konzentriert sich auf die Ausgangsgrößen, die für die weiteren ausgewerteten Kennzahlen die zentrale Basis darstellen. Für Kennzahlen, die aus anderen meteorologischen Parametern wie z.B. der Luftfeuchte abgeleitet werden, muss die hier durchgeführte Selektion der als verlässlich eingestuften Klimaprojektionen nicht übereinstimmen.

Die endgültige Auswahl der Klimaprojektionen, die im Auswerte-Ensemble berücksichtigt werden, kann entweder einheitlich für alle Parameter oder spezifisch für die jeweilige Fragestellung erfolgen. Somit kann zwischen zwei verschiedenen Herangehensweisen unterschieden werden:

- Auswahl von Ensemblemitgliedern unabhängig von der Fragestellung: Bei dieser Ensemble-Analyse werden die Grundgesamtheit aller Klimaprojektionen betrach-

tet und durch einen Vergleich mit Beobachtungsdaten sowie einen Vergleich der Modellergebnisse untereinander nur die Klimaprojektionen aus dem Ensemble genommen, die unplausible Werte aufweisen oder stark von den Ergebnissen der anderen Klimaprojektionen abweichen. Ziel ist hierbei v.a. die Bandbreite verschiedener Modellergebnisse zu betrachten, um damit ein Maß für die Schwankungsbreite zu erhalten. Das schlussendlich festgelegte Auswerte-Ensemble umfasst dann für alle Auswertungen die gleichen Klimaprojektionen.

- Auswahl von Ensemblemitgliedern für bestimmte Fragestellungen: Je nach Fragestellung der Untersuchung werden verschiedene Kriterien bei der Auswahl der Mitglieder des AuswerteEnsembles angelegt. Für die Wasserwirtschaft z.B. ist neben der absoluten Niederschlagshöhe auch die genaue räumliche Verteilung der Niederschläge ausschlaggebend.

Größere Abweichungen in der Lagegenauigkeit führen bei Wasserhaushaltssimulationen meist zu unplausiblen Abflusswerten, weshalb für Fragestellungen der Wasserwirtschaft die Auswahlkriterien für plausible Mitglieder des Auswerteensembles enger gefasst werden müssen. Somit werden unterschiedliche Auswerte-Ensembles festgelegt, die für jeden ausgewerteten Parameter unterschiedliche Klimaprojektionen umfassen.

Die Fragestellung beziehungsweise der beabsichtigte Anwendungsbereich ist entscheidend für die Auswahl von geeigneten Modellen. Allerdings sollen zum besseren Verständnis und für die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse nicht für jeden Parameter wie Temperatur oder Niederschlag unterschiedliche Auswerte-Ensemble verwendet werden. Daher werden hier beide Wege verfolgt:

- Für den Niederschlag, die Lufttemperatur, die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit wird ein gemeinsames Auswerte-Ensemble definiert.
- Da beim Niederschlag durch die Klimaprojektionen neben der absoluten Niederschlagshöhe auch die richtige Lage der Niederschläge zu simulieren ist, wird in Abstimmung mit dem Auftraggeber zusätzlich für den Niederschlag die Auswahl der Klimaprojektionen für das Auswerte-Ensemble anders getroffen als für die anderen Parameter. Es ergibt sich dann ein reduziertes Auswerte-Ensemble, welches getrennt analysiert wird.

Somit werden aus den 29 regionalen Klimaprojektionen ein Auswerte-Ensemble sowie ein reduziertes Auswerte-Ensemble bestimmt. In Bild 4-1 sind das schematische Vorgehen sowie die Anzahl der Klimaprojektionen für die jeweiligen Ensembles dargestellt. Die Bestimmung der Klimaprojektionen für das Auswerte-Ensemble und das reduzierte Auswerte-Ensemble wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2 Ermittlung des Auswerte-Ensembles und des reduzierten Auswerte-Ensembles

a) Ermittlung des Auswerte-Ensembles

Für die Analyse der 29 regionalen Klimaprojektionen werden flächenhafte Vergleiche der Simulationsergebnisse durchgeführt. Dazu werden Übersichtskarten für die jeweiligen Simulationen der 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand und für die Beobachtungsdaten für die Landesfläche von Baden-Württemberg erzeugt. Dargestellt werden somit für die 29 Klimaprojektionen eine entsprechende Anzahl von Karten (jede Karte mit dem Ergebnis aus einer der regionalen Klimaprojektionen) sowie zum Vergleich eine Karte aus den Beobachtungsdaten (Anlagen B-01 und B-02).

Zudem werden für ausgewählte Kennzahlen als Flächenmittelwerte über die gesamte Fläche von Baden-Württemberg für den Ist-Zustand und für die Beobachtungsdaten Punktdiagramme erstellt, in denen die Ergebnisse in der Gesamtschau gemeinsam dargestellt werden. Dadurch lassen sich einzelne Klimaprojektionen identifizieren, die deutlich von den anderen Klimaprojektionen abweichen (Anlagen B-03 bis B-06).

Die Auswahl der Ensemble-Member, die in das Auswerte-Ensemble zur endgültigen Auswertung der regionalen Klimaprojektionen für Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Wind eingehen sollen, wird anhand der flächenhaften Abbildungen der Jahresmitteltemperatur (Anlage B-01) und der Jahresniederschlagssumme (Anlage B-02) sowie anhand weiterer Kennzahlen als Flächenmittelwert über Baden-Württemberg für Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Wind durchgeführt (Anlagen B-03 bis B-06).

Lufttemperatur (Anlagen B-01 und B-03):

Bei der flächenhaften Darstellung der Lufttemperatur (Anlage B-01) zeigen einige Klimaprojektionen auffällige Werte. Folgende Klimaprojektionen haben im Vergleich zu den Beobachtungsdaten zu hohe Temperaturen: A_HIRHAM5, E_HIRHAM5, H3Q16_RCA und H3Q16_H3Q16. Dagegen fällt die Klimaprojektion B_HIRHAM5 durch sehr niedrige Temperaturen auf.

In der Anlage B-03 sind die Temperaturkennzahlen aus den gemessenen Stationsdaten („Beobachtung“) den Kennzahlen für den Ist-Zustand der jeweiligen Klimaprojektionen in Punktdiagrammen gegenübergestellt. Für die Kennzahlen „Tropentag“, „Tropennacht“ und „Sommertag“ fällt die Klimaprojektion A_HIRHAM5 mit relativ großen Tagesanzahlen auf. Für die Kennzahl „Eistag“ dagegen wirken die Werte der Klimaprojektion B_HIRHAM5 erhöht. Diese Kennzahlen basieren nicht auf dem Tagesmittelwert der Temperatur wie beispielsweise die Jahresmitteltemperatur sondern auf dem Tagesminimum oder dem Tagesmaximum der Temperatur.

Dennoch zeigen sie vergleichbare Tendenzen. Somit weisen bei den beiden Klimaprojektionen A_HIRHAM5 und B_HIRHAM5 die Tagesmitteltemperatur (erkennbar an den flächenhaften Darstellungen) und Tagesminimum- bzw. Tagesmaximumtemperatur (erkennbar an den Punktdiagrammen) die gleichen Auffälligkeiten auf. Hinsichtlich der Temperatur zeigen somit fünf Modelle deutliche Abweichungen von den Messdaten und den anderen Modellergebnissen.

Globalstrahlung und Wind (Anlagen B-05 und B-06):

Die Punktdiagramme mit den Auswertungen der Kennzahlen für die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit zeigen keine deutlichen Ausreißer.

Eine Streuung der Werte ist aber durchaus vorhanden. Auffällig hohe Windgeschwindigkeiten liefern die Klimaprojektionen E3_REGCM3 und E1_HIRHAM5.

Niederschlag (Anlagen B-02 und B-04):

Für die Auswahl der Ensemble-Member liegen neben den Punktdiagrammen auch wie bei der Lufttemperatur flächenhafte Abbildungen für den Gesamtniederschlag als Entscheidungshilfe vor. Insgesamt zeigt sich beim Parameter Niederschlag eine deutlich größere Abweichung zwischen Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen als bei den Parametern Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit oder Globalstrahlung.

Aufgrund der Modellstruktur von einigen Regionalmodellen liegen Beobachtungsdaten und Modelldaten eng beieinander. Dies sind die Klimaprojektionen, die entweder bias-korrigiert sind, also nachträglich auf Messdaten angepasst wurden (alle CCLM-Ergebnisse), oder die selbst statistisch veränderte Messdaten sind (alle WETTREG-Ergebnisse). Damit erhalten folgende elf Klimaprojektionen einen Sonderstatus:

- C_CCLM (bias-korrigiert)
(in der Auflösung 25 x 25-km² und 7 x 7 km²)
- E1_CCLM (bias-korrigiert)
(in der Auflösung 25 x 25-km² und 7 x 7 km²)
- E2_CCLM (bias-korrigiert)
(in der Auflösung 25 x 25-km² und 7 x 7 km²)
- E3_CCLM (bias-korrigiert)
(in der Auflösung 25 x 25-km² und 7 x 7 km²)
- E_WETTREG03
- E1_WETTREG06
- E1_WETTREG10

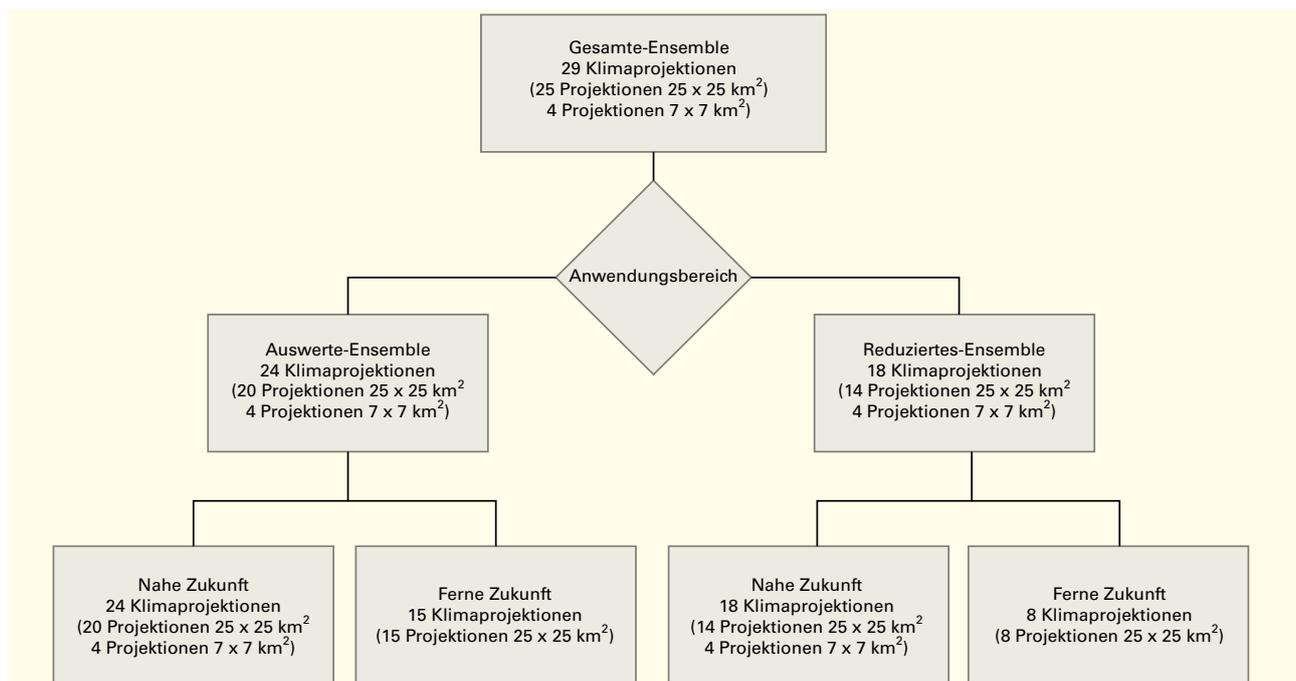


Bild 4-1: Übersicht über die ausgewerteten Klimaprojektionen

Damit verbleiben von den 29 Klimaprojektionen 18 Klimaprojektionen, die nicht mit Beobachtungsdaten korrigiert wurden oder die nicht zumindest auf Beobachtungsdaten beruhen. Diese 18 Klimaprojektionen können den Parameter Niederschlag hinsichtlich der Lagegenauigkeit nur bedingt wiedergeben. Damit werden die Probleme offensichtlich, die die Regionalmodelle derzeit noch bei der Bestimmung der Lage des Niederschlags besitzen. Alle diese Klimaprojektionen nicht im Ensemble zu betrachten führt aber zu einer starken Beschränkung der Auswertung auf die WETTREG- und CCLM-Modelle, die durch die Einbeziehung von Beobachtungswerten nicht direkt mit den anderen Regionalmodellen vergleichbar sind.

Es werden daher nur die Regionalmodelle aus dem Ensemble entfernt, die besonders deutliche Abweichungen zu den Beobachtungswerten zeigen:

- Die Klimaprojektionen B_HIRHAM5 und E1_HIRHAM5 zeigen deutliche Überschätzungen des Niederschlags im südlichen Schwarzwald, so dass diese Klimaprojektionen ausgeschlossen werden sollten. Bei den weiteren Analysen der Kennzahl „Anzahl der Tage mit Starkniederschlag“ fällt die Klimaprojektion E1_HIRHAM5 erneut auf. Zudem scheint bei den Kennzahlen „Trockenperioden-Vegetation“ und „Trockenperioden_{maximal}“ die Klimaprojektion A_HIRHAM5 unplausible Werte zu liefern.
- Die drei Klimaprojektionen A_HIRHAM5, E1_HIRHAM5, B_HIRHAM5 sind bereits bei der Analyse der Lufttemperaturen mit hohen Abweichungen aufgefallen.

Die beiden Klimaprojektionen H3Q16_RCA und HCM3Q16_HRM3Q16, die bei der Lufttemperatur ebenfalls als unplausibel eingestuft wurden, zeigen auch bei den Niederschlägen auffällig hohe Werte.

Im RheinBlick-Projekt [GÖRGEN et al. 2010] wurde ebenfalls eine Analyse der Daten der Regionalmodelle des ENSEMBLES-Projekts durchgeführt. Auch hier wurden einige Klimaprojektionen aus der Grundgesamtheit eliminiert oder ausgeklammert, da die Abweichungen zu den Beobachtungsdaten sehr groß sind. Dies betrifft die Klimaprojektionen A_HIRHAM5, E1_HIRHAM5, H3Q16_RCA und H3Q16_H3Q16.

Dies deckt sich mit der Vorauswahl in dieser Unter-

suchung. Zudem wird die Klimaprojektion B_HIRHAM5 im Ensemble nicht weiter berücksichtigt, da sowohl deutliche Unterschätzungen der Temperatur im Jahresmittel und eine hohe Tagesanzahl bezüglich der Kennzahl „Eistag“ existieren. Zudem treten zu hohe Niederschlagshöhen im südlichen Schwarzwald auf.

Damit werden folgende fünf Klimaprojektionen für weitere Analysen der Parameter Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit aus dem Gesamtensemble genommen:

- A_HIRHAM5
- E1_HIRHAM5
- H3Q16_RCA
- H3Q16_H3Q16
- B_HIRHAM5

Somit verbleiben 24 verschiedene Klimaprojektionen im Auswerte-Ensemble (20 Klimaprojektionen 25x25 km² und 4 Klimaprojektionen 7x7 km²) für Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit. In Tabelle 4-1 sind die 24 Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles aufgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung der Klimaprojektionen dieses Auswerte-Ensemble werden in den folgenden Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.4 vorgestellt.

b) Ermittlung des reduzierten Auswerte-Ensembles

Speziell für die Fragestellungen im Bereich der Wasserwirtschaft wird das Auswerte-Ensemble für den Parameter Niederschlag reduziert. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wird das Auswerte-Ensemble für den Niederschlag und den daraus abgeleiteten Kennzahlen bei den Klimaprojektionen der Auflösung 25x25 km² von 20 Klimaprojektionen auf 14 Klimaprojektionen beschränkt.

Folgende Klimaprojektionen werden aufgrund von zu großen Abweichungen der simulierten Niederschlagssummen von Beobachtungswerten oder fehlerhaften räumlichen Niederschlagsmustern nicht im reduzierten Auswerte-Ensemble betrachtet:

- B_RCA
- E3_REGCM3
- E3_RCA
- H3Q0_H3Q0
- H3Q3_H3Q3
- H3Q3_RCA

Tabelle 4-1: Übersicht über die 29 regionalen Klimaprojektionen mit Verfügbarkeit und Auswahl für das Auswerte-Ensemble und für das reduzierte Auswerte-Ensemble

GCM	RCM	Auswert-Ensemble			Reduziertes Ensemble		
		Ist- Zustand	Nahe-Zustand	Fern- Zustand	Ist- Zustand	Nahe-Zustand	Fern- Zustand
HadCM3Q0	CLM 2.4.6	x	x	x	x	x	x
	HadRM3Q0	x	x	x	-	-	-
HadCM3Q16	HadRM3Q16	-	-	-	-	-	-
	C4IRCA3	-	-	-	-	-	-
HadCM3Q3	HadRM3Q3	x	x	x	-	-	-
	SMHIRCA	x	x	x	-	-	-
BCM	SMHIRCA	x	x	x	-	-	-
	HIRHAM5	-	-	-	-	-	-
ARPEGE	HIRHAM5	-	-	-	-	-	-
	RM5.1	x	x	x	x	x	x
ECHAM5-r3	SMHIRCA	x	x	x	-	-	-
	REGCM3	x	x	x	-	-	-
	RACMO2.1	x	x	x	x	x	x
	REMO 5.7	x	x	x	x	x	x
	HIRHAM5	-	-	-	-	-	-
	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
ECHAM5-r2	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
	CLM 2.4.11	x**	x**	x**	x**	x**	x**
ECHAM5-r1	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
	REMO 2005	x	x	x*	x	x	-
	CLM 2.4.11	x**	x**	x**	x**	x**	x**
	WETTREG2006	x	x	x	x	x	x
	WETTREG2010	x	x	x	x	x	x
CGCM3	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
ECHAM4	WETTREG2003	x	x	-	x	x	-
ANZAHL		24	24	15	18	18	8

Auflösung 25x25 km²

Auflösung 7x7 km²

* Für den Parameter Niederschlag liegen keine Daten vor

** Für den Parameter Globalstrahlung liegen keine Daten vor

In Tabelle 4-1 sind auch die Mitglieder des reduzierten Auswerte-Ensembles aufgeführt. Für die 14 Klimaprojektionen des reduzierten Auswerte-Ensembles in der Auflösung 25x25 km² wird eine separate Analyse des Niederschlags durchgeführt, bei der die drei Kennzahlen „Nie-

derschlagssumme im Jahr“ sowie „Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr“ und „Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr“ untersucht werden. Die Ergebnisse der Auswertung des reduzierten Auswerte-Ensembles sind in Kapitel 5.2.5 zu finden.

5 Auswertung der Beobachtungsdaten und der regionalen Klimaprojektionen

5.1 Form der Auswertung der regionalen Klimaprojektionen

Für die statistischen Auswertungen der Ensembledaten werden zunächst die Daten der aufbereiteten 20 Klimaprojektionen auf dem 25 x 25 km²-Raster für die in der Zukunft liegenden Zeiträume (2021 bis 2050 und 2071 bis 2100) und auch für den Ist-Zustand verwendet. Aus dem Vergleich der beiden Zukunftsszenarien mit dem Ist-Zustand kann das Änderungssignal in Folge der Klimaänderung identifiziert werden.

Daher werden die Auswertungen für den Vergleich der beiden dreißigjährigen Mittelungszeiträume (für die nahe Zukunft 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000 und für die ferne Zukunft 2071-2100 im Vergleich zu 1971-2000) durchgeführt. Dabei werden jeweils Darstellungen der Änderungen zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand erzeugt. Zusätzlich werden Darstellungen der Abweichungen zwischen Ist-Zustand und den Beobachtungsdaten für den Zeitraum 1971 bis 2000 erstellt.

Analog wird bei der Auswertung der aufbereiteten vier Klimaprojektionen der CCLM-Daten auf dem 7 x 7 km²-Raster vorgegangen.

a) Übersicht über die Anlagen

Für die folgenden Auswertungen der Beobachtungsdaten und der regionalen Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles und des reduzierten Auswerte-Ensembles finden sich verschiedene Grafiken in den Anlagen. Dabei werden unterschiedliche Darstellungsformen gewählt, die hier detaillierter beschrieben werden:

- In Anlage C wird ein Überblick gegeben über die Ergebnisse der 24 einzelnen Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles und der Beobachtungsdaten für jede Kennzahl und für den Ist-Zustand (Flächenmittel über Baden-Württemberg). Dazu wird in Anlage C wie in den Anlagen B-03 bis B-06 die Darstellung in Punktdiagrammen gewählt.

- In Anlage D werden die Differenzen zwischen Ergebnissen der 24 Klimaprojektionen und den Beobachtungsdaten für 12 Kenngrößen für den Ist-Zustand dargestellt (Flächenmittel über Baden-Württemberg). Für diesen Vergleich der Beobachtungsdaten und dem Ist-Zustand der einzelnen Klimaprojektionen werden Säulendiagramme verwendet. Dargestellt werden die Differenzen zwischen den Beobachtungsdaten und den mittleren Ergebnisse der vier auf dem 7 x 7 km²-Raster vorliegenden Klimaprojektionen (jeweils erste vier Säulen im Diagramm) sowie nachfolgend der 20 auf dem 25 x 25 km²-Raster vorliegenden Klimaprojektionen.
- In Anlage E finden sich für ausgewählte Kennzahlen flächenhafte Abbildungen (analog zu Anlage B-01 und B-02) der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand. Diese Übersichtskarten für die jeweiligen Simulationen des Ist-Zustands und für die Beobachtungsdaten liegen für die Landesfläche von Baden-Württemberg vor. Dargestellt werden für eine Kennzahl eine Karte aus den Beobachtungsdaten und jeweils 24 Karten der Klimaprojektionen. Aufgrund des Umfangs werden diese Karten nicht für alle 28 Kennwerte, sondern nur für sechs mit dem Auftraggeber abgestimmte Kenngrößen erstellt.
- In Anlage F folgen die Darstellungen der Ergebnisse der 28 Kenngrößen in Box-Whisker-Plots, um die Schwankungsbreite der unterschiedlichen Klimaprojektionen vergleichen zu können (Flächenmittel über Baden-Württemberg).

Für die Interpretation der Box-Whisker-Plots ist in Bild 5-1 ein Beispiel illustriert:

- Die farbigen Marker neben den Box-Whisker-Diagrammen beschreiben die jeweiligen Simulationsergebnisse der vorliegenden Klimaprojektionen.
- Der rote Balken in den Box-Whisker-Diagrammen markiert den Median (50. Perzentil) der Klimaprojektionen.
- Die Ausdehnung der Box gibt den Bereich des 1. Quartils (25. Perzentil) bis zum 3. Quartil (75. Perzentil) an und umfasst damit 50% der Klimaprojektionen.
- Der grün gestrichelte Bereich bis zu den zwei schwarzen Balken (Whisker) beschreibt den Bereich, in dem alle Klimaprojektionen liegen, die nicht als Ausreißer angesehen werden (1,5-facher Interquartilsabstand).
- Werte von Klimaprojektionen außerhalb der Whisker gelten als Ausreißer.

Die Box-Whisker-Plots werden für die Absolutwerte des Ist-Zustands (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100) erstellt. Dies erfolgt für die 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands und der nahen Zukunft und die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft, die alle auf dem 25 x 25 km²-Raster vorliegen.

- In Anlage G sind die Differenzen der Klimaprojektionen zwischen naher Zukunft und Ist-Zustand (für 24 Klimaprojektionen) und zwischen ferner Zukunft und Ist-Zustand (für 15 Klimaprojektionen) wieder in Säulendiagrammen dargestellt (Flächenmittel über Baden-Württemberg). Damit wird das Klimaänderungssignal für jede Klimaprojektion wiedergegeben. Die ersten vier Säulen zeigen die Klimaprojektionen auf dem 7 x 7 km²-Raster, die weiteren 20 Säulen die vorliegenden Klimaprojektionen auf dem 25 x 25 km²-Raster.
- In Anlage H werden für jede Kennzahl die jahresscharfen Ergebnisse der 24 Klimaprojektionen als Liniendiagramme dargestellt (Flächenmittel über Baden-Württemberg). Allerdings stellen die Klimaprojektionen keine Ergebnisse zur Verfügung, die exakt einem Jahr in der Zukunft zugeordnet werden können. Dies bedeutet, dass die aus einem Modell berechnete Anzahl z.B. der Sommertage für das Jahr 2025 genauso gut auch 2030 oder 2022 auftreten kann. Die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen sind daher nur als

mittleres klimatisches Verhalten für einen Zeitraum zu interpretieren. Deswegen können nur mittlere Werte über die jeweils 30-jährigen Zeitreihen der nahen und der fernen Zukunft sinnvoll dargestellt werden.

Um einen Verlauf der Änderungen zu erhalten, werden trotzdem jahresgenaue Abbildungen erstellt. Diese dürfen nicht jahresscharf interpretiert werden. Allerdings geben diese Grafiken Hinweise auf die jährlichen Schwankungen und können gerade bei einem Vergleich von Ist-Zustand und Zukunftsszenario einen möglichen Trend visualisieren. Für jede der 28 Kenngrößen wird eine solche Grafik erstellt, so dass sich 28 Abbildungen ergeben.

- In Anlage I sind die flächenhaften Darstellungen der Perzentile der Zukunftsszenarien für die Kennzahlen der Klimaprojektionen in 25 x 25 km²-Auflösung sowie der vier Klimaprojektionen in 7 x 7 km²-Auflösung verfügbar.

Durch die zur Verfügung stehenden Daten aus einer bestimmten Anzahl von Regionalmodellen ist es möglich, Verteilungsfunktionen von Änderungssignalen und somit Perzentile aus einem Klimaprojektionsensemble zu ermitteln und grafisch darzustellen. Dieses Vorgehen ist z.B. auch bei den Auswertungen des DWD für den Klimaatlas (vgl. Imbery & Namyslo 2011, Becker et al. 2012) oder den Klimaprojektionen der Schweiz (CH2011 2011) gewählt worden.

Auf Grundlage der hier ausgewerteten Klimaprojektionen werden die Perzentile (15. Perzentil, 50. Perzentil und 85. Perzentil) für die möglichen zukünftigen Änderungen für alle Modellrasterzellen in Baden-Württemberg angegeben. Eine anschauliche Erklärung für die Ermittlung der Perzentile findet sich auch auf den Internetseiten des Klimaatlas des DWD. In Bild 5-1 ist die Ermittlung der Perzentile anhand der Ergebnisse für die Jahreslufttemperatur der Klimaprojektionen schematisch dargestellt:

- Die mittleren Werte aus den regionalen Klimaprojektionen werden zunächst der Größe nach sortiert.
- Das 50. Perzentil ist der Wert, für den jeweils die Hälfte der Klimaprojektionen höhere bzw. niedrigere Änderungen zeigt. Er repräsentiert somit innerhalb des Ensembles ein mittleres Klimaänderungssignal. Das 50. Perzentil entspricht dem Median (oder Zentralwert) als Mittelwert der Verteilung.

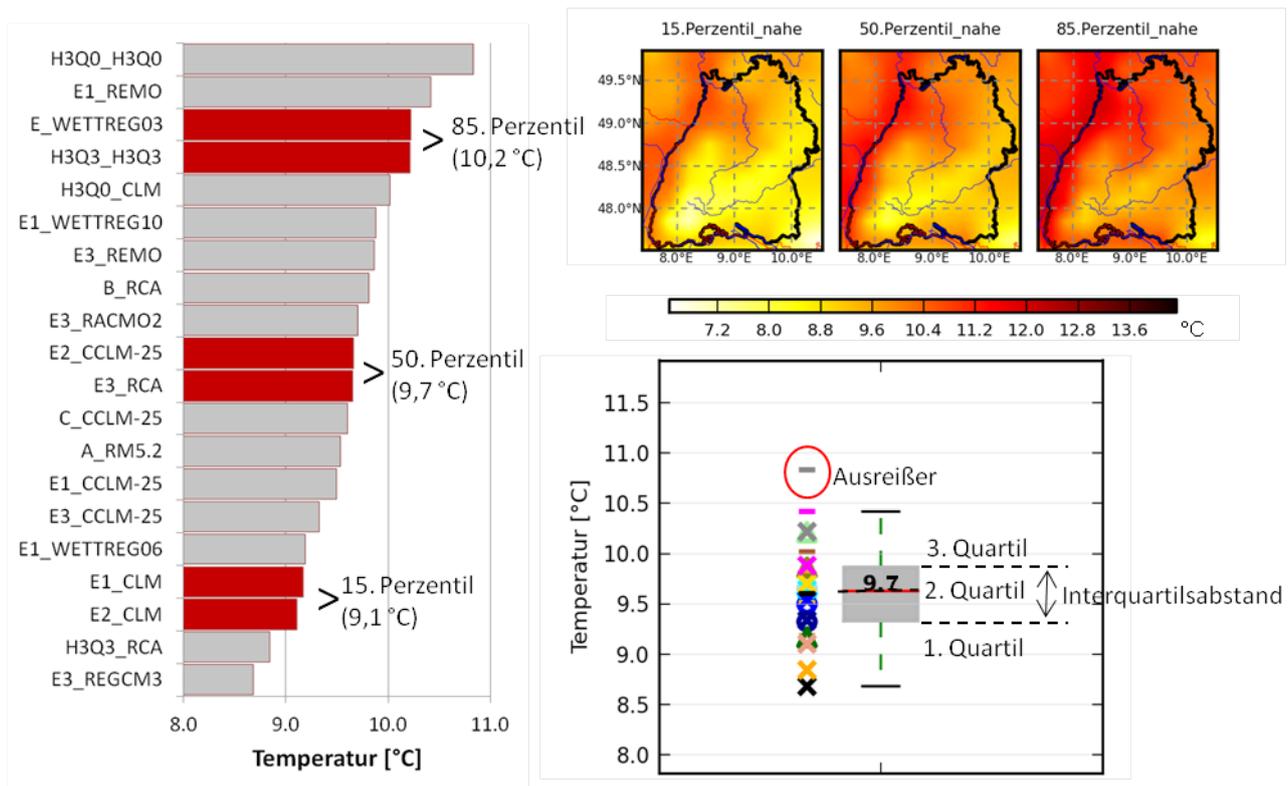


Bild 5-1: Exemplarische Erläuterung der Perzentile und der Box-Whisker-Diagramme am Beispiel der Jahreslufttemperatur der nahen Zukunft:
a) Perzentile: ermittelt aus den 20 Klimaprojektionen in der Auflösung 25x25 km² (links: Perzentile am Beispiel der über die Fläche von Baden-Württemberg gemittelten Temperatur; rechts oben: flächenhafte Darstellung der 15., 50. und 85. Perzentile)
b) Box-Whisker-Diagramme (rechts Mitte und unten): über die Fläche von Baden-Württemberg gemittelten Temperatur, ermittelt aus den 20 Klimaprojektionen in der Auflösung 25x25 km²

- Neben dem 50. Perzentil werden das 15. und 85. Perzentil angegeben, um die Spannweite der Modellergebnisse zu verdeutlichen, ohne das einzelne, besonders extreme Ergebnisse diesen Eindruck verfälschen:
Das 15. Perzentil ist der oberste Grenzwert der untersten 15% aller Modellsimulationen. Das heißt, 15% aller Modellergebnisse liegen unterhalb dieses Werts oder erreichen diesen genau. Die übrigen 85% der Modellsimulationen zeigen größere Änderungen. Entsprechend umgekehrt verhält es sich mit dem 85. Perzentil.
- Zwischen das 15. und 85. Perzentil fallen somit insgesamt 70% aller Modellergebnisse.

Die Wahl des 15. und 85. Perzentils anstelle z.B. des 10. und 90. Perzentils wurde getroffen, um bei der relativ geringen Anzahl von insgesamt 24 Klimaprojektionen Ausreißer stärker auszuklammern.

Um die Vergleichbarkeit der Klimaprojektionen zu wahren, werden für die flächenhaften Perzentildarstellungen die vier Klimaprojektionen in der 7x7 km²-Auflösung

weggelassen und nur die Klimaprojektionen in 25x25 km²-Auflösung betrachtet. Da für die ferne Zukunft nicht alle Klimaprojektionen verfügbar sind, ergeben sich für Ist-Zustand und nahe Zukunft 20, für die ferne Zukunft 15 Klimaprojektionen.

Auch bei den Box-Whisker-Diagrammen für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft werden 20 Klimaprojektionen (25x25 km²) und für die ferne Zukunft 15 Klimaprojektionen (ebenfalls 25x25 km²) ausgewertet. Dadurch ist das 50. Perzentil der Klimaprojektionen und der Median bei den Box-Whisker-Diagrammen einer Kennzahl identisch (vgl. Bild 5-1: Median bei den Perzentilen 9,7°C, bei den Box-Whisker-Diagrammen 9,7°C).

- In Anlage I wird für jede der definierten 28 Kenngrößen die Differenz des Zeitraums 2021-2050 zum Ist-Zustand und des Zeitraums 2071-2100 zum Ist-Zustand dargestellt. Dies wird jeweils für das 15. Perzentil, 50. Perzentil und 85. Perzentil umgesetzt. Somit werden pro Kennzahl sechs Abbildungen erzeugt. Daher werden zahlreiche Abbildungen auf dem 25x25 km²-Raster zu den Perzentilen zur Verfügung gestellt (Anlagen I-01 bis I-04). Die Abbildungen umfassen jeweils die Fläche von Baden-Württemberg.

Analoge Abbildungen für das 15. Perzentil, 50. Perzentil und 85. Perzentil werden für das 7x7 km²-Raster unter Verwendung der vier CCLM-Datensätze erstellt. Da hier nur Daten 2021 bis 2050 vorliegen, werden pro Kenngröße drei Abbildungen erstellt (Anlagen I-05 bis I-08).

- In Anlage J finden sich die entsprechenden, den vorherigen Abbildungen zugrundeliegenden Werte der Ergebnisse der Klimaprojektionen als Tabellen für jeden Klimaparameter. Unter den Ergebnissen finden sich zudem die Werte für das Minimum, den Median und das Maximum („min“, „med“, „max“) aller Klimaprojektionen. Ebenso liegen die Abweichungen der Modelldaten von den Beobachtungsdaten (Ist-Zustand) bzw. die Abweichung der Modelldaten des Zukunftsszenarios vom Ist-Zustand vor, je nach Kennzahl absolut oder prozentual berechnet (Beispiel: „abw-min“). In den Tabellen stehen auch die Ergebnisse für das 15., 50. bzw. 85. Perzentil („p15“, „p50“, „p85“) jeder Kennzahl aus den Klimaprojektionen. Die Perzentile werden zweimal aufgeführt:

- Perzentile aus der Auswertung aller verfügbaren Klimaprojektionen.
- Perzentile aus der Auswertung der verfügbaren Klimaprojektionen mit 25x25 km²-Auflösung. Hier ergeben sich Unterschiede zwischen den Werten des Medians („med“) und dem 50. Perzentil („p50.0(25km²)“), da die vier CCLM-Modelle in der 7x7 km²-Auflösung bei der Perzentilberechnung nicht berücksichtigt werden.

Die Ergebniswerte der Klimaprojektionen, wie sie in den Tabellen der Anlage J aufgeführt sind, sind mathematisch errechnete Werte und spiegeln nicht die tatsächlich vorhandene Genauigkeit der Ergebnisse wider. Die dargestellten Zahlenwerte werden einheitlich mit einer Nach-

kommastelle in den Tabellen aufgeführt, um Unterschiede zwischen den Modellergebnissen aufzeigen zu können.

Da bereits die Messungen der untersuchten Klimaparameter große Schwankungsbreiten aufweisen, sind die zum Teil großen Schwankungsbreiten der Klimaparameter auch unter diesem Gesichtspunkt zu betrachten. Bei der Interpretation der unterschiedlichen Klimaprojektionen ist somit zu berücksichtigen, welche Genauigkeit bei Messungen der Klimaparameter überhaupt zu erwarten ist.

So kann die Unsicherheit einer Punktmessung der Klimagrößen Temperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit je nach Parameter durchaus bei etwa 5% bis 10% liegen, beim Niederschlag noch etwas darüber. Durch die Regionalisierung der Punktmessung auf die Fläche ist eine weitere große Unsicherheit gegeben. Die Angabe einer Genauigkeit von mehr als einer Nullstelle ist demnach unrealistisch. Generell wird hier eine Genauigkeit von einer Nullstelle verwendet.

Bei hohen absoluten Werten wie bei Niederschlagssummen von Halbjahren oder Globalstrahlungssummen pro Jahr wäre ebenso eine Darstellung der Werte in Anlage J ohne Nullstellen denkbar. Aus Gründen der Einheitlichkeit wird darauf aber verzichtet.

b) Auswertungen des Medians

Unterschied Median und Flächenmittel

Während das arithmetische Mittel als Durchschnittswert gebildet wird, ergibt sich der Median aus einer Anzahl von Werten als die Zahl, die an der mittleren Stelle steht, wenn die Werte der Größe nach sortiert werden (vgl. Bild 5-1). Somit ist der Median ein Mittelwert, der für Auswertung der Verteilungen der Klimaprojektionen besonders geeignet ist. Im Vergleich zum arithmetischen Mittel ist der Median robuster gegenüber Ausreißern, da einzelne extrem abweichende Werte nur wenig den Wert des Medians verändern. Für die folgenden Bewertungen der Klimaprojektionen wird der Wert des Medians herangezogen, um das mittlere Verhalten zu beschreiben.

Allerdings wird bei der Berechnung des Flächenmittels für Baden-Württemberg anstelle des Medians der Flächenmittelwert von Baden-Württemberg gebildet (also

das arithmetische Mittel). Damit wird eine allgemein verständliche Größe errechnet, die auch gut z.B. mit dem Flächenmittel der Beobachtungsdaten verglichen werden kann. Das „Mittel über Baden-Württemberg“, das in den Anlagen verwendet wird, bezieht sich also immer auf das Flächenmittel und ist ein arithmetisches Mittel. Wird dagegen bei der Auswertung der Klimaprojektionen im folgenden Kapitel von „im Mittel“ gesprochen (z.B. „im Mittel ergibt sich für die Kennzahl...“), so ist grundsätzlich der Median gemeint.

Unterschied Anzahl der Klimaprojektionen bei der Medianberechnung

Wie bereits erwähnt ist bei der Auswertung der Ergebnisse der Klimaprojektionen zu beachten, dass für die WETTREG2003- und die CCLM-Modelle keine Werte für die ferne Zukunft vorliegen. Daher basieren die Angaben zu Mittelwerten und Median für die nahe Zukunft und für die ferne Zukunft auf einer unterschiedlichen Anzahl von Klimaprojektionen.

Dieser Unterschied in der Anzahl der Klimaprojektionen kann dazu führen, dass der Median für die ferne Zukunft in den Tabellen in den Anlagen kleiner ist als für die nahe Zukunft, aber dennoch das Klimasignal für die ferne Zukunft größer ist als für die nahe Zukunft.

So beträgt beispielsweise der Median der Standardabweichung Globalstrahlung der verwendeten Klimaprojektionen im Ist-Zustand $91,5 \text{ W/m}^2$, in der nahen Zukunft $93,3 \text{ W/m}^2$ und in der fernen Zukunft $92,2 \text{ W/m}^2$ (vgl. Anlage F-02 und Anlagen J-03 und J-04).

Daraus könnte auf eine Abnahme der Standardabweichung Globalstrahlung von der nahen Zukunft zur fernen Zukunft geschlossen werden. Dabei basiert aber der Median für den Ist-Zustand und für die nahe Zukunft auf 20 Klimaprojektionen, während für die ferne Zukunft nur 15 Klimaprojektionen im Auswerte-Ensemble zur Verfügung stehen.

Werden die Werte für den Median der Standardabweichung Globalstrahlung für alle drei Zeiträume aus den 15 Klimaprojektionen errechnet, ergeben sich für den Ist-Zustand $88,6 \text{ W/m}^2$, für die nahe Zukunft $89,3 \text{ W/m}^2$ Tage und für die ferne Zukunft $92,2 \text{ W/m}^2$. Somit zeigt sich rechnerisch

eine Zunahme der Standardabweichung der Globalstrahlung und somit der Variabilität der Globalstrahlung zur fernen Zukunft im Vergleich zum Ist-Zustand und zur nahen Zukunft. Allerdings sind die Änderungen gering.

Die Unterschiede in der Anzahl der Klimaprojektionen zwischen der nahen Zukunft und der fernen Zukunft sind somit bei der Interpretation der Gegenüberstellungen in den Tabellen der Anlage J und in den Box-Whisker-Plots der Anlage F zu beachten.

Werden dagegen die Differenzendarstellungen in den Säulendiagrammen für jede Klimaprojektion und jede Kennzahl betrachtet (Anlage G), können hier direkt die Ergebnisse für die nahe Zukunft mit den Ergebnissen der fernen Zukunft verglichen werden.

Unterschied der Medianberechnung des Klimasignals

Um das Klimasignal zu ermitteln, können zwei unterschiedliche Wege gewählt werden:

- Der Wert des Klimasignals wird direkt aus den Differenzen des Medians der Zukunftsszenarien und des Medians des Ist-Zustands der verwendeten Klimaprojektionen gebildet. Beispiel (vgl. auch Bild 6-1): wie in Tabelle J-01 und J-02 in den Anlagen für die 20 Klimaprojektionen des $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Rasters zu sehen ist, beträgt der Median („med(25km)“ in den Tabellen) für die Lufttemperatur des Ist-Zustands $8,5^\circ\text{C}$, der Median der nahen Zukunft $9,7^\circ\text{C}$. Somit ergibt sich aus der Differenz der beiden Temperaturen ein Klimasignal von $1,2^\circ\text{C}$.
- Der Wert des Klimasignals wird aus den Differenzen des Medians der Zukunftsszenarien und des Medians des Ist-Zustands für jede Klimaprojektion einzeln gebildet. Somit wird für jede Klimaprojektion zunächst getrennt die Differenz aus Wert des Zukunftsszenarios zum Ist-Zustands gebildet. Dann werden diese Differenzen sortiert und aus den Differenzen der Median gebildet.

Dadurch ergeben sich im Vergleich zum ersten Weg Unterschiede. Beispiel: wie in Tabelle J-01 und J-02 in den Anlagen für die 20 Klimaprojektionen des $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Rasters zu sehen ist, beträgt der Median des Klimasignals („abw-med(25km)“) für die Luft-

temperatur der nahen Zukunft zum Ist-Zustand 1,1 °C. Somit beträgt das Klimasignal statt 1,2 °C (wie bei der Bildung der direkten Differenz der Mediane) nun 1,1 °C (vgl. Bild 6-1).

Im weiteren Text wird der Median des Klimasignals einer Kennzahl aus den einzelnen Simulationsergebnissen entsprechend dem aufgezeigten zweiten Weg berechnet. Dies hat zur Folge, dass die Summe des Werts des Medians für den Ist-Zustand und des Werts des Medians des Klimasignals zusammen nicht exakt dem Wert des Medians des Zukunftsszenarios entsprechen.

5.2 Quantitativer und qualitativer Vergleich der regionalen Klimaprojektionen

Für die Benennung der Klimaprojektionen wird im folgenden Text immer Bezug auf die Kürzel genommen, die in Tabelle 3-1 aufgeführt sind. Auch in den Abbildungen und Tabellen in den Anlagen sind die zur Vereinfachung der Schreibweise die Kürzel für die Klimaprojektionen aufgeführt.

Zur Verdeutlichung der Richtung der Änderungen der Werte der Kennzahlen werden im Folgenden immer das Pluszeichen und das Minuszeichen verwendet. Daher bedeutet z.B. eine Abnahme der Heiztage um -15 Tage gegenüber dem Ist-Zustand, dass entsprechend der Auswertungen der Klimaprojektionen in der Zukunft 15 Heiztage weniger häufig vorkommen.

5.2.1 Kennzahlen der Temperatur

Die folgenden Auswertungen zu den Kennzahlen der Temperatur beziehen sich auf die Anlagen C-01, D-01, E-01, F-01, G-01 und H-01 sowie auf die Tabellen in den Anlagen J-01 und J-02.

Jahresmitteltemperatur

Ist-Zustand (1971-2000)

Die Jahresmitteltemperatur von Baden-Württemberg auf Basis der interpolierten Stationsdaten beträgt für den Ist-Zustand (1971-2000) etwa 8,4 °C. Die Modellergebnisse streuen in einem Bereich zwischen 7,4 °C (H3Q3_RCA) und etwa 9,4 °C (E1_REMO). Die Beobachtungsdaten

werden demnach von den Regionalmodellen in ähnlichem Maße unter- wie überschätzt.

Die statistischen Klimaprojektionen (WETTREG) sowie die bias-korrigierten CCLM-Modelle zeigen erwartungsgemäß die geringsten Abweichungen von den Beobachtungsdaten. Das Regionalmodell REMO oder das Modell RCA zeigen Tendenzen zu einer Überschätzung der gemessenen Jahresmitteltemperatur. Beim CLM-Modell wird eine leichte Unterschätzung der gemessenen Jahresmitteltemperatur deutlich, unabhängig vom verwendeten Globalmodell.

Bei den flächenhaften Darstellungen der Jahresmitteltemperatur ergibt sich eine Gesamtspannweite zwischen etwa 4,6 °C und 11,2 °C. Dies wirkt angesichts der unterschiedlichen Höhenlagen im Gebiet plausibel.

Die REMO-Regionalmodelle geben die Flächenmuster der Temperatur gut wieder, die absoluten Werte liegen jedoch zu hoch. Die RCA-Regionalmodelle zeigen dagegen Probleme bei den Flächenmustern, insbesondere im Bereich des südlichen Schwarzwalds. Auch die Temperaturunterschiede über die Fläche von Baden-Württemberg fallen bei diesem Regionalmodell eher gering aus.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Die Temperaturerhöhung für die Jahresmitteltemperatur in der nahen Zukunft liegt entsprechend des Medians der Klimaprojektionen bei +1,1 °C und somit einer mittleren Temperatur von 9,7 °C.

Die Erhöhungen schwanken je nach Modell zwischen +0,7 °C (B_RCA) und +2,1 °C (H3Q0_H3Q0). Generell zeigen die CLM-Modelle und die Hadley-Modelle sowohl recht hohe Temperaturen als auch deutliche Temperaturerhöhungen. Die Temperaturerhöhung liegt bei den meisten Modellen zwischen +0,8 °C und +1,2 °C.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Die Temperaturzunahmen zur fernen Zukunft hin sind sehr deutlich. Der Median der Klimaprojektionen für die Jahresmitteltemperatur erhöht sich um +3,1 °C auf 11,5 °C. Die maximale Temperaturerhöhung zeigt die Klimaprojektion H3Q0_H3Q0 mit +4,2 °C. Die meisten Klimapro-

jektionen simulieren Temperaturerhöhungen um mehr als +2,4 °C. Alle Klimaprojektionen zeigen auch eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur von der nahen zur fernen Zukunft.

Heiztag

Ist-Zustand (1971-2000)

Die Anzahl der Heiztage auf Basis der Beobachtungsdaten liegt bei etwa 287 Tage im Jahr. Auch die Ergebnisse der Regionalmodelle liegen recht eng um diesen Wert. Die Klimaprojektion H3Q3_H3Q3 markiert mit etwa 270 Tagen die untere Grenze der auftretenden Anzahl von Heiztagen und die Klimaprojektion E3_REGCM3 mit etwa 312 Tagen die obere Grenze.

Die Abweichungen von den Beobachtungsdaten betragen demnach zwischen -16 und +26 Tagen. Ein einheitliches Verhalten der Regionalmodelle kann nicht identifiziert werden. Je nach Globalmodell können die Regionalmodelle die Anzahl der Heiztage der Beobachtungsdaten sowohl unter- wie überschätzen, dies trifft für das CLM- wie für das REMO-Modell zu. Die bias-korrigierten CCLM-Modelle und die WETTREG-Modelle liegen wiederum sehr eng am Beobachtungswert. Es zeigen sich geringe Unterschiede bei den CCLM-Modellen bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung (25 x 25 km² und 7 x 7 km²), ohne jedoch eine bestimmte Tendenz erkennen zu lassen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Für die Kennzahl Heiztag wird von allen Klimaprojektionen eine Abnahme simuliert. Als Median ergeben sich für die nahe Zukunft 271 Heiztage, was einer Abnahme von etwa -16,1 Tagen entspricht. Die geringste Abnahme zeigt die Klimaprojektion B_RCA (Abnahme von -2,6 Tagen). Die stärkste Abnahme wird für die Klimaprojektion H3Q3_RCA mit -28,5 Tagen berechnet.

Die Abnahmen liegen für die meisten Klimaprojektionen zwischen -15 Tagen und -20 Tagen. Die Werte aller untersuchten Regionalmodelle verhalten sich beim Heiztag nicht auffällig.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Die Zunahme der Jahresmitteltemperatur zur fernen Zukunft hin beeinflusst stark die Anzahl der Heiztage, so dass der Median um 50 Tage auf 244 Tage sinkt. Die minimale Abnahme liegt bei -32 Tagen (WETTREG2006), die maximale bei über -61 Tagen (H3Q0_H3Q0). Für alle Klimaprojektionen sinkt die Anzahl der Heiztage von der nahen zur fernen Zukunft um mindestens -15 Tage.

Kühlgradtage

Ist-Zustand (1971-2000)

Das Flächenmittel des Beobachtungswertes der Kühlgradtage liegt bei 77 Kelvin*Tag. Die Klimaprojektionen zeigen mitunter eine hohe Abweichung vom Beobachtungswert. Während die Klimaprojektion H3Q3_RCA mit einem Wert von etwa 30 Kelvin*Tag den Beobachtungswert unterschätzt, überschätzen die Klimaprojektionen H3Q0_H3Q0 (Wert: 184 Kelvin*Tag) und insbesondere H3Q3_H3Q3 (Wert: 273 Kelvin*Tag) den Beobachtungswert deutlich.

Damit existieren Abweichungen bis zu einem Wert von annähernd 200 Kelvin*Tag. Insbesondere die Hadley-Modelle zeigen eine große Abweichung von den Beobachtungsdaten. Die RCA-Modelle unterschätzen die Beobachtungswerte leicht, während die CLM-Modelle eine leichte Überschätzung aufweisen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median des Werts der Kühlgradtage liegt bei 138 Kelvin*Tag in der „nahen Zukunft“. Dies entspricht einer Zunahme von +48 Kelvin*Tag gegenüber dem Beobachtungsmittel. Minimal wird eine Erhöhung um etwa +12 Kelvin simuliert (E3_REGCM3), maximal eine Erhöhung um +168 Kelvin*Tag (H3Q0_H3Q0). Insbesondere die Hadley-Modelle weisen recht starke Erhöhungen des Werts der Kühlgradtage auf.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Die weitere Temperaturerhöhung bis zum Ende des Jahrhunderts wirkt sich deutlich auf die Werte der Kühlgradtage aus. Der Median der Klimaprojektionen steigt um 231 Kelvin*Tag auf 297 Kelvin*Tag. Minimal ergibt sich eine Erhöhung um +77 Kelvin*Tag (H3Q3_RCA), maximal werden +383 Kelvin*Tag erreicht (H3Q0_H3Q0). Die Zu-

nahmen der Werte der Kühlgradtage von der nahen zur fernen Zukunft sind deutlich größer als die Zunahmen vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft.

Vegetationsbeginn

Ist-Zustand (1971-2000)

Der Vegetationsbeginn auf Basis der Beobachtungsdaten liegt bei Anfang April. Beim Modell E1_REMO tritt der Vegetationsbeginn bereits um den 25. März auf. Dagegen wird die Klimaprojektion H3Q0_CLM der Vegetationsbeginn erst für etwa den 11. April berechnet. Gerade die Hadley-Modelle zeigen eine Überschätzung der Beobachtungsdaten. Auch die CLM-Modelle weisen Überschätzungen der Beobachtungsdaten auf. Die Abweichungen der Ergebnisse der Klimaprojektionen von den Beobachtungsdaten liegen zwischen -7 und +11 Tagen.

Insgesamt erscheinen die Abweichungen des Vegetationsbeginns aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen vom Beobachtungswert relativ gering, was die vorliegende Berechnung des Vegetationsbeginns als recht robustes Maß erscheinen lässt.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Durch den Temperaturanstieg im Zukunftsszenario ergibt der Median für den Vegetationsbeginn in der nahen Zukunft eine Vorverlegung um -5,2 Tage (etwa 27. März). Je nach Klimaprojektion tritt der Vegetationsbeginn zwischen -2,5 Tagen und -8,7 Tagen früher ein. Neben den Hadley-Modellen fallen die WETTREG2003-Daten mit einer deutlichen Vorverlegung des Vegetationsbeginns auf.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Der Vegetationsbeginn wird auch für den Zeitraum der fernen Zukunft weiter vorverlegt. Der Median zeigt einen etwa zwei Wochen früheren Vegetationsbeginn als im Ist-Zustand (etwa 20. März). Auf Basis der Klimaprojektion H3Q0_H3Q0 tritt der Vegetationsbeginn sogar drei Wochen früher ein. Für alle Klimaprojektionen wird der Vegetationsbeginn mindestens 8 Tage früher als im Ist-Zustand simuliert.

Datum letzter Frost

Ist-Zustand (1971-2000)

Das Datum des letzten Frostes bei den Beobachtungsdaten liegt etwa am 24. April. Für die Klimaprojektion

A_RM5.1 ergibt sich dagegen der 11. Mai, während bei den meisten Klimaprojektionen deutlich früher bereits das Datum des letzten Frostes berechnet wird, wie beispielsweise E1_REMO am 11. März.

Die Abweichungen der Klimaprojektionen von den Beobachtungsdaten liegen zwischen -44 und +18 Tagen. Insbesondere die REMO-Modelle simulieren den letzten Frost deutlich früher. Aber auch die CCLM-Modelle, die eigentlich bias-korrigiert sind, legen das Datum des letzten Frostes auf Anfang bis Mitte April. Diese Abweichung ist dadurch erklärbar, dass die Bias-Korrektur auf das Temperaturmittel abzielt, bei der Berechnung des Datums des letzten Frostes jedoch das Temperaturminimum des Tages ausschlaggebend ist.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Wie beim Vegetationsbeginn wird auch das Datum des letzten Frosts in der nahen Zukunft einige Tage früher als im Ist-Zustand simuliert. Als Median ergibt sich für das Datum des letzten Frosts der 2. April, also etwa eine Woche früher als im Ist-Zustand. Insbesondere die CCLM-Modelle fallen durch sehr variable Unterschiede auf. Mit fast -13 Tagen weist die Klimaprojektion E2_CCLM-25 mit das stärkste Klimasignal hinsichtlich des Datums des letzten Frosts auf, während die WETTREG2010-Daten mit nur knapp -2 Tagen die geringste Differenz zum Ist-Zustand zeigen.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Das Datum des letzten Frosts wird in der fernen Zukunft in ähnlicher Weise vorverlegt wie der Vegetationsbeginn. Als Median ergibt sich für den letzten Frost eine Vorverlegung um -20,3 Tage gegenüber dem Ist-Zustand, was etwa dem 22. März für die ferne Zukunft entspricht. Die Unterschiede zum Ist-Zustand erreichen bei der Klimaprojektion E1_REMO annähernd einen Monat. Für alle Klimaprojektionen ergibt sich mindestens jedoch eine Vorverlegung um -8 Tage.

Frosttag

Ist-Zustand (1971-2000)

Beim Frosttag ergibt sich ein sehr ähnliches Bild wie beim Datum des letzten Frostes. Der Flächenmittelwert bei den Beobachtungsdaten für den Ist-Zustand liegt bei etwa 97

Frosttagen im Jahr. Auf Basis der Klimaprojektionen werden zwischen 50 und 120 Frosttage simuliert. Die Abweichungen der Klimaprojektionen von den Beobachtungsdaten sind nahezu identisch mit den Abweichungen beim Datum des letzten Frostes.

Die flächenhafte Abbildung der Frosttage lässt bei den Beobachtungsdaten insbesondere das Rheintal erkennen. Die Verteilung orientiert sich erwartungsgemäß stark an der Höhenverteilung. Die REMO-Modelle zeigen zwar eine ähnliche Verteilung, sie unterschätzen jedoch die Anzahl der Frosttage deutlich. Ähnlich verhält es sich mit den CCLM-Modellen und CLM-Modellen mit einer etwas höheren Anzahl an Frosttagen. Die Hadley-Modelle zeigen eine Tendenz zur Überschätzung der Anzahl der Frosttage im Vergleich zu den Beobachtungsdaten. Die RCA-Modelle geben wiederum die räumliche Verteilung am schlechtesten wieder, wobei dies in erster Linie die zu geringen Extremwerte betrifft. Alle anderen Klimaprojektionen sind von der räumlichen Verteilung her befriedigend.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der Anzahl der Frosttage sinkt für das Zukunftsszenario um -19,1 Tage auf 62,4 Tage. Während die WETTREG2003-Daten mit -31,3 Tagen die größte Abnahme aller Klimaprojektionen zeigt, markiert das Modell E3_REMO mit -14,3 Tagen die geringste Abnahme der Frosttage, wobei einige Klimaprojektionen im Bereich von etwa -15 Tagen liegen.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Der Median der Anzahl der Frosttage reduziert sich für die ferne Zukunft im Mittel um -47,2 Tage auf 37,5 Tage. Die maximale Abnahme der Frosttage in der fernen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand beträgt -55 Tage (H3Q0_H3Q0). Für alle Klimaprojektionen nimmt die Anzahl der Frosttage um mindestens -32 Tage gegenüber dem Ist-Zustand ab. Die Unterschiede der fernen Zukunft zur nahen Zukunft betragen dabei mindestens -15 Tage.

Eistag

Ist-Zustand (1971-2000)

Aus den Beobachtungsdaten ergeben sich jährlich im Mittel etwa 23 Eistage für Baden-Württemberg. Die Klimaprojektion A_RM5.1 weist mit etwa 9 Eistagen im Jahr die

geringste Tagesanzahl, die Klimaprojektion H3Q3_RCA mit 38 Tagen die höchste Tagesanzahl auf. Das REMO-Modell zeigt tendenziell eine geringere Anzahl von Eistagen, die CLM und CCLM-Modelle dagegen etwas höhere Anzahlen als die Beobachtungsdaten. Die Unterschiede liegen zwischen -15 und +15 Tagen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der Anzahl der Eistage nimmt im Zukunftsszenario um -8,9 Tage auf 16,3 Tage ab. Die Klimaprojektion E3_RCA weist nur eine Abnahme von -4 Tagen, die Klimaprojektion WETTREG2003 eine Abnahme von über -17 Tagen auf. Im Mittel zeigen die Hadley-Modelle recht hohe Abnahmen der Eistage in der nahen Zukunft.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Der Median der Anzahl der Eistage geht in der fernen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand um etwa -18 Tage auf 5,2 Tage zurück. Die maximale Abnahme erreicht -27 Tage (Klimaprojektion H3Q3_RCA). Für alle Klimaprojektionen tritt eine Abweichung von mindestens -6 Tagen in der fernen Zukunft im Vergleich zum Ist-Zustand auf.

Tropennacht

Ist-Zustand (1971-2000)

Bei der Kennzahl Tropennacht zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Datum des letzten Frostes und beim Frosttag, da alle drei Kennzahlen auf dem Tagesminimum der Temperatur basieren.

Für die Beobachtungsdaten ergibt sich als Flächenmittel für Baden-Württemberg ein Wert unter 1 für die Anzahl der Tropennächte pro Jahr. Bei den Klimaprojektionen für den Ist-Zustand liegen die Anzahlen der Tropennächte unter 5, mit Ausnahme der Klimaprojektion H3Q3_H3Q3 (9 Tage). Auffällig sind auch die CCLM-Modelle mit im Mittel 3 Tropennächte pro Jahr. Dies kann jedoch auf die Bias-Korrektur zurückzuführen sein, da diese Korrektur in Baden-Württemberg vor allem eine Erhöhung der Temperaturwerte bewirkt.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Auch für die nahe Zukunft ist der Median der Anzahl an Tropennächten für Baden-Württemberg mit 3,3 Tagen sehr gering. Dies entspricht im Mittel über alle Klimaprojektio-

nen einer Erhöhung um +1,0 Tag. Gerade die WETTREG-Modelle simulieren kaum Zunahmen für die Anzahl der Tropennächte pro Jahr. Dagegen zeigen die CCLM-Modelle mit einer Zunahme von etwa +4 Tropennächten pro Jahr oder die Hadley-Modelle mit Zunahmen von bis zu +9 Tropennächten pro Jahr ein deutlich stärkeres Klimasignal.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Der Median der Anzahl der Tropennächte für die ferne Zukunft steigt deutlich um +7,5 Tagen auf 7,9 Tage an. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen sind jedoch weiterhin recht unterschiedlich. Die WETTREG-Modelle simulieren weniger als 1 Tropennacht, während sich beim Modell H3Q0_H3Q0 über 27 Tropennächte ergeben.

Tropentag und Sommertag

Ist-Zustand (1971-2000)

Die Kennzahlen Tropentag und Sommertag zeigen eine sehr ähnliche Verteilung der Werte der Klimaprojektionen im Vergleich zu Beobachtungsdaten. Beim Tropentag liegt der Beobachtungswert bei etwa 4 Tagen pro Jahr, beim Sommertag bei 30 Tagen pro Jahr. Die geringste Anzahl von Tropen- und Sommertagen wird für die Klimaprojektion H3Q3_RCA berechnet (<1 bzw. 7 Tage). Für die Klimaprojektion H3Q3_H3Q3 ergibt sich dagegen die höchste Anzahl (25 bzw. 49 Tage).

Die Unterschiede der Ergebnisse der Klimaprojektionen zu den Beobachtungsdaten liegen beim Tropentag zwischen -4 und +21 Tagen, beim Sommertag -23 und +19 Tagen. Die Klimaprojektionen, die die Anzahl der Tropen- und Sommertage der Beobachtungsdaten überschätzen, weisen eine vergleichbare Differenz zu den Beobachtungsdaten sowohl für den Tropentag als auch für den Sommertag auf.

Dagegen treten bei den Klimaprojektionen mit Unterschätzung beim Sommertag deutlich höhere Differenzen auf. Insbesondere die CCLM-Modelle unterschätzen neben den RCA-Modellen die Anzahl an Sommertagen um bis zu -20 Tagen.

Die räumliche Verteilung der Anzahl der Sommertage stimmt sehr gut mit der Verteilung der Anzahl der Frosttage überein, da beide stark von der Geländehöhe abhängen.

Die WETTREG-Modelle, die REMO-Modelle und die CLM-Modelle weisen die beste Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten auf. Die Hadley-Modelle überschätzen die Anzahl der Sommertage, insbesondere in den höher gelegenen Regionen. Bei den CCLM-Modellen zeigt sich im Mittel eine deutliche Unterschätzung der Anzahl der Sommertage. Während in den höher gelegenen Regionen die Anzahl der Sommertage recht gut mit den Beobachtungsdaten übereinstimmt, wird diese in den niedriger gelegenen Regionen deutlich unterschätzt. Der Farbverlauf ist deutlich zu ausgeglichen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Im Zukunftsszenario verhalten sich die Ergebnisse der Klimaprojektionen für den Tropentag und den Sommertag wiederum recht ähnlich. Für beide Kennzahlen zeigt sich eine Zunahme im Zukunftsszenario für alle Klimaprojektionen. Der Median der Tropentage nimmt um +2,7 Tage auf 6,7 Tage zu, während die Sommertage um +10,1 Tage auf 35,6 Tage zunehmen. Für beide Kennzahlen zeigt die Klimaprojektion H3Q3_H3Q3 mit Zunahmen von +13,8 Tagen bzw. +22,2 Tagen die stärksten Zunahmen aller Klimaprojektionen.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Auch für die ferne Zukunft zeigt sich ein ähnliches Bild für die Tropentag und Sommertag. Bei beiden Kennzahlen wird eine deutliche Zunahme an Tagen in der fernen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand verzeichnet. Beim Tropentag steigt der Median aller Klimaprojektionen um +20,8 Tage auf 26,6 Tage und für den Sommertag um +32,3 Tage auf 71,9 Tage. Die stärksten Abweichungen zeigen die Klimaprojektion A_RM5.1 mit +36 Tropentagen und die Klimaprojektion WETTREG2010 mit +54 Sommertagen. Für beide Kennzahlen und alle Klimaprojektionen nimmt die Anzahl der Tage auch von der nahen zur fernen Zukunft deutlich zu.

5.2.2 Kennzahlen des Niederschlags

Die folgenden Auswertungen zu den Kennzahlen des Niederschlags beziehen sich auf die Anlagen C-02, D-02, E-02, F-02, G-02 und H-02 sowie auf die Tabellen in den Anlagen J-03 und J-04.

Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr

Ist-Zustand (1971-2000)

Der Flächenmittelwert des Niederschlags für das hydrologische Winterhalbjahr für Baden-Württemberg liegt auf Basis der Beobachtungsdaten bei etwa 443 mm.

Die meisten Klimaprojektionen zeigen mit bis zu 685 mm (E3_REGCM3) höhere Summen. Die Überschätzungen der Klimaprojektionen liegen zwischen +10% und +55%. Lediglich die bias-korrigierten Modelle und die WETTREG-Modelle stimmen sehr gut mit den Beobachtungsdaten überein.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Beim hydrologischen Winterhalbjahr zeigt sich eine klare Tendenz der Zunahme von Niederschlägen in der nahen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand. Der Median der Niederschlagssumme nimmt um +7% auf 572 mm zu. Es werden maximale Zunahmen für die ferne Zukunft von +24% simuliert (WETTREG2003). Im Gegensatz dazu gibt es einige wenige Klimaprojektionen, die sogar Abnahmen der Winterniederschläge in der nahen Zukunft bis zu -1,8% (WETTREG2010) zeigen. Insgesamt zeigt sich jedoch die Tendenz einer Erhöhung der Winterniederschläge um im Mittel +5% bis +15%.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Auch für die ferne Zukunft zeigt der Median Niederschlagszunahmen gegenüber dem Ist-Zustand von +15,9% auf 627 mm. Wiederum ergeben sich zwar bei den WETTREG2010-Daten Niederschlagsabnahmen (-4,2%), die Tendenz der Zunahme der Winterniederschläge in der nahen Zukunft wird bei den meisten anderen Klimaprojektionen jedoch in der fernen Zukunft deutlich verstärkt (maximal E3_RACMO2 +26%).

Insgesamt zeigt sich bei den Niederschlagssummen im hydrologischen Winterhalbjahr eine Zunahme der Differenzen von der nahen zur fernen Zukunft.

Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr

Ist-Zustand (1971-2000)

Für das Sommerhalbjahr ergibt sich auf Basis der Beobachtungsdaten ein mittlerer Summenwert für Baden-Württemberg von etwa 512 mm. Auch hier treten durch die Klimaprojektionen Überschätzungen des Beobachtungswerts auf (maximale Summe: 677 mm (E3_RCA)). Die CLM- und RCA-Modelle zeigen tendenziell höhere Abweichungen im Sommerhalbjahr mit bis zu +32%. Ähnlich verhält es sich mit der Klimaprojektion E3_REGCM3. Die REMO-Modelle überschätzen die Beobachtungsdaten lediglich um +10%.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr zeigt kaum eine Veränderung der Niederschlagssumme in der nahen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand (-0,7%, 547 mm). Die meisten Klimaprojektionen zeigen allerdings Abnahmen der Niederschlagssummen von bis zu -7% (WETTREG2010). Gerade die RCA-Modelle simulieren aber auch eine Zunahme der Sommerniederschläge in der nahen Zukunft von bis zu +5,8% (E3_RCA).

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft zeigen sich mit Ausnahme der Klimaprojektion B_RCA (+4,3%) durchwegs Abnahmen der Sommerniederschläge gegenüber dem Ist-Zustand um bis zu -21% (E1_CLM). Der Median zeigt eine Niederschlagsabnahme von -9,4%, was einer Summe von 505 mm entspricht.

Insbesondere die Modelle WETTREG und CLM simulieren deutliche Abnahmen der Sommerniederschläge für die ferne Zukunft. Bei allen Klimaprojektionen nimmt die Niederschlagssumme für das hydrologische Sommerhalbjahr von der nahen zur fernen Zukunft deutlich um mehrere Prozent ab.

Niederschlagssumme im Jahr

Ist-Zustand (1971-2000)

Die Niederschlagssumme im Jahr ist die Summe der hydrologischen Halbjahre. Der Flächenmittelwert für Baden-Württemberg laut Beobachtungsdaten liegt bei 950 mm. Für die Klimaprojektionen E3_RCA und E3_REGCM3

werden allerdings Jahressummen von 1310 bis 1350 mm simuliert. Insbesondere die RCA- und CLM-Modelle zeigen eine Überschätzung der Beobachtungsdaten um teilweise über +40 %.

Die Niederschlagsverteilung im Jahr verdeutlicht bei den Beobachtungsdaten insbesondere den Schwarzwald mit größeren Niederschlagssummen. Die räumliche Verteilung des Niederschlags wird von allen Klimaprojektionen in ähnlicher Weise wiedergegeben.

Ausnahme bilden die RCA-Modelle, die die Niederschlagsmaxima zu weit östlich simulieren. Die Hadley-Modelle zeigen eine Tendenz, die Niederschlagshöhen im Schwarzwald zu überschätzen. Beim REMO-Modell auf Basis des ECHAM5-run3 wird zudem das Niederschlagsmaximum im Schwarzwald zu weit westlich simuliert. Dies könnte daran liegen, dass hier nicht der durch Wind verdriftete Niederschlag betrachtet wurde.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median zeigt eine Zunahme der Niederschlagsjahressumme um +4,1 % auf 1105 mm für die nahe Zukunft im Vergleich zum Ist-Zustand. Dabei treten je nach Klimaprojektion jedoch unterschiedliche Tendenzen für das Zukunftsszenario auf. Für die Klimaprojektion H3Q3_RCA wird eine Niederschlagszunahme von annähernd +10 % berechnet, während laut WETTREG2010-Daten eine Abnahme von fast -5 % simuliert wird.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft ergibt sich für den Median eine Niederschlagszunahme um +1,3 % auf 1142 mm. Die Modellergebnisse driften jedoch sehr weit auseinander. Die Klimaprojektion A_RM5.1 zeigt Niederschlagsabnahmen um -10,4 % gegenüber dem Ist-Zustand für die ferne Zukunft, wohingegen die Klimaprojektion E3_RACMO2 eine Niederschlagszunahme von +12,6 % berechnet.

Niederschlag_{Frühjahr}

Ist-Zustand (1971-2000)

Die mittlere Niederschlagsmenge im Frühjahr in Baden-Württemberg wird für die Beobachtungsdaten auf etwa 225 mm berechnet. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass bezüglich der Abweichungen der Modellergebnisse von

den Beobachtungsdaten die Niederschlagsmenge im Frühjahr eine Mischung aus den Niederschlagswerten der hydrologischen Winterhalbjahre und Sommerhalbjahre darstellt. Die Klimaprojektion A_RM5.1 weist mit etwa 359 mm die höchste Niederschlagssumme im Frühjahr auf. Die Abweichungen der Klimaprojektionen vom Beobachtungswert liegen zwischen -1 % und +59 %.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Für das Frühjahr zeigt der Median eine Niederschlagszunahme von +5,6 % auf 258 mm für die nahe Zukunft im Vergleich zum Ist-Zustand.

Lediglich die Klimaprojektionen H3Q0_CLM, E3_REMO und H3Q0_H3Q0 zeigen eine deutliche Abnahme der Niederschlagssumme von mehr als -5 %. Die meisten anderen Klimaprojektionen liegen bei Niederschlagszunahmen von bis zu +15 %.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für das Frühjahr ergibt sich für den Median in der fernen Zukunft eine Zunahme der Niederschlagssumme im Frühjahr um +10,4 % gegenüber dem Ist-Zustand auf 302 mm. Die Hadley-Modelle bilden das Minimum (-7 %, H3Q0_CLM) und das Maximum (+27 %, H3Q3_H3Q3) der Änderung der Niederschlagssumme im Frühjahr zum Ist-Zustand aus allen Klimaprojektionen.

Niederschlag_{Vegetationsperiode}

Ist-Zustand (1971-2000)

Der Niederschlag in der Vegetationsperiode liegt auf Basis der Beobachtungsdaten bei etwa 435 mm. Die Klimaprojektion E3_RCA weicht mit etwa 560 mm (+29 %) am stärksten von den Beobachtungsdaten ab. Tendenziell überschätzen die meisten Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles die Niederschläge in der Vegetationsperiode im Vergleich zu den Beobachtungsdaten.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Beim Niederschlag in der Vegetationsperiode zeigt der Median mit einer Abnahme von -0,9 % nur geringfügige Änderungen zur nahen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand. Die stärkste Abnahme der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode tritt bei der Klimaprojektion H3Q0_H3Q0 mit -14 % auf. Es zeigen sich jedoch auch

Niederschlagszunahmen bis zu +6,3% (E3_RCA). Ansonsten zeigt sich ein uneinheitliches Bild mit Niederschlagszunahmen oder Niederschlagsabnahmen in der nahen Zukunft über den gesamten Wertebereich.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die Vegetationsperiode der fernen Zukunft zeigt der Median eine weitere Abnahme der Niederschlagssumme gegenüber dem Ist-Zustand von -13,1% auf 420,6mm. Alle Klimaprojektionen außer der Klimaprojektion B_RCA (+4,1%) simulieren eine Abnahme der Niederschlagssumme bis annähernd -23% (E2_CLM). Insbesondere die WETTREG-Modelle als auch die CLM-Modelle zeigen recht hohe Abnahmen der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode in der fernen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand.

Starkniederschlags-Höhe

Ist-Zustand (1971-2000)

Bei den Starkniederschlagshöhen ergeben sich statt den Überschätzungen wie bei den Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode eher Unterschätzungen. Die Starkniederschlagshöhe auf Basis der Beobachtungsdaten für Baden-Württemberg wird auf etwa 41 mm pro Tag berechnet. Fast alle Klimaprojektionen unterschätzen die Beobachtungsdaten hinsichtlich der Starkniederschlagshöhe. Die Unterschätzung liegt jedoch weitgehend unter -15%.

Aus den Ergebnissen des Auswerte-Ensembles bildet die untere Grenze der Starkniederschläge die Klimaprojektion H3Q3_RCA mit etwa 33 mm. Das Verhalten der Klimaprojektion E1_REMO mit 52 mm und somit einer Überschätzung von annähernd +30% ist hier als Ausreißer zu bewerten.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der Starkniederschlagshöhe nimmt für die nahe Zukunft um +6,5% auf 42 mm gegenüber dem Ist-Zustand zu. Die Zunahmen reichen bis zu etwa +15% (H3Q3_RCA). Es treten jedoch auch vereinzelt Abnahmen der Starkniederschlagshöhe um bis zu -2,6% auf (WETTREG2006). Die meisten Klimaprojektionen zeigen Erhöhungen der Starkniederschlagshöhe um +5% bis +10%.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft nimmt der Median der Starkniederschlagshöhe um +12,8% gegenüber dem Ist-Zustand auf 43,9 mm zu. Mit Ausnahme des WETTREG2010-Modells (-7%) verzeichnen alle Klimaprojektionen eine Zunahme der Starkniederschlagshöhe mit bis zu +38% (E3_REMO). Die Zunahme der Starkniederschlagshöhe der meisten Klimaprojektionen der fernen Zukunft liegt jedoch in einem Bereich von +5% und +20%.

Anzahl der Tage mit Starkniederschlag

Ist-Zustand (1971-2000)

Aus den Beobachtungsdaten ergeben sich als Flächenmittel für Baden-Württemberg etwa 3,6 Starkniederschlagstage pro Jahr. Die Klimaprojektion E3_RACMO2 bildet mit 2,4 Tagen die untere Grenze und die Klimaprojektion E1_REMO mit 5,3 Tagen die obere Grenze der Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles. Es kommt zu ähnlich vielen Überschätzungen wie Unterschätzungen der Beobachtungsdaten durch die Klimaprojektionen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen zeigt eine leichte Erhöhung in der nahen Zukunft um +0,7 Tage auf 4,2 Tage im Vergleich zum Ist-Zustand. Die meisten Klimaprojektionen simulieren Erhöhungen um etwa +0,5 Tage bis +1 Tag. Maximal wird von den WETTREG2003-Daten eine Erhöhung um +1,2 Tage simuliert, minimal sogar eine Abnahme um -0,3 Tage (WETTREG2010).

Ferne Zukunft (2071-2100)

Der Median der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag der fernen Zukunft nimmt um etwa +1 Tag auf 4,7 Tage gegenüber dem Ist-Zustand zu. Die WETTREG-Modelle geben geringe Abnahmen der Anzahl an Starkniederschlagstagen an (-0,7%, WETTREG2010). Alle anderen Klimaprojektionen weisen für die ferne Zukunft eine Zunahme der Starkniederschlagstage von bis zu +2,2 Tagen (E3_RACMO2) aus.

Anzahl der Tage ohne Niederschlag

Ist-Zustand (1971-2000)

Bei den Beobachtungsdaten ergeben sich etwa 227 Tage ohne Niederschlag im Jahr. Lediglich die CCLM-Modelle überschreiten geringfügig diese Anzahl (bis zu +6 Tage).

Alle anderen Klimaprojektionen weisen geringere Werte bis zu 156 Tage ohne Niederschlag im Jahr auf.

Allerdings kann der gewählte Schwellenwert von 1 mm als Grenze für einen Tag ohne Niederschlag deutlichen Einfluss auf das Auswertergebnis nehmen, da viele Klimaprojektionen fast täglich eine geringfügige Niederschlagsmenge simulieren, die aber unter Umständen unter dem Schwellenwert von 1mm liegt. Die Klimaprojektionen E3_REGCM3 und A_RM5.1 sowie allgemein die RCA-Modelle unterschätzen am deutlichsten die beobachtete Anzahl ohne Niederschlag mit bis zu - 71 Tagen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Die Änderung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag in der nahen Zukunft wird von den Klimaprojektionen sehr uneinheitlich simuliert. Für den Median ergibt sich kaum eine Änderung (+0,3 Tage) gegenüber dem Ist-Zustand mit 196 Tagen. Es zeigen aber ähnlich viele Klimaprojektionen eine Zunahme der Anzahl der Tage ohne Niederschlag wie Klimaprojektionen, die eine Abnahme simulieren. Minimal wird eine Abnahme um etwa -8 Tage berechnet (B_RCA) und maximal eine Zunahme um etwa +11 Tage (H3Q0_H3Q0).

Ferne Zukunft (2071-2100)

Der Median der Anzahl der Tage ohne Niederschlag nimmt in der fernen Zukunft um +3,4 Tage gegenüber dem Ist-Zustand zu. Es ergibt sich ein Median von 199 Tagen. Bei der Klimaprojektion A_RM5.1 beträgt die Zunahme über +30 Tage. Nur wenige Modelle simulieren eine Abnahme der Tage ohne Niederschlag (bis zu +11,3 Tage). Die Hadley-Klimaprojektionen fallen durch eine hohe Zunahme der Anzahl der Tage ohne Niederschlag in der fernen Zukunft auf.

Trockenperioden_{Vegetation}

Ist-Zustand (1971-2000)

Die mittlere Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit liegt auf Basis der Beobachtungsdaten bei 3,6 Tagen für Baden-Württemberg. Die Klimaprojektionen zeigen alle eine geringere oder vergleichbare Dauer. Der Medianwert aus den Klimaprojektionen liegt mit 3,2 Tagen jedoch in einem ähnlichen Bereich. Die meisten Klimaprojektionen weichen weniger als 0,8 Tage von der mitt-

leren Dauer der Trockenperioden der Beobachtungsdaten ab. Das Modell E3_REGCM3 zeigt die geringste mittlere Dauer und die Abweichung zu den Beobachtungsdaten erreicht bis zu -1,1 Tagen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Für die nahe Zukunft ergibt der Median eine etwas höhere mittlere Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit von 3,6 Tagen, was im Median einer Erhöhung von +0,2 Tagen im Vergleich zum Ist-Zustand entspricht. Das maximale Klimaänderungssignal bezüglich dieser Kennzahl liegt für die nahe Zukunft bei +0,6 Tagen (E1_CCLM-25). Es zeigt sich für alle Klimaprojektionen fast ausschließlich eine Erhöhung der mittleren Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft erhöht sich die mittlere Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit gegenüber dem Ist-Zustand weiter. Der Median zeigt eine Dauer von 4 Tagen, was auch die Erhöhung des Medians des Klimasignals um +0,8 Tage gegenüber dem Ist-Zustand bestätigt. Bei der Klimaprojektion A_RM5.1 wird sogar eine Erhöhung um +1,6 Tagen simuliert. Insgesamt ergibt sich eine Zunahme der mittleren Dauer von Trockenperioden von der nahen zur fernen Zukunft.

Trockenperioden_{maximal}

Ist-Zustand (1971-2000)

Die längste Dauer von Trockenperioden liefern neben dem E1_REMO-Modell die Beobachtungsdaten mit etwa 21 Tagen. Die Dauern der anderen Klimaprojektionen liegen teilweise deutlich darunter, am deutlichsten die Werte der Klimaprojektion E3_RCA um etwa 13 Tage. Im Mittel ergibt sich aus den Klimaprojektionen eine mittlere längste Dauer der Trockenperiode von 17 Tagen.

Die Differenzen zwischen Modell- und Beobachtungsdaten betragen also maximal bis zu -8 Tagen. Die größten Abweichungen weisen dabei die RCA-Modelle und das E3_REGCM3-Modell auf. Die Unterschätzung der Klimaprojektionen liegt wohl darin begründet, dass viele Klimamodelle häufig eine geringe Niederschlagsmenge (meist kleiner 1 mm pro Tag) simulieren. Überschreitet diese Niederschlagsmenge 1 mm pro Tag, wird entspre-

chend der Definition der Kennzahl die Trockenperiode unterbrochen

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der maximalen Dauer einer Trockenperiode steigt bezüglich des Klimasignals um +0,8 Tage gegenüber dem Ist-Zustand auf 17,5 Tage für die nahe Zukunft. Das Modell H3Q0_H3Q0 simuliert für die nahe Zukunft sogar eine Erhöhung um +2,4 Tage. Bei den WETTREG2003-Daten ergibt sich dagegen eine Abnahme der Dauer um -2,3 Tage. Die Ergebnisse sind zwar uneinheitlich, die meisten Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles geben jedoch eine Zunahme der Dauer der maximalen Trockenperiode an.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft zeigt der Median eine Zunahme der maximalen Trockenperiodendauer um +1,2 Tage gegenüber dem Ist-Zustand (Median = 18,4 Tage). Alle Klimaprojektionen zeigen nun eine Erhöhung der Dauer der maximalen Trockenperiodendauer von bis zu +6,9 Tagen (A_RM5.1). Gegenüber der nahen Zukunft ergibt sich klar die Tendenz der Erhöhung der Dauer der maximalen Trockenperiodendauer, auch wenn insbesondere die RCA-Modelle eine leichte Abnahme simulieren.

5.2.3 Kennzahlen der Globalstrahlung

Die folgenden Auswertungen zu den Kennzahlen des Niederschlags beziehen sich auf die Anlagen C-03, D-03, E-03, F-03, G-03 und H-03 sowie die Tabelle in der Anlage J-05.

Der Vergleich der Beobachtungsdaten der Globalstrahlung mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen muss mit Vorsicht betrachtet werden. Als Messwerte liegen lediglich Daten für die Sonnenscheindauer vor, die über eine Umrechnung mit der Angström-Formel in Globalstrahlung umgewandelt werden (vgl. KLIWA 2008). Diese Umrechnung ist schwierig, da in der Angström-Formel empirische Faktoren verwendet werden und lokale Effekte wie Abschattungen und unterschiedliche Höhenlagen nur im Mittel berücksichtigt werden. Daher sind die Beobachtungsdaten der Globalstrahlung mit großen Unsicherheiten verbunden.

Die CCLM-Daten der Globalstrahlung sind bias-korrigiert, wobei für die Bias-Korrektur nicht Stationsdaten sondern Satellitendaten verwendet wurden. Diese Satellitendaten liegen jedoch erst ab 1983 vor und nicht für den Zeitraum des Ist-Zustands 1971 bis 2000. Etwaige Unterschiede zwischen Beobachtungsdaten und den CCLM-Daten der Globalstrahlung über einen längeren Zeitbereich sind somit weitgehend auf die Angström-Umrechnung und die Bias-Korrektur zurückzuführen.

Die WETTREG-Daten liegen ebenfalls als Sonnenscheindauer vor und müssen entsprechend den Stationsdaten mit der Angström-Formel umgerechnet werden.

Summe der Globalstrahlung/Jahr

Ist-Zustand (1971-2000)

Die mittlere Globalstrahlungssumme pro Jahr liegt auf Basis der Beobachtungsdaten bei etwa 1040 kWh/Jahr. Die untere Grenze der Modellsimulationen nimmt die Klimaprojektion E3_REGCM3 mit 860 kWh/Jahr ein, die obere Grenze die Klimaprojektion A_RM5.1 mit etwa 1300 kWh/Jahr.

Die CCLM-Daten liegen etwa +120 kWh/Jahr über den Beobachtungsdaten, was jedoch wie oben beschrieben auf die Umrechnung mit der Angström-Formel zurückzuführen sein kann. Werden die anhand der Satellitendaten korrigierten CCLM-Daten als Bezugsgröße genommen anstelle der Beobachtungswerte, so liegen die meisten Klimaprojektionen in einem recht engen Bereich zusammen. Lediglich die Klimaprojektionen, die bereits eine Unterschätzung der Beobachtungsdaten zeigen, würden noch weiter von der Bezugsgröße entfernt liegen.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median zeigt in der nahen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand kaum eine Änderung der Globalstrahlungssumme im Jahr (-1,2 kWh/m²). Allerdings variieren die Ergebnisse für die einzelnen Klimaprojektionen zwischen von -40 kWh/m² (E2_CCLM-25) bis +46 kWh/m² (WETTREG2003). Dies entspricht aber einer Abweichung von weniger als 4%.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Auch für die ferne Zukunft zeigt der Median nur eine geringe Änderung von $+18,9 \text{ kWh/m}^2$ gegenüber dem Ist-Zustand, was einer mittleren Globalstrahlungssumme von 1143 kWh/m^2 entspricht. Die maximalen Abweichungen betragen nun -105 kWh/m^2 (E3_RCA) beziehungsweise $+120 \text{ kWh/m}^2$ (WETTREG2010). Die WETTREG-Modelle zeigen die stärkste Zunahme der Globalstrahlungssumme, die RCA-Modelle dagegen die stärkste Abnahme der Globalstrahlung in der fernen Zukunft.

Standardabweichung der Globalstrahlung

Ist-Zustand (1971-2000)

Die Diskussion der Standardabweichung der Globalstrahlung ist schwierig, da die Standardabweichung auch vom Mittelwert abhängt. Je höher der Mittelwert, desto höher ist auch die Standardabweichung bei ähnlicher Verteilung. Der eigentliche Einfluss, der mit der Standardabweichung quantifiziert werden soll, ist die jahreszeitliche Schwankung der Globalstrahlung.

Die Standardabweichung der Globalstrahlung für die Beobachtungsdaten liegt bei 80 W/m^2 und bildet damit auch etwa die untere Grenze hinsichtlich dieser Kennzahl. Die obere Grenze bilden mitunter die CCLM-Simulationen.

Zwar sind die Absolutwerte der CCLM-Simulationen auch höher als die der Beobachtungswerte, allerdings gibt es einige Klimaprojektionen, die noch höhere Jahressummen aufweisen. Daraus kann gefolgert werden, dass die jährlichen Schwankungen der Globalstrahlung bei den CCLM-Simulationen wohl am stärksten ausfallen. Grund könnte die Bias-Korrektur sein, da die ursprünglichen CCLM-Globalstrahlungswerte meist ähnlich der Temperatur zu niedrig waren und durch die Korrektur hochskaliert werden, was dann auch die Standardabweichung beeinflusst.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der Standardabweichung der Globalstrahlung nimmt für die nahe Zukunft um $+1,7 \text{ W/m}^2$ gegenüber dem Ist-Zustand auf $93,3 \text{ W/m}^2$ zu. Die Änderungen der Standardabweichung der Einzelmodelle liegen zwischen $-1,4 \text{ W/m}^2$ (E2_CCLM-25) und $+4,1 \text{ W/m}^2$ (WETTREG2010).

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie für die nahe Zukunft. Der Median der Standardabweichung nimmt um $+3,7 \text{ W/m}^2$ auf $92,2 \text{ W/m}^2$ zu. Der Wertebereich liegt zwischen einer Änderung der Standardabweichung von $-0,8 \text{ W/m}^2$ (B_RCA) und $+8,5 \text{ W/m}^2$ (WETTREG2010). Insgesamt zeigt sich eine Zunahme der Standardabweichung je Klimaprojektion von der nahen zur fernen Zukunft.

Minimale mittlere Globalstrahlung

Ist-Zustand (1971-2000)

Die minimale mittlere Globalstrahlung kann nicht interpretiert werden, da die Werte der Klimaprojektionen bis auf 0 W/m^2 zurückgehen, die Beobachtungsdaten und die WETTREG-Daten aber durch die Umrechnung mit der Angström-Formel bei etwa 20 W/m^2 liegen. Daher wird auch nicht auf die Veränderungen zur nahen und fernen Zukunft weiter eingegangen.

Maximale mittlere Globalstrahlung

Ist-Zustand (1971-2000)

Die maximale mittlere Globalstrahlung bei den Beobachtungsdaten liegt bei etwa 315 W/m^2 . Alle Globalstrahlungswerte der Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles übersteigen diesen Wert. Insbesondere die CCLM-Simulationen erreichen bis zu 500 W/m^2 . Die anderen Klimaprojektionen weisen höchstens um $+50 \text{ W/m}^2$ höhere Maximalwerte als die Beobachtungsdaten auf.

Auch hier scheint die Bias-Korrektur der CCLM-Daten Auswirkungen zu zeigen. Die ursprüngliche Unterschätzung der Globalstrahlung in den CCLM-Daten wird bei der linearen Skalierung über Faktoren korrigiert, wodurch auch die Maximalwerte hochskaliert werden. Da der Korrekturfaktor multiplikativ und nicht additiv angewendet wird, ist eine deutliche Erhöhung der ursprünglichen Maxima plausibel.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der maximalen mittleren Globalstrahlung liegt bei $343,5 \text{ W/m}^2$ für die nahe Zukunft und ist damit quasi unverändert zum Ist-Zustand. Auch die Abweichungen der einzelnen Klimaprojektionen bewegen sich in einem Bereich von wenigen W/m^2 .

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft sind wiederum kaum Änderungen der maximalen mittleren Globalstrahlung im Vergleich zum Ist-Zustand vorhanden. Hier liegt der Median bei $340,2 \text{ W/m}^2$. Tendenziell werden für die ferne Zukunft etwas größere Zu- oder Abnahmen der maximalen mittleren Globalstrahlung je Klimaprojektion gegenüber der nahen Zukunft simuliert.

5.2.4 Kennzahlen der Windgeschwindigkeit

Die folgenden Auswertungen zu den Kennzahlen des Niederschlags beziehen sich auf die Anlagen C-04, D-04, E-04, F-04, G-04 und H-04 sowie die Tabelle in der Anlage J-06.

Die Windgeschwindigkeit ist eine räumlich und zeitlich sehr variable Größe. Die Regionalisierung dieser Klimagröße ist schwierig. Für die Beobachtungsdaten und die WETTREG-Daten liegen Stationswerte vor, die räumlich interpoliert werden müssen. Es wird hierfür analog zu den anderen Klimagrößen das External-Drift-Kriging verwendet mit der Geländehöhe als „Driftvariable“. Dabei wird darauf Wert gelegt, dass Stationsmessungen wie beispielsweise von der hochgelegenen Station Feldberg mit tendenziell hohen Geschwindigkeiten bei der Interpolation auf das $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Raster nicht überbewertet werden. Außerdem kommt hinzu, dass die Messdaten zunächst in Beaufort vorliegen und erst in die Windgeschwindigkeit in $[\text{m/s}]$ umgerechnet werden müssen. Diese Umrechnung ist zusätzlich mit Unsicherheiten verbunden.

Mittlere Windgeschwindigkeit

Ist-Zustand (1971-2000)

Die mittlere Windgeschwindigkeit in Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten liegt im Ist-Zustand bei etwa 2 m/s . Die Klimaprojektionen überschätzen den mittleren Beobachtungswert und erreichen bis zu $4,6 \text{ m/s}$ (E3_REGCM3). Die Differenzen zu den Beobachtungsdaten liegen mit wenigen Ausnahmen bei $+1,0$ bis $+1,5 \text{ m/s}$. Die CCLM-Modelle überschätzen die Beobachtungsdaten um $+1,5 \text{ m/s}$.

Zukunftsszenarien (2021-2050 und 2071-2100)

Die mittlere Windgeschwindigkeit bleibt im Mittel für alle Klimaprojektionen für die nahe und ferne Zukunft konstant. Die Abweichungen betragen maximal $0,1 \text{ m/s}$ bis $0,2 \text{ m/s}$. Die geringen Änderungen der einzelnen Klimaprojektionen sind uneinheitlich. Die Hadley-Modelle und die WETTREG-Modelle zeigen eine Verstärkung der Differenzen zur fernen Zukunft hin, während beispielsweise die REMO-Modelle eine Abschwächung der Zunahme der Windgeschwindigkeit für das Zukunftsszenario hin zur fernen Zukunft simulieren. Auf eine weitere Interpretation dieser geringen Differenzen wird verzichtet.

Standardabweichung der Windgeschwindigkeit

Ist-Zustand (1971-2000)

Bei der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit liegen alle Klimaprojektionen sehr nah bei den Beobachtungsdaten.

Einzige Ausnahme bildet wiederum die Klimaprojektion E3_REGCM3 mit einer Standardabweichung von $2,4 \text{ m/s}$. Die Differenzen der Klimaprojektionen zu den Beobachtungen hinsichtlich der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit liegen meist unter $0,3 \text{ m/s}$.

Zukunftsszenarien (2021-2050 und 2071-2100)

Die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit ändert sich in der nahen und fernen Zukunft ebenfalls kaum. Die Unterschiede betragen zwischen $-0,1 \text{ m/s}$ und $+0,1 \text{ m/s}$. Tendenziell zeigt sich eine Erhöhung der Standardabweichung der einzelnen Klimaprojektionen zum Zukunftsszenario hin. Diese ist allerdings im Mittelwert (Median) nicht ersichtlich.

Maximale mittlere Windgeschwindigkeit

Ist-Zustand (1971-2000)

Bei der maximalen mittleren Windgeschwindigkeit liegen die Beobachtungsdaten bei $8,7 \text{ m/s}$. Die geringste maximale Windgeschwindigkeit liefert die Klimaprojektion A_RM5.1 mit etwa $7,2 \text{ m/s}$ und die höchste maximale Windgeschwindigkeit mit knapp 13 m/s die Klimaprojektion E3_REGCM3. Die meisten Klimaprojektionen weichen bei der maximalen mittleren Windgeschwindigkeit weniger als 1 m/s von den Beobachtungsdaten ab.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der maximalen mittleren Windgeschwindigkeit erhöht sich in der nahen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand leicht um +0,1 m/s auf +9,0 m/s. Die meisten Klimaprojektionen zeigen eine geringfügige Erhöhung der maximalen Windgeschwindigkeit mit bis zu +0,9 m/s (WETTREG2003). Es gibt aber auch Klimaprojektionen, die eine Reduzierung der maximalen Windgeschwindigkeit um bis zu -0,4 m/s simulieren (H3Q3_RCA).

Ferne Zukunft (2071-2100)

Ähnliche Ergebnisse wie für die nahe Zukunft ergeben sich auch für die ferne Zukunft. Der Median zeigt eine Erhöhung der mittleren maximalen Windgeschwindigkeit um +0,2 m/s im Vergleich zum Ist-Zustand auf 8,9 m/s. Die maximalen Abweichungen liegen bei -0,3 m/s (H3Q3_RCA) und +0,8 m/s (WETTREG2010). Einige Klimaprojektionen zeigen eine Verstärkung der Differenzen zur fernen Zukunft hin, andere Klimaprojektionen eher eine Abschwächung.

Anzahl der Tage > 8 m/s Windgeschwindigkeit

Ist-Zustand (1971-2000)

Starkwindtage treten im Mittel in Baden-Württemberg laut Beobachtungsdaten an etwa 1,7 Tagen im Jahr auf. Regional ist dieser Wert aber sicherlich höher. Bei den RCA-Modellen und der Klimaprojektion A_RM5.1 wird der Schwellenwert von 8 m/s sogar nur an etwa einem Tag überschritten. Als deutlicher Ausreißer kann hier die Klimaprojektion E3_REGCM3 mit über 35 Tagen im Jahr mit Windgeschwindigkeiten über 8 m/s bezeichnet werden. Die Differenzen der meisten Klimaprojektionen liegen bei bis zu 4 Tagen. Im Mittel geben die Klimaprojektionen mit 2,9 Tagen also eine höhere Anzahl von Starkwindtagen an.

Nahe Zukunft (2021-2050)

Der Median der Anzahl der Tage mit Starkwind nimmt im Zukunftsszenario um +0,5 Tage gegenüber dem Ist-Zustand auf 3,5 Tage zu.

Bis auf wenige Ausnahmen zeigt sich für alle Klimaprojektionen eine Zunahme der Anzahl von Starkwindtagen. Die maximalen Differenzen betragen -0,9 Tage (C_CCLM-25) und +2,1 Tage (E2_CLM).

Ferne Zukunft (2071-2100)

Auch für die ferne Zukunft zeigt der Median eine Zunahme der Starkwindtage um +0,4 Tage gegenüber dem Ist-Zustand auf 2,7 Tage. Es ergeben sich jedoch auch Abnahmen um bis zu -3,1 Tage (E3_REGCM3), wobei dies einer Abnahme von lediglich -10% entspricht, da die absolute Anzahl von Tagen bei dieser Klimaprojektion sehr hoch war. Bei der Anzahl der Starkwindtage zeigt sich wiederum keine klare Tendenz einer Verstärkung oder Abschwächung von Differenzen von der nahen zur fernen Zukunft hin.

5.2.5 Analyse des Niederschlags anhand eines reduzierten Auswerte-Ensembles

Die ausgewählten Klimaprojektionen des reduzierten Auswerte-Ensembles zeigen hinsichtlich der Niederschlagsverteilung in Baden-Württemberg Ergebnisse, die eine Weiterverwendung der Werte dieser Klimaprojektionen für Wasserhaushaltssimulationen geeignet erscheinen lassen.

In der Auswahl des reduzierten Auswerte-Ensembles für den Niederschlag (vgl. Tab. 4-1, Bild 4-1) wurden die Klimaprojektionen nicht berücksichtigt, die stärker von den Beobachtungsdaten abweichen. Entsprechend ist zu erwarten, dass die Analysen des reduzierten Auswerte-Ensembles der 14 Klimaprojektionen bzw. 18 Klimaprojektionen (14 Klimaprojektionen mit 25x25 km² und 4 Klimaprojektionen mit 7x7 km²) im Vergleich mit dem vollständigen Auswerte-Ensemble der 20 Klimaprojektionen (bzw. 24 Klimaprojektionen) gewisse Unterschiede zumindest hinsichtlich der Extremwerte aufzeigen.

Bild 5-3 gibt einen Überblick über die Simulationsergebnisse des reduzierten Auswerte-Ensembles auf Basis der 18 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft bzw. der 8 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft.

Ist-Zustand (1971-2000)

Im hydrologischen Winterhalbjahr reduziert sich die maximale Abweichung von den Beobachtungswerten von etwa +55% beim vollständigen Auswerte-Ensemble auf etwa +41% beim reduzierten Auswerte-Ensemble. Auch beim Median zeigt sich eine deutliche Änderung. Der Median der mittlere Niederschlagssumme nimmt durch die

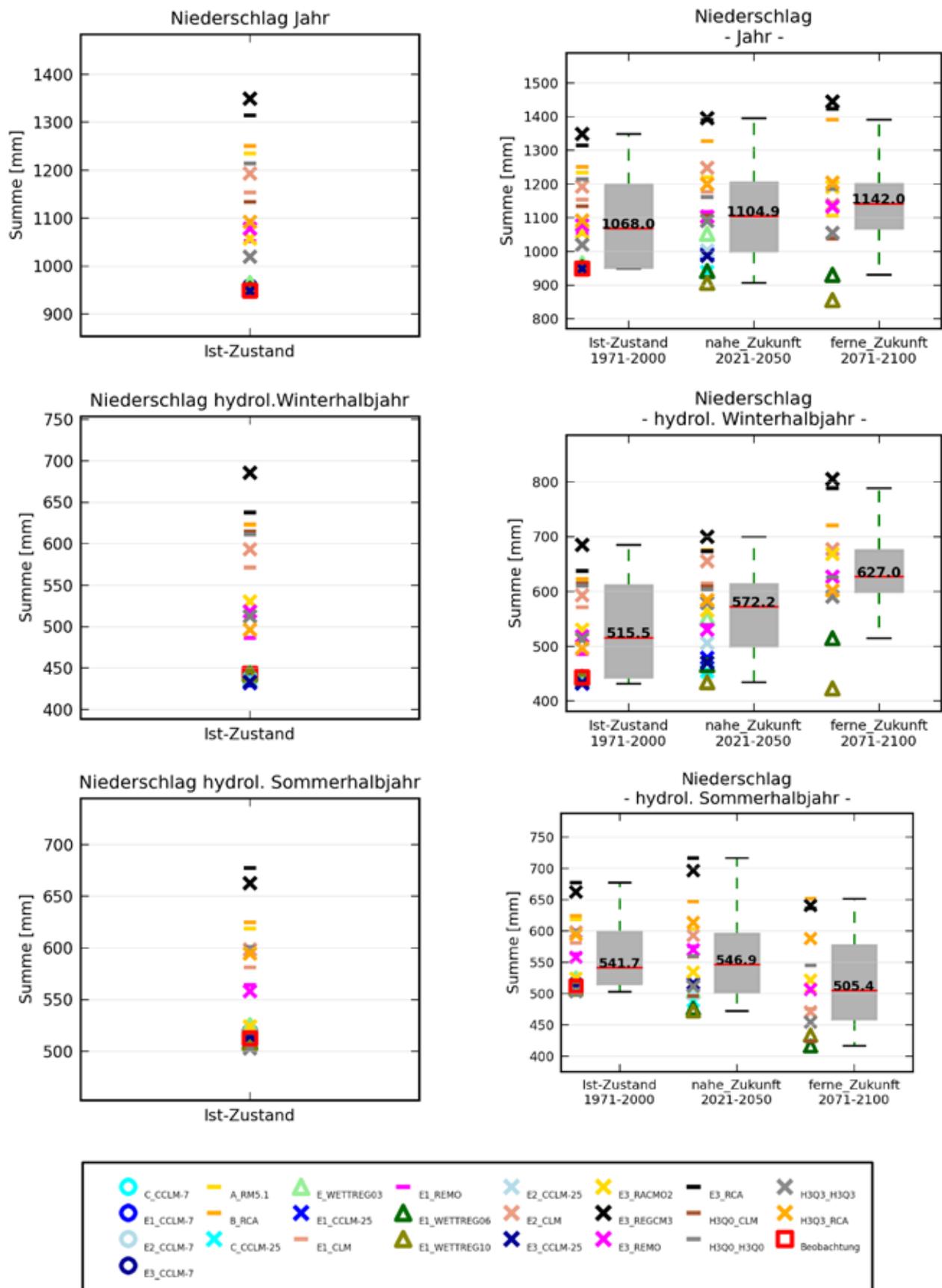


Bild 5-3: Kennzahlen „Niederschlag Jahr“, „Niederschlag hydrologisches Winterhalbjahr“ und „Niederschlag hydrologisches Sommerhalbjahr“ als Flächenmittel über Baden-Württemberg für die Klimaprojektionen des reduzierten Auswerte-Ensembles im Ist-Zustand (1971-2000) und in den Zukunftsszenarien (2021-2050 und 2071-2100)

Reduzierung der Anzahl der Klimaprojektionen von 491 mm auf 443 mm ab. Die Abweichung des Medians von den Beobachtungsdaten sinkt von +10,8% auf -0,1% beim reduzierten Auswerte-Ensemble.

Im hydrologischen Sommerhalbjahr ändern sich sowohl Extremwerte als auch der Median beim reduzierten Auswerte-Ensemble. Das Minimum des Niederschlags aus den Klimaprojektionen steigt von 503 mm auf 507 mm, während das Maximum von 677 mm auf 619 mm und der Median von 522 auf 519 mm beim reduzierten Auswerte-Ensemble abnimmt. Gerade beim Maximum reduziert sich so die maximale Differenz zu den Beobachtungsdaten von etwa +32% auf +21% beim reduzierten Auswerte-Ensemble im Mittel für Baden-Württemberg.

Für den Niederschlag des Gesamtjahrs zeigen sich folglich ähnliche Ergebnisse. Das Maximum der Jahresniederschlagssumme aller untersuchten Klimaprojektionen reduziert sich von 1349 mm auf 1234 mm und auch der Median nimmt von 1036 mm auf 958 mm ab. Die Differenzen zu den Beobachtungsdaten sind beim Maximum ähnlich wie im Winterhalbjahr (+42% bzw. +30%).

Nahe Zukunft (2021-2050)

Im Mittel zeigt sich in der nahen Zukunft im hydrologischen Winterhalbjahr eine Zunahme der Niederschlagssumme. Für das Winterhalbjahr der nahen Zukunft gibt es keinerlei Veränderungen der Extrema oder des Medians der Niederschläge hinsichtlich des Klimasignals durch die reduzierte Auswahl der Modelle. Die absoluten Werte von Maximum und Median ändern sich dagegen (700 mm auf 656 mm bzw. 545 mm auf 509 mm).

Im Sommerhalbjahr bleibt der Median durch die Reduzierung der Anzahl der Klimaprojektionen annähernd unverändert (519 mm zu 514 mm). Beim Maximum verringert sich das absolute Maximum der Niederschlagssumme von 717 mm auf 603 mm. Das mittlere Klimasignal für Median und Maximum ändert sich ebenfalls. Die Abweichung des Medians steigt beim reduzierten Auswerte-Ensemble von -0,7% auf -2,8%. Die Abweichung des Maximums reduziert sich dagegen von +5,8% auf +2,2%.

Für das Gesamtjahr nimmt in der nahen Zukunft der Median aller Klimaprojektionen von 1096 mm auf 1008 mm ab. Auch das Maximum aller Klimaprojektionen nimmt von 1395 mm auf 1247 mm ab. Bezüglich des Klimasignals sind jedoch nur geringe Änderungen durch die Reduzierung der Anzahl der Klimaprojektionen vorhanden. Beim Maximum wird die Abnahme von +9,8% leicht auf +9,2% verringert.

Ferne Zukunft (2071-2100)

Für die ferne Zukunft stehen nur noch 14 Klimaprojektionen beim vollständigen Auswerte-Ensemble bzw. 8 Klimaprojektionen beim reduzierten Auswerte-Ensemble zur Verfügung, da für den Niederschlag die Daten aus den acht CCLM-Modellen, dem WETTREG2003-Modell und dem E1_REMO-Modell für diesen Zeitbereich nicht vorliegen. Durch die verringerte Anzahl der Klimaprojektionen ist zu erwarten, dass das Ausklammern einzelner Klimaprojektionen einen größeren Einfluss auf das mittlere Verhalten aller Klimaprojektionen nehmen kann.

Für das Winterhalbjahr der fernen Zukunft gibt es keinerlei Veränderungen der Extrema durch die reduzierte Auswahl der Klimaprojektionen. Der Median ändert sich von 627 mm auf 614 mm.

Auch das mittlere Klimasignal reduziert sich hinsichtlich der Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr von +15,9% auf +15,2% für das reduzierte Auswerte-Ensemble. Zudem ändert sich das Maximum der Winter-niederschlagssumme von 805 mm auf 677 mm. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf das Klimasignals des Maximums der Winterniederschlagssumme.

Im hydrologischen Sommerhalbjahr ändern sich durch die Reduzierung der Klimaprojektionen das Maximum, welches von 652 mm auf 521 mm zurückgeht, und der Median (505 mm auf 473 mm). Für das Klimasignal ändert sich ebenfalls der Median von -9,4% auf -18,1% und das Maximum (+4,3% auf -0,6%).

Für das Gesamtjahr ändern sich die maximalen Summen aller Klimaprojektionen für Median und Maximum (1142 mm auf 1120 mm und 1445 mm auf 1191 mm). Auch hier ändert sich das Klimasignal nur für den Median (+1,3% auf -3,4%).

Als Fazit ergeben sich aus der Analyse des reduzierten Auswerte-Ensembles folgende Erkenntnisse:

- Beim Niederschlag zeigt sich tendenziell eine Überschätzung der Niederschlagssumme aus den Beobachtungsdaten durch die Klimaprojektionen des vollständigen Auswerte-Ensembles. Entsprechend werden gerade diejenigen Klimaprojektionen bei der Reduktion der Anzahl der Klimaprojektionen ausgeklammert, die größere Abweichungen der Niederschlagssumme aufweisen.
- Daher ergeben sich bei der Analyse des reduzierten Auswerte-Ensembles insbesondere Unterschiede zum vollständigen Auswerte-Ensemble bei der Betrachtung der auftretenden maximalen Niederschlagssummen. Bei der Differenz zu den Beobachtungsdaten verringert die Reduktion der betrachteten Klimaprojektionen vor allem im Maximum die Unterschiede, aber auch im Median (insbesondere im Winterhalbjahr). Mit dem reduzierten Auswerte-Ensemble werden die Beobachtungsdaten des Niederschlags besser wiedergegeben als mit dem vollständigen Auswerte-Ensemble.
- Bei der Analyse der Zukunftsszenarios ist in erster Linie das Klimasignal entscheidend, also der Unterschied des Zukunftsszenarios zum Ist-Zustand der jeweiligen Klimaprojektion. Bei der nahen Zukunft zeigen sich für den Niederschlag im Winterhalbjahr keine Auswirkungen durch die Reduktion der Klimaprojektionen. Im Sommerhalbjahr und im Gesamtjahr wird die Reduktion der betrachteten Klimaprojektionen in der maximalen Änderung des Klimasignals für den Niederschlag aller Klimaprojektionen und geringfügig auch beim Median deutlich.
Bei der fernen Zukunft wird der Umfang des reduzierten Auswerte-Ensembles um weitere zehn Klimaprojektionen verringert, da die Niederschlagsdaten der acht CCLM-Modelle, des E1_REMO-Modells und des WETTREG2003-Modells nicht für die ferne Zukunft vorliegen. Dadurch ist eine stärkere Reaktion des Medians auf die Hinzunahme oder Weglassen verschiedener Klimaprojektionen zu beobachten.
Den Ergebnissen zufolge beeinflusst der Unterschied in der Anzahl und den Mitgliedern des reduzierten Auswerte-Ensembles im Vergleich zum vollständigen

Auswerte-Ensemble auch das mittlere Klimasignal. Im Sommerhalbjahr der fernen Zukunft wird dies besonders deutlich (-9,4 % auf -18,1 %). Bei der Spannweite der simulierten Klimasignale ergeben sich dagegen kaum Änderungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass es vor einer Verwendung einzelner Modellprojekten für eine weitergehende Analyse des Klimawandels und seiner Folgen für einzelne Handlungsfelder (wie z.B. Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Gesundheit etc.) einer sorgfältigen Betrachtung und Bewertung möglichst vieler Klimaprojektionen und ihrer Ergebnisse bedarf.

Eine Verringerung der Anzahl verwendeter Klimaprojektionen kann dann sinnvoll sein, wenn aus praktischen Gründen der Aufwand beschränkt werden muss, weil beispielsweise räumlich oder zeitlich höhere Auflösungen erforderlich sind oder aufwändige Simulationsrechnungen mit Wirkmodellen nachgeschaltet werden. In diesen Fällen sollten gleichwohl die Ergebnisse immer auch in Bezug gesetzt werden zu den Spannbreiten größerer Ensembles.

Im KLIWA-Projekt wurde so zunächst durch die Analyse der Eignung der Klimaprojektionen ein für wasserwirtschaftliche Untersuchungen reduziertes und qualifiziertes Ensemble festgelegt. Dieses qualifizierte Ensemble wird für weitergehende Anwendung mit Wasserhaushaltsmodellen verwendet (Hennegriff & Kolokotronis 2007, Gerlinger & Meuser 2013). Die Auswahl und die Einordnung der Klimaprojektionen des qualifizierten Ensembles werden durch die Bereitstellung der Analysen der Klimaprojektionen des hier vorgestellten Auswert-Ensembles erleichtert.

Dabei ist für die Auswahl geeigneter Klimaprojektionen für wasserwirtschaftliche Fragen eine hohe räumliche Auflösung der Klimaprojektionen besonders wichtig. Dieser Einfluss wird im folgenden Kapitel erläutert.

5.3 Auswirkungen unterschiedlicher räumlicher Auflösung der Klimaprojektionen

Die CCLM-Modelle liegen in zwei unterschiedlichen Auflösungen vor, zum einen in der Originalauflösung von etwa $7 \times 7 \text{ km}^2$ und zum anderen im $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Gitter für die Vergleichbarkeit mit den anderen Klimaprojektionen. Von den untersuchten Klimaprojektionen weisen nur die CCLM-Modelle diese hohe räumliche Auflösung von $7 \times 7 \text{ km}^2$ auf.

Hinsichtlich der flächenhaften Auswertungen sind Unterschiede durch die verschiedenen Auflösungen zu erwarten, wenn die räumliche Auflösung gröber als die kleinräumige Änderung der Klimagröße ist. Dies ist für beide Auflösungen und alle Klimagrößen weitestgehend gegeben. Dadurch steigt mit zunehmender Auflösung auch die Detailtreue der Wiedergabe der flächenhaften Verteilung der Klimaparameter. Je homogener eine Klimagröße räumlich verteilt ist, desto kleiner werden die Unterschiede verschiedener Auflösungen sein.

Beim Niederschlag zeigt sich in Bild 5-4 deutlich, dass bei der feineren $7 \times 7 \text{ km}^2$ -Auflösung die Bereiche des Schwarzwalds deutlich detailreicher dargestellt werden. Die Minima und Maxima werden gleichzeitig verstärkt, da geringere räumliche Mittelungen auftreten als bei der $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Auflösung. Für kleinräumige Fragestellungen ist demnach ein deutlicher Informationsgewinn durch die

feinere Auflösung zu erwarten, was auch in den flächenhaften Abbildungen deutlich wird.

Bild 5-4 zeigt somit eindrücklich die Unterschiede, die sich durch unterschiedliche räumliche Auflösungen flächenhaft ergeben können. Die Jahressumme des Niederschlags basiert auf der gleichen Klimaprojektion mit dem einzigen Unterschied, dass beim rechten Bild die zu Grunde liegenden Daten zuerst vom Original $7 \times 7 \text{ km}^2$ -Gitter auf das $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Gitter projiziert wurden. Die räumlichen Muster des linken Bilds ($7 \times 7 \text{ km}^2$ -Raster) sind viel schärfer; es lassen sich einzelnen Strukturen erkennen. Die Maxima und Minima treten im linken Bild deutlich stärker hervor. Für eine kleinräumigere Betrachtung von Kennzahlen ist also eine höhere Auflösung als $25 \times 25 \text{ km}^2$ zu empfehlen.

Werden die Kennzahlen als Mittel für ganz Baden-Württemberg betrachtet, so sind prinzipiell keine Unterschiede der Ergebnisse bei verschiedener Auflösung zu erwarten.

Aufgrund der Interpolation der $7 \times 7 \text{ km}^2$ -CCLM-Daten auf das $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Gitter können allerdings geringfügige Unterschiede der Ergebnisse auftreten. Diese Unterschiede können zudem durch Randeffekte bei der Berechnung des Flächenmittels für Baden-Württemberg verstärkt werden. Sind die absoluten Werte der Kennzahlen sehr gering und werden die Differenzen in Prozent angegeben,

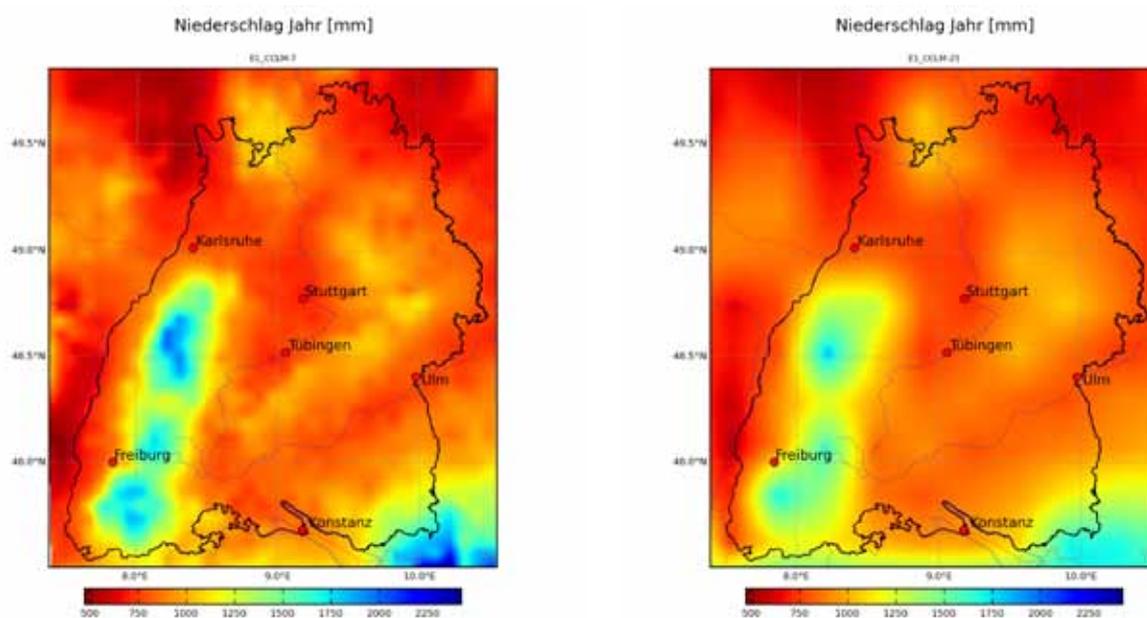


Bild 5-4: Niederschlags-Jahressumme des Ist-Zustands (1971-2000) der E1_CCLM-Klimaprojektion auf Grundlage der $7 \times 7 \text{ km}^2$ -Auflösung (links) und auf Grundlage der $25 \times 25 \text{ km}^2$ -Auflösung (rechts)

so sind Unterschiede von einigen Prozent bei verschiedener Auflösung durchaus möglich.

Dies zeigt sich beispielsweise bei der Abweichung der Höhe des Starkniederschlags der Modellprojektion C_CCLM von den Messdaten zwischen der 25x25 km²-Auflösung (-7,3 %) und der 7x7 km²-Auflösung (-5,5 %) (Anlage D-02).

Bei sehr geringen absoluten Werten der Kennzahlen kann zudem zumindest theoretisch der Effekt auftreten, dass ein Schwellenwert durch die gröbere Auflösung nicht oder kaum erreicht wird. Bei einer feineren Auflösung werden in der Regel die Extremwerte verstärkt, wodurch ein Überschreiten des Schwellenwerts wahrscheinlicher ist. Dieser Effekt sollte jedoch durch die räumliche Mittelung untergeordnet sein.

Insgesamt ist bei der Betrachtung der Kennzahlen als Flächenmittel über Baden-Württemberg kaum ein Informationsgewinn mit einer feineren räumlichen Auflösung verbunden. Für die Ableitung der zukünftigen Entwicklung von Klimagrößen in Baden-Württemberg werden für die Eliminierung von Ausreißerwerten Perzentile verwendet, um einen Korridor möglicher zukünftiger Entwicklungen zuzulassen. Eine Berücksichtigung der CCLM-Klimaprojektionen in beiden Auflösungen bei der Auswertung der Perzentile würde diese Klimaprojektionen gegenüber den anderen Klimaprojektionen stärker gewichten.

Dementsprechend werden für die Ableitung der klimatischen Leitplanken in Kapitel 6 sowie bei den Perzentildarstellungen in Anlage I alle Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles nur in der Auflösung von 25x25 km² betrachtet.

5.4 Einschätzung der Modellunsicherheiten des Auswerte-Ensembles

Die Einschätzung der Modellunsicherheiten ist ein wichtiger Bestandteil der Interpretation von Modellergebnissen. Eine Ensembleauswertung ermöglicht diese Einschätzung. Durch die Vielzahl von Ergebnissen der unterschiedlichen Klimaprojektionen wird eine gewisse Bandbreite aufgezeigt. Bei hohen Ergebnisschwankungen kann darauf geschlossen werden, dass der Ergebniswert nicht sehr ver-

lässlich bzw. die mögliche Variationsbreite sehr hoch ist. Zudem werden auch Anhaltspunkte über die Stärken und Schwächen bestimmter Klimaprojektionen gegeben.

Für die Einschätzung der Modellunsicherheit bietet sich der Ist-Zustand an, da für diesen Zeitabschnitt Beobachtungsdaten vorliegen, die als Vergleichswert herangezogen werden können.

Eine erste Einschätzung der Modellunsicherheiten erfolgte bereits im Kapitel 5.1. Die Auswahl der Mitglieder des Auswerte-Ensembles für die Analyse fand auf der Basis des Vergleichs von Modelldaten und Beobachtungsdaten im Ist-Zustand statt. Die Klimaprojektionen, die zum Auswerte-Ensemble zählen, wurden bezüglich der Modellunsicherheit als plausibel bewertet.

Eine weitere Einschätzung der Modellunsicherheit zeigte sich in Kapitel 5.2.5. Hier wurde speziell für den Niederschlag überprüft, wie sich Median und Extremwerte von mittleren Niederschlagssummen durch eine Reduzierung der Anzahl der Klimaprojektionen ändern können.

Im Folgenden wird nun versucht, aus den Ergebnissen des Kapitels 5.2.1 bis 5.2.4 eine Abschätzung der Unsicherheiten der einzelnen Modellelemente der Modellkette, also der Globalmodelle und der Regionalmodelle, bezogen auf ausgewählte Klimagrößen zu geben.

Als charakteristisch für die verschiedenen Klimagrößen werden folgende Kennzahlen ausgewählt und näher betrachtet: Jahresmitteltemperatur (Temperaturmittel), Frosttag (Temperaturminimum), Sommertag (Temperaturmaximum), Niederschlag im hydrologischen Winterhalbjahr (Niederschlag), Niederschlag im hydrologischen Sommerhalbjahr (Niederschlag). Danach schließt sich eine Einschätzung der Unsicherheiten dieser Kennzahlen anhand der Streuung der Ergebnisse der Klimaprojektionen an.

Globalmodelle

Zuerst wird der Einfluss des Globalmodells auf die Ergebnisse der Klimaprojektion untersucht. Als Globalmodell wird vor allem das ECHAM-Modell der Version 5 (mit Ausnahme von WETTREG2003 (ECHAM-Version 4)) verwendet. Zudem kommen das Hadley-Center-Modell in verschiedenen Versionen sowie die Modelle ARPEGE und BCM zum Einsatz. Für die beiden letztgenannten Globalmodelle liegt jedoch nur eine Globalmodell-Regionalmodell-Variante vor, wodurch ein Rückschluss dieser Ergebnisse auf eine etwaige systematische Beeinflussung der Ergebnisse der Klimaprojektion durch den starken Einfluss des Globalmodells nicht möglich ist. Daher können nur die ECHAM- und Hadley-Modelle miteinander verglichen werden.

Temperatur

- Für den Parameter Temperatur zeigen die Regionalmodelle auf Basis der Hadley-Globalmodelle tendenziell mehr Frosttage als die ECHAM-basierten Regionalmodelle. Auch bei den Sommertagen ist im Mittel die Anzahl der Sommertage auf Basis der Hadley-Modelle größer. Beim Temperaturmittelwert kann keine klare Tendenz abgeleitet werden. Daraus kann gefolgert werden, dass die Temperaturen bei den Hadley-Globalmodellen etwas größere Schwankungen aufweisen als beim ECHAM-Modell bezogen auf die Fläche Baden-Württembergs.

Niederschlag

- Für den Niederschlag lässt sich keine allgemeine Aussage treffen. Beide Globalmodelle überschätzen tendenziell die Niederschlagssummen in beiden Halbjahren. Die Überschätzungen fallen für beide Halbjahre ähnlich aus.

Regionalmodelle

Als nächster Schritt wird untersucht, in wie weit ein systematischer Einfluss des verwendeten Regionalmodells auf die ermittelten Werte der Kennzahlen aus der Temperatur und dem Niederschlag zu erkennen ist. Dazu werden die Daten der Klimaprojektionen hinsichtlich feststellbarer Tendenzen hinsichtlich des verwendeten Regionalmodells analysiert.

Temperatur

- Die CLM-Modelle unterschätzen tendenziell die mittlere Temperatur der Beobachtungsdaten, gleichzeitig wird die Anzahl der Frosttage unterschätzt und die Anzahl an Sommertagen überschätzt, was eigentlich eher für eine höhere Jahresmitteltemperatur sprechen würde.
- Die CCLM-Modelle sind bias-korrigiert und zeigen deshalb im Mittel bei der Temperatur kaum Unterschiede zu den Beobachtungsdaten. Sowohl bei den Frosttagen als auch bei den Sommertagen unterschätzt das CCLM-Modell die Beobachtungsdaten. Dies deutet auf eine tendenziell zu geringe Schwankung der Tages- oder jahreszeitlichen Temperaturen hin.
- Die WETTREG-Daten stimmen erwartungsgemäß im Ist-Zustand sehr gut mit den Beobachtungsdaten überein. Im Vergleich zu den anderen Modellen zeigen die WETTREG-Daten im Zukunftsszenario eine sehr starke Abnahme an Frosttagen und eine starke Zunahme an Sommertagen. Das Klimasignal der WETTREG-Daten bezogen auf die Temperaturextrema scheint demnach recht hoch zu sein.
- Für die RCA-Modelle zeigt sich für das Temperaturmittel ein uneinheitliches Erscheinungsbild mit Über- und Unterschätzungen der Temperatur der Beobachtungsdaten.
- Für die Extremwerte dagegen wird eine Unterschätzung der jeweiligen Tagesanzahl im Vergleich zu den Beobachtungsdaten deutlich. Dies spricht ähnlich den CCLM-Daten für eine tendenziell zu geringe Schwankung der Tages- oder jahreszeitlichen Temperaturen.
- Die REMO-Temperaturen sind im Vergleich zu den Beobachtungsdaten generell recht hoch. Die Anzahl an Frosttagen wird im Vergleich zu den Beobachtungsdaten deutlich unterschätzt. Bei der Anzahl der Sommertage dagegen stimmen Beobachtungsdaten und REMO-Modelle recht gut überein. Insgesamt scheint das Temperaturniveau bei den REMO-Modellen etwas zu hoch und die tages- oder jahreszeitliche Schwankung etwas zu gering zu sein.
- Das Verhalten der Hadley-Regionalmodelle stimmt mit dem der Globalmodelle überein. Es treten im Mittel bei einer leicht höheren Tagesmitteltemperatur größere Temperaturschwankungen im Tages- oder Jahresverlauf auf wie bei den Beobachtungsdaten. Basis

für diese Hypothese sind wiederum mehr Frost- und mehr Sommertage bei den Hadley-Modellen als bei den Beobachtungsdaten.

- Ähnlich verhält es sich mit dem RM5.1-Modell, auch hier sprechen die höhere Anzahl von Frost- und Sommertagen für höhere Temperaturschwankungen.
- Die geringere Anzahl von Frost- und Sommertagen beim Modell RACMO2 deutet auf geringere Temperaturschwankungen hin als bei den Beobachtungsdaten bei gleichzeitig leicht erhöhter Jahresmitteltemperatur.
- Für die Klimaprojektion REGCM3 deuten die kleineren Anzahlen von Frost- und Sommertagen ebenfalls auf geringere Tages- bzw. Jahresschwankungen der Temperatur im Vergleich zu den Beobachtungsdaten hin. Dabei wird die Jahresmitteltemperatur der Beobachtungsdaten unterschätzt.

Niederschlag

- Die CLM-Modelle überschätzen den gemessenen Niederschlag in beiden Halbjahren um jeweils etwa 20%. Damit liegt die Gesamtniederschlagsmenge bei den CLM-Modellen zu hoch. Zudem weisen die CLM-Modelle im Zukunftsszenario ein sehr starkes Klimasignal bezogen auf die Niederschlagssummen auf.
- Für die CCLM-Modelle kann keine Aussage getroffen werden, da diese bias-korrigiert sind und damit gut mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen.
- Die WETTREG-Daten des Ist-Zustands stimmen mit den Beobachtungsdaten erwartungsgemäß sehr gut überein. Die WETTREG-Daten besitzen im Zukunftsszenario vor allem im Sommerhalbjahr ein starkes Klimasignal (Niederschlagsabnahme im Sommerhalbjahr).
- Die RCA-Modelle zeigen für beide Halbjahre mit die höchsten Überschätzungen der gemessenen Halbjahresniederschläge. Insgesamt wird bei diesen Modellen zu viel Niederschlag simuliert.
- Die REMO-Modelle zeigen eine gute Übereinstimmung der Halbjahresniederschläge mit den Beobachtungsdaten. Es wird eine geringfügige Überschätzung von etwa 10% sichtbar.
- Die Hadley-Regionalmodelle zeigen eine leichte Überschätzung der Niederschlagssummen je Halbjahr. Im Winterhalbjahr kann diese Überschätzung deutlich ausfallen.

- Das RM5.1 zeigt im Sommerhalbjahr eine leichte und im Winterhalbjahr eine starke Überschätzung der Niederschlagssummen auf Basis der Beobachtungsdaten.
- Ähnlich den REMO-Modellen tritt beim RACMO2-Modell in beiden Halbjahren nur eine geringfügige Überschätzung des Niederschlags der Beobachtungsdaten von etwa 10% auf.
- Das REGCM3-Modell überschätzt von allen Modellen den gemessenen Niederschlag am stärksten. In beiden Halbjahren wird die gemessene Niederschlagssumme um über 40% überschritten.

Kennzahlen

Anhand der Streuung der Ergebnisse der Klimaprojektionen wird hier die Unsicherheit summarisch für die vier untersuchten Klimaparameter und den daraus abgeleiteten Kennzahlen abgeschätzt. Eine detailliertere Einschätzung der Zuverlässigkeit für jede Kennzahl erfolgt in Kapitel 6:

Temperatur

- Sowohl die mittlere Jahrestemperatur, die Kühlgradtage, der Sommertag und der Eistag besitzen eine hohe Streuung der Modellergebnisse. Die Beobachtungsdaten werden in ähnlicher Stärke von den Klimaprojektionen unter- wie überschätzt. Außerdem treten bei manchen Klimaprojektionen Ausreißer auf, also Modellergebnisse, die deutlich von den anderen Modellergebnissen abweichen.
- Der Heiztag und der Vegetationsbeginn können als recht robuste Kennzahlen deklariert werden. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen liegen in einem engen Bereich und stimmen gut mit den Beobachtungsdaten überein.
- Die Tropennacht und der Tropentag sind dadurch gekennzeichnet, dass die Tagesanzahl sehr klein ist, jedoch von den meisten Klimaprojektionen ähnlich wiedergegeben wird. Bei leichter Über- oder Unterschätzung der Temperaturwerte können jedoch schnell Abweichungen von mehreren Tagen entstehen (Schwellenwertproblematik).
- Bei der Anzahl der Frosttage und beim Datum des letzten Frosts ergibt sich eine recht große Streuung der Modellergebnisse. Zudem unterschätzen die Klimaprojektionen tendenziell die Beobachtungswerte.

Niederschlag

- Bei den Kennzahlen der Niederschlagssummen dominiert die Überschätzung durch die Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles. Es handelt sich um folgende Kennzahlen: Niederschlagssumme im Jahr, Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr, Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr, Niederschlag im Frühjahr und Niederschlag in der Vegetationsperiode. Die Beobachtungsdaten liegen entsprechend bei der Werteverteilung im unteren Bereich.
- Bei der Starkniederschlagshöhe dagegen unterschätzen die Klimaprojektionen die Beobachtungsdaten weitgehend. Allerdings ist der Wertebereich recht eng.
- Für die Anzahl der Starkniederschlagstage gilt ähnliches wie für Tropennacht oder Tropentag. Die Anzahl ist sehr gering, wird jedoch sowohl von Beobachtungsdaten wie Modelldaten in ähnlicher Weise wiedergegeben. Es besteht jedoch wie beim Tropentag oder Tropennacht die Möglichkeit, dass bei geringfügiger Änderung des Niederschlagsverhaltens eine deutliche Änderung des Kennzahlwertes erfolgt.
- Die Kennzahlen der mittleren Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit, der maximalen Dauer von Trockenperioden und der Anzahl der Tage ohne Niederschlag beziehen sich auf Trockenperioden oder Trockentage. Es ist oft modelltypisch, ob häufig eine sehr geringe Niederschlagsmenge fällt oder längere Trockenphasen vorherrschen. Durch Anhebung des Schwellenwerts auf 1,0 mm/Tag zur Definition eines Trockentags wurde versucht, solchen charakteristischen Eigenschaften einzelner Klimaprojektionen entgegen zu wirken. Trotzdem ergibt sich eine recht weite Streuung der Modellergebnisse.

Globalstrahlung

- Die Analyse der Globalstrahlung zeigt je nach Klimaprojektion sehr unterschiedliche Ergebnisse. Für die Globalstrahlungssumme im Jahr werden die Werte der Beobachtungsdaten durch die Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles ähnlich stark unter- wie überschätzt. Die Streuung ist recht hoch.
- Sowohl die Standardabweichung der Globalstrahlung als auch das Maximum der Globalstrahlung auf Basis der Beobachtungsdaten wird von den Klimapro-

jektionen weitgehend überschätzt. Insbesondere die CCLM-Modelle fallen hier durch sehr hohe Werte auf. Hier kann ein Einfluss der Bias-Korrektur nicht ausgeschlossen werden.

- Die Werte für das Minimum der Globalstrahlung sind modelltechnisch bedingt bzw. hängen bei den Beobachtungs- und WETTREG-Daten von der Umrechnung der Sonnenscheindauer mit der Angström-Formel ab.

Windgeschwindigkeit

- Die Windgeschwindigkeit ist eine räumlich und zeitlich sehr variable Größe. Im Mittel überschätzen die Klimaprojektionen die gemessenen Windgeschwindigkeiten. Für die mittlere Windgeschwindigkeit und die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit zeigt sich die Überschätzung der Klimaprojektionen. Der Wertebereich der Klimaprojektionen ist jedoch recht eng.
- Für die maximale Windgeschwindigkeit zeigen sich einige Modellergebnisse, die als Ausreißer deklariert werden können. Die meisten Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles liegen aber in einem sehr engen Bereich.
- Die Anzahl der Tage mit einer Windgeschwindigkeit > 8 m/s ist sehr gering. Sowohl Klimaprojektionen als auch die Beobachtungsdaten liegen in einem ähnlichen Bereich. Es besteht jedoch wiederum die Möglichkeit, dass bei geringfügiger Änderung der Werte für die Windgeschwindigkeit eine deutliche Änderung der Werte der Kennzahlen erfolgt.

In Kapitel 6 werden die möglichen zukünftigen Entwicklungen der Kennzahlen abgeleitet, indem die Ergebnisse der verschiedenen Klimaprojektionen anhand der Perzentile betrachtet werden. Die so beschriebene Bandbreite kann ebenfalls zur Abschätzung der Modellunsicherheit des Auswerte-Ensembles verwendet werden. Daher erfolgt in Kapitel 6 auch eine zusammenfassende Bewertung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse für die einzelnen Kennzahlen.

Da in Kapitel 6 die Perzentile der Klimaprojektion betrachtet werden, die bisher noch nicht analysiert wurden, ist dieses Kapitel eine Ergänzung zu den bisher vorgestellten Untersuchungsergebnissen.

6 Zukunftsbezogene klimatische Leitplanken für die Entwicklung von Anpassungsstrategien

Definition „klimatische Leitplanken“

Im Folgenden werden die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Änderungen der klimatischen Kennzahlen in Baden-Württemberg erneut analysiert, um einen Korridor zu bestimmen, in dem die Klimaänderung in Baden-Württemberg voraussichtlich zu erwarten ist. Die Werte dieses Korridors werden als zukunftsbezogene klimatische Leitplanken verstanden, da die unteren und oberen Bereiche der Auswirkungen der Klimaänderung angegeben werden.

Durch die dargestellten Bandbreiten wird zum einen die Streuung der Ergebnisse bei den heutigen Klimaprojektionen ersichtlich. Zum anderen kann aber auch die Stärke und Richtungssicherheit der zu erwartenden Änderungen eingeschätzt werden. Die Stärke kennzeichnet Ausmaß und Höhe des Klimasignals. Richtungssicherheit besteht, wenn die Klimaprojektionen weitgehend die gleiche Richtung der Entwicklung des Klimasignals (zunehmend, abnehmend oder unverändert) zeigen.

Die Untersuchung stellt Daten sowohl hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung als auch der Qualität und der Menge in einer so bislang nicht verfügbaren Form aus Klimaprojektionen zur Verfügung, um eine erste Formulierung von zukunftsbezogenen klimatischen Leitplanken durchzuführen.

Trotz der Verwendung von einer großen Zahl von Klimamodellen in dieser Untersuchung können die wirklich eintretenden Werte in der Zukunft auch außerhalb dieser Leitplanken liegen. Diese Unsicherheit hängt zum einen mit der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung beispielsweise der Emissionen zusammen. Zum anderen können auch die aktuellen Klimamodelle nicht alle Elemente des Klimasystems bzw. des Wasserhaushalts berücksichtigen. So fehlt z.B. den globalen Klimamodellen noch ein gekoppelter Kohlenstoffkreislauf. Mit dem kommenden IPCC-Sachstandsbericht (bis Ende 2013/2014) sind weitere Modellverbesserungen zu erwarten. Durch die hier durchgeführte Berücksichtigung einer Anzahl von Klimaprojek-

tionen steigt aber die Wahrscheinlichkeit, dass die angegebenen Leitplanken vertrauenswürdig sind.

Mit den hier erarbeiteten Erkenntnissen ist es somit möglich, Rahmenbedingungen für die Entwicklung von Anpassungsstrategien für klimasensitive Systeme zu etablieren.

Um eine Entscheidung im Hinblick auf eine Anpassungsstrategie zu finden, müssen aus dem Ensemble der Klimaprojektionen Werte abgeleitet werden können. Wird aus dem Ensemble der Klimaprojektionen der Median gewählt, so wird der Mittelpunkt einer Spanne von Simulationen verwendet, die alle als gleich wahrscheinlich zu betrachten sind. Die alleinige Verwendung des Medians der Ergebnisse der Klimaprojektionen ist nicht objektiv zu begründen.

Daher werden neben dem Median auch die Grenzen des Korridors angegeben, die sich aus der Analyse der Klimaprojektionen ergeben. In wie weit sich eine Anpassungsmaßnahme dann am oberen oder unteren Rands des Ensemblekorridors oder am Median des Ensembles orientiert, hängt von der jeweiligen Fragestellung im Handlungsfeld ab und ist von den Fachexperten zu entscheiden.

Durch die Angaben der klimatischen Leitplanken werden die für die Entwicklung von Anpassungsstrategien in Baden-Württemberg erforderlichen Grundlagen geschaffen.

Ergebnisanalyse der Kennzahlen

Die folgende Ergebnisanalyse der Kennzahlen basiert auf der Betrachtungsweise der Perzentile (vgl. Anlagen I und Anlagen J). Die Betrachtung der Perzentile bietet den Vorteil, einen gewissen Schwankungsbereich von Modellergebnissen zu erlauben und gleichzeitig Ausreißerwerte unberücksichtigt zu lassen (vgl. Kapitel 5.1).

Es werden in der folgenden Analyse der Mediane und der Grenzen der Korridore zur Beschreibung der klima-

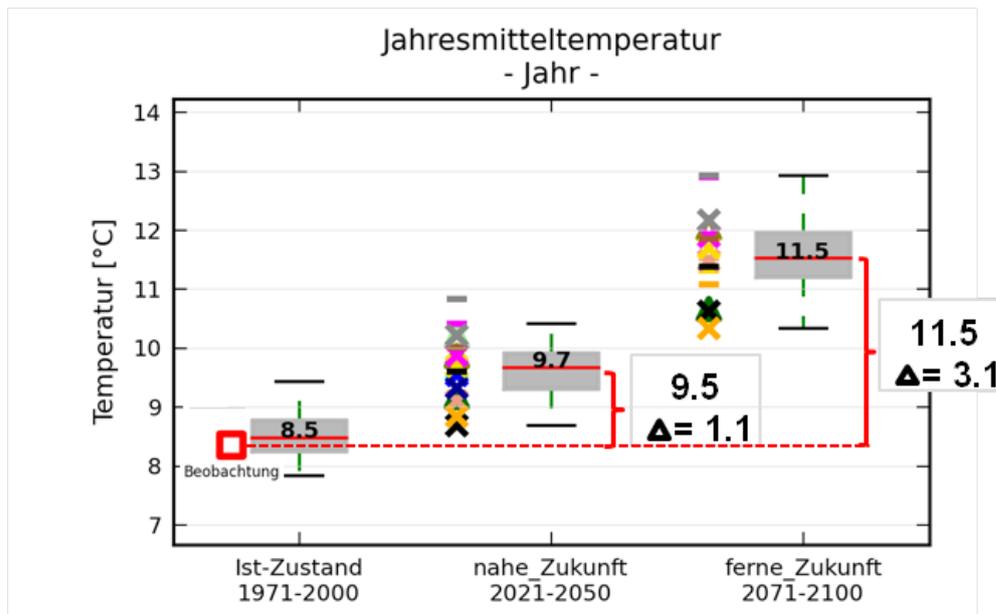


Bild 6-1: Übersicht über die Ergebnisse der Analyse der Kennzahlen auf Basis der Perzentilbetrachtung sowie subjektiver Bewertung (Erläuterung der Kürzel der Kennzahlen in Kapitel 3.3)

tischen Leitplanken nur die Ergebnisse der Klimaprojektionen mit der Auflösung von 25x25 km² betrachtet. Dies verhindert die Überbewertung der CCLM-Modelle, die ja auch in der Auflösung 7x7 km² vorliegen und ausgewertet wurden, im Vergleich zu den anderen Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles. Die Perzentilwerte für alle Kennzahlen finden sich in den Tabellen der Anlage J. Darin sind die Perzentilwerte für die nahe Zukunft, die sich nur auf die 25x25 km²-Auflösung beziehen, mit dem Zusatz „(25 km)“ gekennzeichnet. Für die ferne Zukunft liegen nur Klimaprojektionen in 25x25 km²-Auflösung vor, daher gibt es keinen Zusatz in den Tabellen der Anlage J.

Eine direkte Übernahme der Werte für die zukünftigen klimatischen Leitplanken aus den Simulationsergebnissen der Klimaprojektionen ist nicht empfehlenswert. Viele Modellprojektionen zeigen eine systematische Über- oder Unterschätzung bezüglich bestimmter Klimaparameter.

Stattdessen wird für eine bestmögliche Abschätzung einer zukünftigen Entwicklung einer Kennzahl das Delta-Change-Verfahren gewählt [HAY et al. 2000, ANDRÉASSON et al. 2004]. Dabei werden die relativen Veränderungen der Werte zwischen der Simulation des Ist-Zustands und der Zukunftsszenarien, also das Klimasignal, auf die beobachteten Werte übertragen.

Das mittlere Klimasignal aller Klimaprojektionen für beispielsweise die nahe Zukunft ergibt sich, indem zuerst für jede Klimaprojektion einzeln die Differenz aus dem Wert der Kennzahl der nahen Zukunft und dem Wert der Kennzahl des Ist-Zustands gebildet wird. Der Median dieser Differenzen stellt dann das mittlere Klimasignal dar (vgl. Kapitel 5.1: Unterschied der Medianberechnung des Klimasignals). Dieses mittlere Klimasignal wird dann zum Beobachtungswert dazu addiert (Delta-Change-Verfahren), um einen Wert für die Kennzahl für die nahe Zukunft zu erhalten.

In Bild 6-1 ist das Vorgehen exemplarisch erläutert: der Median des mittleren Klimasignals für die Jahresmitteltemperatur in der nahen Zukunft liegt bei +1,1, für die ferne Zukunft bei +3,1. Zusammen mit dem Beobachtungswert des Ist-Zustands von +8,4°C ergibt sich mit diesem Delta-Change Ansatz eine Temperatur von +9,5°C für die nahe Zukunft und +11,5°C für die ferne Zukunft. Die Medianwerte in den Box-Whisker-Abbildungen (in Bild 6-1: +9,7°C bzw. 11,5°C) basieren auf den absoluten Ergebnissen aller ausgewerteten Klimaprojektionen für das jeweilige Zukunftsszenario und müssen folglich nicht mit den Ergebnissen nach dem Delta-Change-Verfahren übereinstimmen.

Table 6-1: Übersicht über die Ergebnisse der Analyse der Kennzahlen auf Basis der Perzentilbetrachtung sowie subjektiver Bewertung (Erläuterung der Kürzel der Kennzahlen in Kapitel 3.3)

Kennzahl	Beob.	Ist-Zustand		Klimasignal (nahe Zukunft)				Klimasignal (ferne Zukunft)				Klimasignal				
		Bias	Spannw., Streuung	min	15. Perz.	50. Perz.	85. Perz.	max	min	15. Perz.	50. Perz.	85. Perz.	max	Streuung	Stärke	Richt-sich.
T Mittel [°C]	84	0,1	0,9 gering	0,7	0,8	1,1	1,7	2,1	1,9	2,5	3,1	3,6	4,2	gering	hoch	hoch
Heiztag [d]	287	-0,5	23,1 gering	-28,5	-22,9	-16,1	-13,8	-2,6	-61,5	-55,7	-49,9	-38,5	-32,2	gering	hoch	hoch
Kühlgradtage [K*d]	77,0	8,9	87,2 hoch	12,2	23,5	48,1	108,7	167,8	77,2	89,8	231,0	335,3	382,9	hoch	hoch	hoch
Veg-Beginn [d]	90,9	0,7	9,7 gering	-8,7	-7,7	-5,2	-2,9	-2,5	-20,7	-20,2	-13,3	-9,5	-8,3	mäßig	hoch	hoch
Tropennacht [d]	0,1	0,4	3,6 hoch	0,0	0,3	1,0	5,6	9,0	0,7	1,6	7,5	18,3	22,4	hoch	hoch	hoch
Frosttag [d]	97,0	-13,8	43,5 hoch	-31,3	-27,0	-19,1	-15,2	-14,3	-55,2	-51,9	-47,2	-35,2	-32,7	gering	hoch	hoch
Letzter Frost [d]	114	-15,1	26,9 mäßig	-12,7	-11,5	-6,8	-4,6	-1,7	-28,6	-25,7	-20,3	-16,7	-8,1	mäßig	hoch	hoch
Tropentag [d]	4,0	-0,3	12,3 hoch	0,4	1,0	2,7	8,6	13,8	1,5	5,4	20,8	27,8	35,6	hoch	hoch	hoch
Sommertag [d]	30,2	-2,9	27,3 hoch	1,6	4,1	10,1	17,8	22,2	11,3	20,1	32,3	44,3	54,1	mäßig	hoch	hoch
Eistag [d]	23,4	2,1	15,4 hoch	-17,5	-13,7	-8,9	-4,7	-4,1	-27,4	-23,3	-17,8	-9,9	-6,1	mäßig	hoch	hoch
N Jahr [mm]	949	12,5%	31,0% hoch	-4,6%	-1,8%	4,1%	6,5%	9,8%	-10,4%	-9,0%	1,3%	10,6%	12,6%	hoch	gering	gering
N Hyd. Winter [mm]	443	16,3%	42,2% hoch	-1,8%	-1,0%	7,1%	14,8%	24,1%	-4,2%	-3,0%	15,9%	22,3%	26,1%	hoch	hoch	mäßig
N Hyd. Sommer [mm]	512	5,8%	21,4% mäßig	-7,0%	-5,8%	-0,7%	3,4%	5,8%	-21,3%	-18,3%	-9,4%	-0,9%	4,3%	hoch	mäßig	mäßig
N Tage-Trocken [d]	227	-34,4	64,7 hoch	-8,3	-3,5	0,3	7,6	11,0	-11,3	-5,7	3,4	14,7	30,4	hoch	gering	mäßig
N Tage-StarkN [d]	3,6	0,0	1,2 mäßig	-0,3	0,1	0,7	1,0	1,2	-0,7	0,0	0,9	2,0	2,2	mäßig	hoch	mäßig
StarkN [mm]	40,7	-5,6%	15,2% mäßig	-2,6%	-0,1%	6,5%	12,1%	15,4%	-7,2%	4,8%	12,8%	24,7%	37,9%	hoch	mäßig	mäßig
N Frühj [mm]	225	8,7%	35,1% hoch	-8,5%	-3,0%	5,6%	11,6%	15,3%	-7,0%	-2,9%	10,4%	19,8%	27,4%	hoch	hoch	mäßig
N Veg-Per [mm]	435	5,7%	22,8% hoch	-14,0%	-8,1%	-0,9%	4,4%	6,3%	-23,1%	-20,6%	-13,1%	-4,2%	4,1%	hoch	mäßig	mäßig
Trockenper-Veg [d]	3,6	-0,5	0,7 mäßig	-0,1	0,0	0,2	0,5	0,6	0,0	0,1	0,8	1,3	1,6	mäßig	mäßig	mäßig
Trockenper-Max [d]	20,7	-3,7	5,5 mäßig	-2,3	-0,7	0,8	2,0	2,4	-1,0	-0,4	1,2	4,8	6,9	hoch	gering	mäßig
Glob Jahr [kWh/m2]	1038	127,1	259,8 mäßig	-39,8	-30,8	-1,2	42,2	45,9	-66,8	-45,1	18,9	74,5	119,9	hoch	gering	gering
Glob Stabw [W/rrP]	80,4	11,1	26,6 hoch	-1,4	-0,3	1,7	3,5	4,1	-0,8	0,2	3,7	6,7	8,5	hoch	gering	gering
Glob Min [W/m2]	20,1	-16,2	15,8 -	-1,3	-0,8	-0,2	0,2	0,4	-1,7	-1,5	-0,3	0,9	1,9	-	-	-
Glob Max [W/m2]	315	30,3	132,0 hoch	-3,5	-2,4	-1,5	1,7	7,1	-6,8	-3,9	-1,8	4,2	6,7	hoch	gering	gering
Wind Jahr [m/s]	2,0	1,3	1,2 hoch	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	gering	gering	hoch
Wind Stabw [m/s]	1,2	0,3	0,3 mäßig	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	gering	gering	hoch
Wind Max [m/s]	8,7	0,1	1,2 gering	-0,4	-0,1	0,1	0,4	0,9	-0,3	-0,2	0,2	0,5	0,8	mäßig	gering	hoch
Wind Tag>8ms [d]	1,7	1,2	4,7 hoch	-0,9	0,0	0,5	1,3	2,1	-3,1	-0,4	0,4	1,3	1,7	hoch	gering	gering

Beob.: Wert der Beobachtungsdaten
 Richt-sich.: Richtungssicherheit des Klimasignals
 Bias: Abweichung des Medians der Klimaprojektionen zum Beobachtungswert
 Spannwi.: Die Spannweite ist die Differenz des 85. und 15. Perzentils
 Perz.: Perzentilwert
 zufriedenst.: Sind die Modellergebnisse zufriedenstellend

Diese Kombination aus Beobachtungswert und Klimasignal stellt nur eine Näherung dar. Voraussetzung für die Anwendung des Delta-Change-Verfahrens ist, dass die grundsätzlichen klimatischen Bedingungen des Ist-Zustands und der Zukunft vergleichbar bleiben.

Eine Übertragbarkeit des Klimasignals auf Beobachtungsdaten ist vor allem dann zu hinterfragen, wenn der Median der Simulationsergebnisse des Ist-Zustands weit vom Beobachtungswert abweicht oder die Unsicherheit der Modellergebnisse generell sehr hoch ist. Weitere Vor- und Nachteile des Verfahrens finden sich z.B. in BOSSHARD et al. (2011).

Da das Delta-Change-Verfahren robust und nachvollziehbar ist, wird es hier für die Übertragung des Klimasignals auf die Beobachtungsdaten umgesetzt. Auch die aktuellen Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz (CH2011 2011) verwenden ein modifiziertes Delta-Change-Verfahren.

Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Analyse und der Bewertung der Kennzahlen auf Basis der Perzentilbetrachtung:

- Für die Einstufungen werden die drei Klassen „gering“, „mäßig“ und „hoch“ verwendet.
- Bei der Bewertung der Streuung des Werts im Ist-Zustand wird zum einen die Spannweite der auftretenden Simulationsergebnisse aus den Klimaprojektionen mit dem Beobachtungswert verglichen. Dabei wird als Spannweite die Differenz des 85. und des 15. Perzentils bezeichnet. Zum anderen wird die Abweichung (Bias) des Medians der Klimaprojektionen vom Beobachtungswert betrachtet.
Beispiel Lufttemperatur: Die Spannweite der Klimaprojektionen beträgt $0,9^{\circ}\text{C}$, ist also relativ gering (Tabelle 6-1). Der Median der Klimaprojektionen liegt bei $8,5^{\circ}\text{C}$, somit beträgt der Bias $0,1^{\circ}\text{C}$ (Tabelle 6-1) und ist somit auch gering. Daher wird diese Streuung als gering eingestuft.
- Für die Bewertung der Streuung des Klimasignals wird zudem die Spannweite der Klimaprojektionen in der nahen und fernen Zukunft mit dem jeweiligen Median der Klimaprojektionen verglichen.

Beispiel Lufttemperatur: Die Spannweite in der nahen Zukunft liegt zwischen $0,8^{\circ}\text{C}$ und $1,7^{\circ}\text{C}$, in der fernen Zukunft zwischen $2,5^{\circ}\text{C}$ und $3,6^{\circ}\text{C}$ (Tabelle 6-1). Diese Streuung wird als gering eingestuft.

- Bei der Richtungssicherheit wird überprüft, ob alle Klimaprojektionen die gleiche Tendenz für die Zukunft zeigen oder nicht. Auch die Stärke, d.h. die Deutlichkeit des Klimasignals wird beachtet.

Beispiel Lufttemperatur: alle Klimaprojektionen haben ein eindeutiges Signal der Zunahme der Temperatur. Die Stärke des Signals und die Richtungssicherheit sind somit hoch.

- Auf Grundlage von Streuung, Stärke und Richtungssicherheit des Klimasignals wird eine Einschätzung gegeben, in wie weit die Ergebnisse der Klimaprojektionen zufriedenstellend sind und somit verlässlich erscheinen. Dabei werden folgende Einschätzungen gegeben:

- „zufriedenstellend“: Dies ist die beste vergebene Bewertung.
- „bedingt zufriedenstellend“: Diese Gruppe umfasst die meisten Kennzahlen. Dabei werden Ergebnisse erzielt, die eine Aussagekraft besitzen, jedoch durch beispielsweise hohe Streuungen mit einer größeren Unsicherheit verbunden sind.
- „nicht zufriedenstellend“: Die Kennzahlen dieser Gruppe besitzen meist so große Streuungen innerhalb des Ensembles, dass kaum eine Aussage über die zukünftige Entwicklung möglich ist.

Beispiel Lufttemperatur: Die Einschätzung wird zufriedenstellend eingestuft.

Bei der Bewertung der Streuungen der Klimaprojektionen wurde berücksichtigt, dass selbst Messungen realer Werte Streuungen aufweisen, die je nach untersuchtem Klimaparameter unterschiedlich groß sind. So wird z.B. die Lufttemperatur deutlich genauer als die Niederschlagsmenge erfasst.

Für die Bewertung der Streuungen und Richtungssicherheit des Klimasignals und der Einschätzung der Klimaprojektion in der Tabelle 6-1 konnte keine abschließende statistische Einschätzung durchgeführt werden, sondern es erfolgte eine Experteneinschätzung aus der Zusammenschau der Ergebnisse.

Im weiteren Text werden für die 28 Kennzahlen die Änderungen der Werte in den Zukunftsszenarien im Vergleich zum Ist-Zustand beschrieben und die Einschätzung der jeweiligen Modellergebnisse durchgeführt.

- Die **Jahresmitteltemperatur** von 8,4°C für Baden-Württemberg auf Basis der Beobachtungsdaten wird von den Klimaprojektionen gut wiedergegeben. Die Spannweite der Abweichungen betragen lediglich 0,9°C bei einer minimalen Überschätzung von +0,1°C im Mittel.

Für die nahe Zukunft ergibt sich für den Median ein Klimasignal von +1,1°C bei einer Spannweite von 0,9°C. Der Median für die ferne Zukunft zeigt sogar eine Temperaturzunahme von +3,1°C.

Die Modellergebnisse sind zufriedenstellend, da die Streuung der Modellergebnisse im Ist-Zustand gering ist und auch das Klimasignal gering zwischen den Klimaprojektionen streut, bei hoher Stärke und Richtungssicherheit.

Nach dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich aus der Kombination der Jahresmitteltemperatur der Beobachtungsdaten (8,4°C) mit dem Median des Klimasignals von +1,1°C für die nahe Zukunft ein mittlerer Temperaturwert von etwa 9,5°C und für die ferne Zukunft mit dem Median des Klimasignals von +3,1°C ein Wert von 11,5°C.

Bei einer konservativen Orientierung an einem worst-case-Szenario können hier statt dem Median die Werte des 85. Perzentils als Wert für das Klimasignal verwendet werden. Entsprechend Tabelle 6-1 (Klimasignal +1,7°C (nahe Zukunft) und +3,6°C (ferne Zukunft)) ergibt sich dann für die nahe Zukunft ein mittlerer Temperaturwert von 10,1°C und für die ferne Zukunft ein Wert von 12,0°C.

- Die Anzahl der **Heiztage** wird von den Klimaprojektionen ebenfalls gut simuliert. Der Median ist nahezu identisch mit dem Beobachtungswert und die Spannweite der Abweichungen von 23,1 Tagen ist angesichts der absoluten Anzahl von 287 Tagen (Beobachtungsdaten) gering.

Die Anzahl der **Heiztage** nimmt für die Zukunftsszenarien ab. Für die nahe Zukunft liegt die Abnahme des Medians bei -16 Tagen, bei der ferne Zukunft bei -50 Tagen. Die Abweichungen zwischen den einzel-

nen Klimaprojektionen der fernen Zukunft sind zwar durchaus vorhanden, zeigen jedoch eine klare Tendenz der Abnahme von Heiztagen.

Bei den Heiztagen zeigen sich zufriedenstellende Modellergebnisse mit geringen Streuungen und starkem, richtungssicheren Klimasignal.

Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich auf Basis der Beobachtungsdaten und dem Median des Klimasignals für die nahe Zukunft eine Anzahl von 271 Heiztagen und für die ferne Zukunft eine Anzahl von 237 Heiztagen. Bei einer Orientierung an dem 15. Perzentil statt dem Median ergeben sich niedrige Zahlen für die Heiztage (264 Heiztage für die nahe Zukunft bzw. 231 Heiztage für die ferne Zukunft).

- Bei den **Kühlgradtagen** zeigt der Median der Klimaprojektionen eine Überschätzung der Beobachtungsdaten (77 Kelvin*Tag) um +9 Kelvin*Tag. Die Spannweite der Ergebnisse der Klimaprojektionen für den Ist-Zustand ist mit 87 Kelvin*Tag sehr groß.

In den Zukunftsszenarien wird durchweg eine Zunahme der Werte der Kühlgradtage simuliert. Für die nahe Zukunft nehmen die Werte des Medians um +48 Kelvin*Tag und in der fernen Zukunft um +231 Kelvin*Tag zu.

Die Simulation der Kennzahl Kühlgradtage ist im Ist-Zustand mit einer großen Streuung verbunden. Auch im Zukunftsszenario differieren die einzelnen Modellergebnisse deutlich. Dagegen ist die Stärke des Klimasignals hoch, ebenso wie die Richtungssicherheit. Da aber die Streuung im Ist-Zustand und die Streuung des Klimasignals hoch sind, werden die Modellergebnisse als eingeschränkt zufriedenstellend eingestuft.

Wird das deutliche Klimasignal der Klimaprojektionen auf die Werte der Kühlgradtage aus den Beobachtungsdaten übertragen, so ergibt sich bei Verwendung des Medians für die nahe Zukunft ein Wert von 125 Kelvin*Tag und für die ferne Zukunft von 308 Kelvin*Tag.

- Der **Vegetationsbeginn** ist laut Beobachtungsdaten etwa der 1. April. Bei den Klimaprojektionen zeigt der Median in etwa das gleiche Datum (+0,7 Tage). Die Spannweite der Klimaprojektionen liegt bei 9,7 Tagen. Die Modellergebnisse sind folglich akzeptabel und die Schwankungen der Modellergebnisse gering.

Für das Zukunftsszenario wird eine klare zeitliche

Vorverlegung des Vegetationsbeginns simuliert. Für die nahe Zukunft ergibt sich für den Median ein Klimasignal mit einem früheren Vegetationsbeginn von -5,2 Tagen, für die ferne Zukunft von -13,3 Tagen. Die Spannweite der Klimaprojektionen bei der nahen Zukunft beträgt 4,8 Tage, für die ferne Zukunft steigt die Spannweite auf 10,7 Tage.

Der Vegetationsbeginn wird eingeschränkt zufriedenstellend simuliert. Zwar ist die Streuung im Ist-Zustand gering und die Richtung des Klimasignals eindeutig, aber die Streuung des Klimasignals zwischen den Klimaprojektionen wird als mäßig eingestuft.

Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich aus der Kombination des Vegetationsbeginns der Beobachtungsdaten und dem Median des Klimasignals der Projektionen für die nahe Zukunft ein Vegetationsbeginn um den 28. März und für die ferne Zukunft um den 19. März.

- Bei der Kennzahl **Datum letzter Frost** ergibt sich für die Beobachtungsdaten etwa der 24. April. Der Median der Klimaprojektionen für den Wert des letzten Frosts im Ist-Zustand liegt dagegen um -15,1 Tage und maximal sogar um -24,9 Tage früher.

Für die Zukunft ergibt sich ähnlich dem Vegetationsbeginn eine zeitliche Vorverlegung. Das Klimasignal ist sowohl für nahe als auch ferne Zukunft mit im Mittel -6,8 Tagen bzw. -20,3 Tagen eindeutig. Die Spannweiten der Modellergebnisse betragen dabei 6,9 Tage bzw. 9 Tage.

Die Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand für diese Kennzahl sind ausreichend bei einer hohen Streuung. Die mäßigen Streuungen zwischen den Klimaprojektionen beim Ist-Zustand und beim Klimasignal führen dazu, dass die Klimaprojektionen nur als eingeschränkt zufriedenstellend eingestuft werden.

Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich bei Verwendung des Medians des Klimasignals in Verbindung mit dem Beobachtungswert ein Datum des letzten Frostes für die nahe Zukunft um den 17. April und für die ferne Zukunft um den 4. April.

- Die Kennzahl **Anzahl der Frosttage** zeigt ähnliche Ergebnisse wie das Datum des letzten Frosttags. Der Median der Klimaprojektionen für den Ist-Zustand unterschreitet den Beobachtungswert (97 Tage) um -13,8 Tage. Die Spannweite der Anzahl an Frosttagen liegt für alle Klimaprojektionen bei 43,5 Tagen.

Die **Anzahl der Frosttage** nimmt für die Zukunftsszenarien deutlich ab. Der Median des Klimasignals für die nahe Zukunft beträgt -19 Tage und für die ferne Zukunft -47 Tage, was mehr als einer Halbierung der Anzahl an Frosttagen entspricht. Die Spannweite der Ergebnisse ist mit 11,8 Tagen (nahe Zukunft) bzw. 16,7 Tagen (ferne Zukunft) angesichts des starken Klimasignals relativ gering.

Die Simulation der Anzahl der Frosttage ist eingeschränkt zufriedenstellend, da zwar das Klimasignal nur eine geringe Streuung zeigt, aber die Streuung im Ist-Zustand und auch die Abweichungen der Mediane der Klimaprojektionen zum Beobachtungswert recht hoch erscheinen.

Wird das starke Klimasignal der Zukunftsszenarien auf die Beobachtungsdaten übertragen, so ergibt sich für die nahe Zukunft eine Anzahl von 78 Frosttagen pro Jahr und für die ferne Zukunft eine Anzahl von 50 Frosttagen.

- Die Anzahl der Eistage wird bei den Beobachtungsdaten mit 23,4 Tagen angegeben. Der Median der Klimaprojektionen für den Ist-Zustand überschätzt diese Anzahl um etwa +2 Tage. Die Spannweite der Klimaprojektionen liegt bei 15,4 Tagen.

Für die nahe und die ferne Zukunft wird eine klare Abnahme der Eistage simuliert. Der Median des Klimasignals für die nahe Zukunft beträgt -8,9 Tage und für die ferne Zukunft -17,8 Tage, wobei aber eine Spannweite von 9 Tagen für die nahe Zukunft und von 13,4 Tagen für die ferne Zukunft auftritt.

Angesichts der eher kleinen absoluten Anzahl von Eistagen ist die Streuung der Klimaprojektionsergebnisse im Ist-Zustand hoch. Die Streuung der Werte des Klimasignals ist mäßig. Insgesamt führt dies zu einer eingeschränkt zufriedenstellenden Bewertung dieser Kennzahl.

Aus der Kombination von Messdaten und Median des Klimasignals mit dem Delta-Change-Verfahren ergeben sich für die nahe Zukunft 14,5 Eistage pro Jahr und für die ferne Zukunft nur noch 5,6 Eistage.

- Die Anzahl der **Tropennächte** ist laut Beobachtungsdaten deutlich unter einem Tag. Auch der Median der Klimaprojektionen liegt unter einem Tag, wobei auch Ergebnisse von Klimaprojektionen mit bis zu 8,6 Tropennächte pro Jahr existieren.

Das Klimasignal für die Anzahl der Tropennächte zeigt eine Zunahme, die zumindest für die ferne Zukunft sehr deutlich ausfällt. Für die nahe Zukunft nimmt der Median um +1,0 Tage zu, für die ferne Zukunft um +7,5 Tage. Die Spannweite der Klimaprojektionen liegt jedoch für die nahe Zukunft bei 5,3 Tagen und für die ferne Zukunft bei 16,7 Tagen.

Daher ist die Aussagekraft des Klimasignals äußerst klein. Es kann lediglich abgeleitet werden, dass zur Zukunft hin die Anzahl der Tropennächte tendenziell zunimmt. Die hohen Streuungen führen zu einer nicht zufriedenstellenden Bewertung dieser Kennzahl.

- Auch die Anzahl der **Tropentage** ist mit 4 Tagen nur geringfügig höher als die Anzahl der Tropennächte. Der Median der Klimaprojektionen für den Ist-Zustand weicht nur um -0,3 Tage vom Beobachtungswert ab, die Streuung ist jedoch durch eine Spannweite der Modellergebnisse von 12,3 Tagen sehr hoch.

Ähnlich den Tropennächten verhalten sich auch die Tropentage bezüglich des Klimasignals. Die Zunahme der Tropentage für die nahe Zukunft (Median +2,7 Tage) und ferne Zukunft (Median +20,9 Tage) ist deutlich. Allerdings zeigen diese Werte große Streuungen, mit einer Spannweite der Klimaprojektionen von 7,6 Tagen für die nahe Zukunft und bis zu 22,4 Tagen für die ferne Zukunft.

Daher erlaubt das Klimasignal nur eine qualitative Aussage hinsichtlich einer zukünftigen Zunahme der Tropentage. Die Streuung im Ist-Zustand und die Streuung des Klimasignals sind zwar hoch, das Klimasignal ist jedoch sehr stark und es ist eine hohe Richtungssicherheit gegeben, weshalb diese Kennzahl als eingeschränkt zufriedenstellend bewertet wird.

- Die Anzahl der **Sommertage** liegt laut Beobachtungsdaten bei etwa 30 Tagen, während der Median der Klimaprojektionen bei 27 Sommertagen liegt. Die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei 27,3 Tagen.

Für die Zukunft ergibt sich ein deutliches Klimasignal der Zunahme der Sommertage. Der Median für die nahe Zukunft ergibt eine Zunahme von +10,1 Tagen und für die ferne Zukunft von +32,3 Tagen. Die Streuung ist jedoch ebenfalls recht hoch mit einer Spannweite von 13,7 Tagen für die nahe Zukunft und bis zu 24,2 Tagen für die ferne Zukunft.

Die Simulationsergebnisse der Klimaprojektionen im

Ist-Zustand sind bezüglich der Kennzahl Sommertag allenfalls ausreichend bei gleichzeitig recht hoher Streuung. Die Streuung im Ist-Zustand ist zwar hoch, beim starken Klimasignal jedoch nur mäßig. Daher wird die Simulation der Anzahl der Sommertage als eingeschränkt zufriedenstellend bewertet.

Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich aus der Verbindung des Werts der Beobachtungsdaten mit dem Median des Klimasignals für die nahe Zukunft eine mittlere Anzahl von 40,3 Sommertagen pro Jahr und für die ferne Zukunft eine Anzahl von 62,5 Tagen pro Jahr. Damit zeigt sich eine Verdopplung der Sommertage zur fernen Zukunft hin bei eingeschränkt zufriedenstellenden Simulationsergebnissen. Unter Annahme eines worst-case-Falls (Verwendung des 85. Perzentils statt des Medians) ergeben sich sogar in der nahen Zukunft 48 Sommertage und in der fernen Zukunft 74,5 Sommertage.

- Die **Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr** für Baden-Württemberg beträgt entsprechend den Beobachtungsdaten etwa 443 mm. Die Klimaprojektionen überschätzen diesen Wert weitgehend, der Median liegt annähernd 16,3 % über dem Beobachtungswert bei einer Spannbreite von 42,2 %.

Für das Winterhalbjahr und die nahe Zukunft zeigt der Median eine Tendenz der Niederschlagszunahme um +7,1 %. Die Spannweite der Klimaprojektionen liegt jedoch bei 15,8 %. Für die ferne Zukunft verstärkt sich das Klimasignal weiter, der Median ergibt eine Niederschlagszunahme von +15,9 %, jedoch bei einer Spannweite von 25,3 %.

Damit ergibt sich qualitativ ein klares Signal hinsichtlich der absoluten Niederschlagsänderung, jedoch mit hoher Streuung.

Die Klimaprojektionen können die beobachtete Niederschlagssumme nur bedingt wiedergeben und auch der Wertebereich der Klimaprojektionen zeigt eine hohe Streuung. In den Zukunftsszenarien kann trotz der hohen Streuungen der Simulationsergebnisse anhand des starken Klimasignals eine zukünftige wahrscheinliche Entwicklung dieser Kennzahl abgeschätzt werden. Insgesamt wird die Simulation der Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr als eingeschränkt zufriedenstellend eingestuft.

Die Kombination aus Beobachtungswert und dem

Median des Klimasignals führt für die nahe Zukunft zu einer Niederschlagssumme im Winterhalbjahr von etwa 475 mm und für die ferne Zukunft von 514 mm. Bei Verwendung des 85. Perzentils statt des Medians als worst-case-Annahme ergeben sich sogar für die nahe Zukunft 508 mm und für die ferne Zukunft 542 mm.

- Auch für die **Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr** überschätzen die Klimaprojektionen die Beobachtungsdaten (512 mm). Allerdings liegen die Unterschiede des Medians bei +5,8% bei einer Spannweite der Klimaprojektionen von 21,4%.

Im Sommerhalbjahr der Zukunftsszenarien zeigt sich bezüglich des Klimasignals eine tendenzielle Abnahme der Niederschlagssumme. Für die nahe Zukunft ist das Signal sehr schwach, der Wert des Medians nimmt nur um -0,7% ab, für die ferne Zukunft dagegen liegt die Niederschlagsabnahme bei -9,4%. Allerdings verhalten sich die Klimaprojektionen in der nahen Zukunft uneinheitlich. Einige Klimaprojektionen simulieren eine Niederschlagszunahme und so liegt die Spannweite der Modellergebnisse bei 9,2%. Für die ferne Zukunft nimmt die Spannweite zwar auf 17,4% zu, die Tendenz aller Klimaprojektionen ist jedoch eindeutig.

Die Simulation der beobachteten Sommerniederschlagssummen durch die Klimaprojektionen ist zufriedenstellend. In den Zukunftsszenarien zeigen sich mäßig bis starken Streuungen und einer nur mäßigen Richtungssicherheit des Klimasignals. Auch die Simulation dieser Kennzahl ist daher eingeschränkt zufriedenstellend,

Auf Basis der Beobachtungsdaten ergibt sich mit dem Median des Klimasignals der Projektionen für die nahe Zukunft eine Niederschlagssumme im Sommerhalbjahr von 504 mm und für die ferne Zukunft von 464 mm.

- Die Niederschlagssumme im Jahr wird den Ergebnissen der Halbjahre zufolge von den Klimaprojektionen im Ist-Zustand ebenfalls überschätzt. Die Werte liegen mit +12,5% (Überschätzung entsprechend des Wertes des Medians) und einer Spannweite der Modellergebnisse von 31% (Überschätzung maximal) zwischen den Ergebnissen für den Niederschlag im Winter- und Sommerhalbjahr. Laut Beobachtungsdaten ergibt sich eine Niederschlags-Jahressumme von 949 mm für Baden-Württemberg.

Die Werte für das Gesamtjahr sind eine Kombination

der Ergebnisse aus den beiden Halbjahren, entsprechend ist keine klare Tendenz des Klimasignals erkennbar. Die Veränderung der Werte der Mediane von +4,1% für die nahe Zukunft und +1,3% für die ferne Zukunft sind angesichts der Spannweiten der Modellergebnisse von 8,3% bzw. 19,6% wenig aussagekräftig. Es sind somit für die zukünftige Niederschlagssumme im Gesamtjahr wenige Änderungen zu erwarten.

Die Niederschlagssumme im Jahr, die sich als Mittelwert aus Sommerhalbjahr und Winterhalbjahr ergibt, erhält ebenfalls die Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“.

- Die **Niederschlagssumme im Frühjahr** liegt auf Basis der Beobachtungsdaten bei 225 mm. Ähnlich den Niederschlagssummen der Halbjahre und des Gesamtjahrs liegt dieser Wert am unteren Rand der Simulationsergebnisse der Klimaprojektionen. Die Unterschiede zwischen Beobachtung und den Ergebnissen der Klimaprojektionen sind vergleichbar zu den Niederschlagssummen der Halbjahre und des Gesamtjahrs. Der Median der Klimaprojektionen überschreitet die Beobachtungsdaten um +8,7% bei einer Spannweite der Modellergebnisse von 35,1%. Dadurch ergibt sich eine recht hohe Streuung.

Das Klimasignal für die Zukunft zeigt eine Zunahme der Frühjahrsniederschläge.

Diese beträgt +5,6% für die nahe Zukunft und +10,4% für die ferne Zukunft im Mittel über alle Klimaprojektionen. Auch für die Zukunft und das Klimasignal zeigen sich große Spannweiten der Modellergebnisse von 14,6% für die nahe Zukunft und 22,7% für die ferne Zukunft.

Die Streuungen der Simulationsergebnisse bei dieser Kennzahl sind zwar hoch, dennoch werden die Ergebnisse als bedingt zufriedenstellend bewertet.

In Verbindung mit dem Median des Klimasignals ergibt sich auf Basis der Beobachtungswerte eine Niederschlagssumme für das Frühjahr und die nahe Zukunft von 238 mm und für die ferne Zukunft von 248 mm.

- Der **Niederschlag in der Vegetationsperiode** der Beobachtungsdaten von 435 mm wird durch den Median um +5,7% überschätzt. Die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei 22,8%. Der Beobachtungswert liegt unterhalb des 15. Perzentils.

Das Klimasignal für die nahe Zukunft ist nicht eindeutig. Für die ferne Zukunft dagegen simulieren alle Klimaprojektionen eine Abnahme der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode von im Mittel - 13,1 % bei einer Spannweite der Modellergebnisse von 16,4 %.

Die hohen Streuungen der Simulationsergebnisse lassen bei einem nur mäßig ausgeprägten Klimasignal lediglich die Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“ zu.

Aus der Kombination aus Beobachtungswert und Median des Klimasignals ergibt sich für die nahe Zukunft eine Niederschlagssumme von 431 mm, für die ferne Zukunft nur von 378 mm.

- Bei der **Starkniederschlags-Höhe** liegt der beobachtete Wert mit 40,7 mm am oberen Ende der Simulationsergebnisse der Klimaprojektionen. Der Median der Starkniederschlags-Höhe unterschätzt den Beobachtungswert um - 5,6 % bei einer Spannbreite der Ergebnisse von 15,2 %.

Das Klimasignal für die Starkniederschlags-Höhe ist eindeutig. Für die nahe Zukunft steigt der Median der Starkniederschlags-Höhe um +6,5 %, für die ferne Zukunft steigt der Median sogar um +12,8 % (bei einer Spannweite der Modellergebnisse von 12,2 % bzw. 19,9 %).

Die Klimaprojektionen im Ist-Zustand zeigen zwar eine Unterschätzung dieser Kennzahl, die Streuung ist jedoch gering. Zusammen mit dem eindeutigen Klimasignal wird die Simulation dieser Kennzahl als eingeschränkt zufriedenstellend bewertet.

Aus der Kombination von Beobachtungswert und Median des Klimasignals kann eine mittlere Starkniederschlagshöhe von 43,3 mm für die nahe Zukunft und 45,9 mm für die ferne Zukunft abgeleitet werden.

- Die **Anzahl der Tage mit Starkniederschlag** wird von den Klimaprojektionen sehr gut simuliert, wobei auch die absolute Tageszahl mit 3,6 Tagen (Beobachtungsdaten) sehr niedrig ist. Der Median stimmt mit den Beobachtungsdaten weitgehend überein und die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei 1,2 Tagen.

Für die Zukunftsszenarien zeigt sich ein eindeutiges Klimasignal mit einer Zunahme der Starkniederschlagstage. Diese Zunahme liegt für die nahe Zukunft entsprechend dem Median bei +0,7 Tagen bei einer Spannweite der Modellergebnisse von einem Tag und

für die ferne Zukunft bei +0,9 Tagen bei einer Spannweite von 2 Tagen.

Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag mit nur mäßigen Streuungen im Ist-Zustand und des Klimasignals wird etwas besser als die Starkniederschlagshöhe bewertet.

Insgesamt ergibt sich aber auch die Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“.

Zusammen mit der beobachteten Anzahl der Starkniederschlagstage ergibt sich mit dem Median des Klimasignals für die nahe Zukunft eine Anzahl von 4,3 Starkniederschlagstagen im Jahr und für die ferne Zukunft 4,5 Tage.

- Bei der **Anzahl der Tage ohne Niederschlag** ergibt sich bei den Beobachtungsdaten eine Tagesanzahl von 227. Die Klimaprojektionen zeigen eine große Streuung mit einer Spannweite der Modellergebnisse von 64,7 Tagen. Im Mittel simulieren die Klimaprojektionen 34,4 Tage ohne Niederschlag weniger als die Beobachtungsdaten.

Das Klimasignal für die nahe Zukunft ist indifferent und im Mittel vernachlässigbar klein. Für die ferne Zukunft zeigt sich dagegen eine Zunahme der Tage ohne Niederschlag um +3,4 Tage bei einer jedoch sehr hohen Spannweite der Ergebnisse von 20,4 Tagen.

Angesichts der hohen Streuung ist lediglich eine qualitative Aussage der tendenziellen zukünftigen Abnahme von Trockentagen sinnvoll. Entsprechend werden die Simulationsergebnisse als nicht zufriedenstellend bewertet.

- Für die Kennzahl **Trockenperioden_{Vegetation}** ergibt sich eine mittlere Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit von 3,6 Tagen. Dieser Wert liegt am oberen Ende des Wertebereichs der Klimaprojektionen. Die Klimaprojektionen simulieren eine im Mittel um -0,5 Tage kürzere Vegetationsperiode als auf Basis der Beobachtungsdaten, bei einer Spannweite der Modellergebnisse von 0,7 Tagen. Der Wertebereich ist zwar klein, aufgrund der geringen absoluten Werte wird diese Kennzahl jedoch nur bedingt gut durch die Klimaprojektionen simuliert.

Die Simulationsergebnisse für die Zukunftsszenarien liefern eine geringe Zunahme der mittleren Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit von +0,2 Tagen für die nahe Zukunft und +0,8 Tagen für die ferne

Zukunft. Die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei 0,5 Tagen bzw. 1,2 Tagen.

Für diese Kennzahl ergeben sich durchwegs mittlere Bewertungen, sowohl für Streuungen als auch Stärke und Richtung des Klimasignals. Die Gesamtbewertung wird daher als „eingeschränkt zufriedenstellend“ bezeichnet.

Zusammen mit dem Beobachtungswert und dem Median ergibt sich für die nahe Zukunft eine mittlere Dauer von Trockenperioden von 3,8 Tagen (mit 85. Perzentil statt Median: 4,1 Tagen) und für die ferne Zukunft von 4,4 Tagen (mit 85. Perzentil statt Median: 4,9 Tagen).

- Die längste Dauer von Trockenperioden (**Trockenperioden_{maximal}**) liegt laut Beobachtungsdaten bei 20,7 Tagen. Dieser Wert wird von den Klimaprojektionen um mindestens einen Tag unterschritten. Im Mittel weichen die Klimaprojektionen um -3,7 Tage von den Beobachtungsdaten bei einer Spannweite der Modellergebnisse von 5,5 Tagen ab. Die Ergebnisse für das Klimasignal der maximalen Dauer von Trockenperioden wirken indifferent, da zwar der Mittelwert zunimmt, jedoch für die nahe Zukunft ähnlich wie für die ferne Zukunft.

Werden allerdings die Ergebnisse der einzelnen Klimaprojektionen für die nahe und ferne Zukunft verglichen, so zeigt sich die Zunahme der Dauer von Trockenperioden von der nahen zur fernen Zukunft für die meisten Klimaprojektionen.

Der Grund für die widersprüchlichen Ergebnisse ist die unterschiedliche Grundgesamtheit von Klimaprojektionen für die nahe und die ferne Zukunft, da nicht alle Klimaprojektionen Simulationsergebnisse für die ferne Zukunft liefern.

Im Mittel ergibt sich also zusammen mit den Beobachtungsdaten eine maximale Dauer von 21,5 bis 21,9 Tagen für die Zukunftsszenarien.

Vergleichbar mit der Kennzahl Trockenperioden_{Vegetation} wird die Simulation dieser Kennzahl als eingeschränkt zufriedenstellend bewertet.

Bei der folgenden Analyse der Ergebnisse für die **Globalstrahlung** ist zu berücksichtigen, dass die Globalstrahlung der Beobachtungsdaten und der WETTREG-Daten auf umgerechneten Sonnenscheindauern basiert. Diese Umrechnung birgt gewisse Unsicherheiten und zeigt häufig die Tendenz einer Unterschätzung der wirklichen Globalstrahlungswerte.

- Die **Summe der Globalstrahlung pro Jahr** liegt laut Beobachtungsdaten bei 1038 kWh/m². Die Modelldaten überschätzen diesen Wert im Mittel um +127,1 kWh/m². Die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei 260 kWh/m². Die Modellunsicherheit ist mäßig.

Das Klimasignal für die Zukunftsszenarien ist je nach Modell sehr unterschiedlich, wobei die Änderungen generell so klein sind, dass nicht von einer Tendenz gesprochen werden kann. Die zukünftige Globalstrahlungssumme pro Jahr ändert sich auf Basis dieser Ergebnisse kaum bei bedingt zufriedenstellenden Simulationsergebnissen.

- Die **Standardabweichung der Globalstrahlung** wird für die Beobachtungsdaten auf 80,4 W/m² berechnet. Für die Modelldaten ergibt sich im Mittel eine um +11,1 W/m² höhere Standardabweichung. Die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei 26,6 W/m². Hinsichtlich der Schwankungsbreite der Globalstrahlung zeigen die Klimaprojektionen demnach deutliche Unterschiede.

Die Schwankungen der Globalstrahlung nehmen tendenziell zur Zukunft hin zu. Für die nahe Zukunft ergibt sich ein Wert von +1,7 W/m² bei einer Spannweite der Modellergebnisse von 3,8 und für die ferne Zukunft steigt die Standardabweichung im Mittel um 3,7 W/m² bei einer Spannweite der Modellergebnisse von 6,5 W/m².

- Für die **minimale mittlere Globalstrahlung** zeigen die Ergebnisse der Klimaprojektionen für den Ist-Zustand Werte nahe 0 W/m². Bei der Umrechnung der gemessenen Sonnenscheindauer in Globalstrahlung können aufgrund der verwendeten Gleichung nur minimale Werte > 20 W/m² resultieren. Dadurch liegen die Beobachtungswerte deutlich höher als die Werte der Klimaprojektionen. Aufgrund des Fehlens von direkten Messwerten der Globalstrahlung ist die Vergleichbarkeit von Modell- und Beobachtungsdaten kaum zuläs-

sig und die Simulationsergebnisse nicht zufriedenstellend. Es zeigt sich kein eindeutiges Klimasignal für die Zukunftsszenarien.

- Bei der **maximalen mittleren Globalstrahlung** zeigen sich erneut Überschätzungen der Beobachtungsdaten (315 W/m^2) durch die Klimaprojektionen im Mittel um $+30 \text{ W/m}^2$. Die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei 132 W/m^2 .

Das Klimasignal für die maximale mittlere Globalstrahlung ist indifferent und zudem sehr klein. Es kann den Ergebnissen zufolge davon ausgegangen werden, dass sich die maximale mittlere Globalstrahlung nicht nennenswert ändert. Aus den hohen Streuungen und dem indifferenten Klimasignal folgt eine nicht zufriedenstellende Gesamtbewertung.

Für den Parameter Windgeschwindigkeit liegen die Beobachtungs- und WETTREG-Daten nicht in der für den direkten Vergleich mit den Werten der Klimaprojektionen erforderlichen Einheit vor (Beaufort statt m/s). Die durchgeführte Umrechnung von Beaufort in m/s ist mit Unsicherheiten verbunden.

Daher sind die Beobachtungsdaten der Windgeschwindigkeit vergleichbar wie die Beobachtungsdaten der Globalstrahlung nicht sehr zuverlässig.

- Die **mittlere Windgeschwindigkeit** auf Basis der Beobachtungsdaten liegt bei 2 m/s . Die Klimaprojektionen zeigen um $+1,3 \text{ m/s}$ höhere Windgeschwindigkeiten im Mittel an als die Beobachtungsdaten. Die Spannweite der Modellergebnisse liegt bei $1,2 \text{ m/s}$. Die Streuungen sind angesichts der absoluten Werte groß.

Die mittleren Windgeschwindigkeiten zeigen keinerlei Klimasignal in den Zukunftsszenarien. Dies gilt auch für die einzelnen Klimaprojektionen. So kann gefolgert werden, dass sich die mittlere Windgeschwindigkeit zur Zukunft hin nicht ändert.

Trotz der hohen Streuungen der Modellergebnisse im Ist-Zustand wird die Simulation dieser Kennzahl aufgrund sehr geringer Streuung des Klimasignals als zufriedenstellend bewertet.

- Bei der **Standardabweichung der Windgeschwindigkeit** zeigen sich ebenfalls höhere Standardabweichungen auf Seiten der Klimaprojektionen gegenüber der Messung ($1,5 \text{ m/s}$ gegenüber $1,2 \text{ m/s}$). Die Unter-

schiede können jedoch zumindest teilweise mit den größeren absoluten Werten erklärt werden.

Auch die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit ändert sich für die Zukunftsszenarien nicht. Ähnlich der mittleren Windgeschwindigkeit wird auch deren Standardabweichung als zufriedenstellend bewertet.

- Die **maximale mittlere Windgeschwindigkeit** der Beobachtungsdaten ($8,7 \text{ m/s}$) stimmt sehr gut mit dem Median der Klimaprojektionen überein ($8,8 \text{ m/s}$). Die Spannweite der Modellergebnisse mit $1,2 \text{ m/s}$ zeigt damit eher kleine Unsicherheiten.

Zur Zukunft hin zeigen sich kaum Änderungen der mittleren maximalen Windgeschwindigkeit. Damit kann lediglich festgestellt werden, dass kaum Änderungen der maximalen Windgeschwindigkeit für die Zukunftsszenarien simuliert wurden.

Bei der maximalen mittleren Windgeschwindigkeit sind die Abweichungen der Klimaprojektionen etwas größer als bei der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit, wodurch die Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“ folgt.

- Die Anzahl der **Tage $>8 \text{ m/s}$ Windgeschwindigkeit** liegt laut Beobachtungsdaten im Mittel bei $1,7$ Tagen. Bei den Klimaprojektionen ergibt sich im Mittel eine um $1,2$ Tage höhere Tagesanzahl. Aus einer Spannweite der Modellergebnisse von $4,7$ Tagen durch die Modellsimulationen folgt eine hohe Streuung bei dieser Kennzahl.

Für die Zukunftsszenarien wird eine Zunahme der Tage mit einer Windgeschwindigkeit über 8 m/s simuliert. Im Mittel ergibt sich für die nahe Zukunft eine Zunahme von $+0,5$ Tagen und für die ferne Zukunft eine Zunahme von $+0,4$ Tagen bei einer Spannweite der Modellergebnisse von $1,3$ Tagen bzw. $1,7$ Tagen.

Auf Grund der hohen Streuungen verbunden mit dem indifferenten Klimasignal folgt die Bewertung „nicht zufriedenstellend“.

Wenn das Klimasignal der Klimaprojektionen mit dem Beobachtungswert kombiniert wird, erhöht sich die Anzahl der Tage mit einer Windgeschwindigkeit über 8 m/s auf $2,2$ Tage pro Jahr (nahe Zukunft) und $2,1$ Tage (ferne Zukunft).

Fazit und Ausblick

Die vorliegende Analyse stellt einen umfangreichen Überblick über mögliche zukünftige Entwicklungen der aus den vier Klimaparametern Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit abgeleiteten 28 Kennzahlen in Baden-Württemberg dar. Die Basis der Auswertungen bildet die Ensembleanalyse von 29 Klimaprojektionen bzw. von daraus näher betrachteten 24 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft und für die ferne Zukunft. Es sind keine Arbeiten bezogen auf die Landesfläche von Baden-Württemberg bekannt, die ähnlich umfangreiche Analysen aufweisen.

Die Ergebnisse der Untersuchung von 29 Klimaprojektionen für die nahe und ferne Zukunft untermauern die Besorgnis über den Klimawandel und die Notwendigkeit, sich mit dem Thema Klimawandel und seinen Folgen in Baden-Württemberg in vielen gesellschaftlichen Bereichen intensiv zu beschäftigen. Es wird auch deutlich gemacht, dass mit Klimamodellen und Szenarien grundsätzlich kein Blick in die Zukunft geworfen werden kann. Vielmehr trägt diese Vergleichsuntersuchung zur Plausibilisierung und Abschätzung der Bandbreite einer möglichen Entwicklung bei und zeigt deren Unsicherheiten auf.

Durch die Auswertungen der verschiedenen Klimaprojektionen ist es möglich, Verteilungsfunktionen von Änderungssignalen und somit Perzentile aus dem Klimaprojektionsensemble zu ermitteln. Die Verwendung von Perzentilen hat den Vorteil, eine Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen aufzuzeigen und damit sowohl quantitative als auch qualitative Aussagen treffen zu können. Zudem besteht so die Möglichkeit, je nach angestrebtem Ziel eher das 15., das 50. oder das 85. Perzentil zu verwenden.

Mit den Auswertungen zu 28 Kennzahlen für das Klima und abgeleiteter Größen werden dabei für zahlreiche Handlungsfelder Grundlagen bereitgestellt, mit denen die Erstellung von Vulnerabilitätsanalysen und die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen für Baden-Württemberg unterstützt wird. Dabei wird insbesondere die Möglichkeit gegeben, durch die Formulierung „klimatischer Leitplanken“ bzw. klimatischer Rahmenbedingungen einer zukünftigen Entwicklung strategische Entscheidungen z.B.

für die Nutzung von Anpassungsoptionen oder die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen zu treffen. Mit den flächenhaft dargestellten Daten ist dabei aber auch eine detailliertere räumliche Betrachtung der zu erwartenden Änderungen in den Naturräumen Baden-Württembergs möglich.

Die vorliegenden Auswertungen stellen nur einen Ausschnitt der möglichen Auswertungen dar, die an Hand des umfangreichen Datenmaterials des Klimaprojektionsensembles nun umgesetzt werden können. Ergänzend zu den bisher untersuchten 28 Kennzahlen können zahlreiche andere Kennzahlen (z.B. Wachstumsgradtage, Tage mit Wechselfrost, Schwankung der Lufttemperatur,...) analysiert werden.

Mit den vorliegenden Werkzeugen können weitergehende Auswertungen entsprechend den Anforderungen der Nutzer zur Ermittlung von Anpassungsstrategien effizient umgesetzt werden.

Auch die Bereitstellung von Zeitreihen mit Tageswerten für die weitere Verwendung in Wirkmodellen ist möglich.

Zudem bildet in dieser Auswertung die Betrachtung des Flächenmittelwerts über Baden-Württemberg den Schwerpunkt der Analyse. Die vorliegenden, flächenhaften Darstellungen erlauben aber auch eine detailliertere räumliche Untersuchung der zu erwartenden Änderungen in den Regionen innerhalb Baden-Württembergs.

7 Verzeichnis der Anlagen²⁰

- Anlage A: Übersicht über die ausgewählten Klimaprojektionen
- Anlage A-01: Übersicht über die 29 ausgewählten regionalen Klimaprojektionen mit Quellenangabe
- Anlage A-02: Übersicht über die 29 ausgewählten regionalen Klimaprojektionen mit Auflösung und Namenskürzel
- Anlage A-03: Übersicht über die 29 ausgewählten regionalen Klimaprojektionen mit Verfügbarkeit und Anwendung für das Auswerte-Ensemble und für das reduzierte Auswerte-Ensemble
- Anlage B: Auswahl des Auswerte-Ensembles anhand der Beobachtungsdaten und der Modelldaten des Ist-Zustands von 29 Klimaprojektionen
- Anlage B-01: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Jahresmitteltemperatur“ für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-02: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Niederschlagssumme im Jahr“ für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-03: Ausgewählte Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-04: Ausgewählte Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-05: Ausgewählte Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-06: Ausgewählte Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage C: Punktdiagramme der Beobachtungsdaten und der Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen
- Anlage C-01: Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage C-02: Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)

²⁰ die nachfolgend aufgeführten Anlagen sind in einer gesonderten Publikation veröffentlicht

- Anlage C-03: Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage C-04: Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage D: Säulendiagramme für die Abweichungen der Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen von den Beobachtungsdaten
- Anlage D-01: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg
- Anlage D-02: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg
- Anlage D-03: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg
- Anlage D-04: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg
- Anlage E: Flächendifferenzierte Darstellung ausgewählter Kennzahlen für die Beobachtungsdaten und für Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen
- Anlage E-01: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Jahresmitteltemperatur“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage E-02: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Frosttag“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage E-03: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Sommertag“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage E-04: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Niederschlagssumme im Jahr“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage E-05: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Summe der Globalstrahlung/Jahr“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage E-06: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „mittlere Windgeschwindigkeit“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage F: Box-Whisker-Diagramme für die Modelldaten der 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und der 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)

- Anlage F-01: Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage F-02: Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage F-03: Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage F-04: Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage G: Säulendiagramme für die Abweichungen der Modelldaten der Zukunftsszenarien von den Modelldaten des Ist-Zustands
- Anlage G-01: Klimasignal der Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage G-02: Klimasignal der Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und für die 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage G-03: Klimasignal der Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und für die 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage G-04: Klimasignal der Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage H: Jahresscharfe Darstellung der Kennzahlen anhand der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft sowie anhand der 15 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft
- Anlage H-01: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen der Temperatur auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)
- Anlage H-02: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen des Niederschlags auf Basis auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)

- Anlage H-03: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen der Globalstrahlung auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)
- Anlage H-04: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen des Windes auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)
- Anlage I: Perzentildarstellungen der Modelldaten der Klimaprojektionen in 25x25-km²-Auflösung sowie in 7x7-km²-Auflösung für die Zukunftsszenarien
- Anlage I-01: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Temperatur auf Basis von 20 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und von 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)
- Anlage I-02: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen des Niederschlags auf Basis von 20 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und von 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)
- Anlage I-03: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Globalstrahlung auf Basis von 20 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und von 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)
- Anlage I-04: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit auf Basis von 20 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und von 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)
- Anlage I-05: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Temperatur auf Basis von 4 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)
- Anlage I-06: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen des Niederschlags auf Basis von 4 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)
- Anlage I-07: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Globalstrahlung auf Basis auf Basis von 4 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)
- Anlage I-08: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit auf Basis von 4 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)
- Anlage J: Tabellenwerte der Kennzahlen für die Beobachtungsdaten, für den Ist-Zustand sowie für die nahe und ferne Zukunft
- Anlage J-01: Übersicht über die Kennzahlen der Temperatur für die Beobachtungsdaten und für die Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen

- Anlage J-02: Übersicht über die Kennzahlen der Temperatur für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (oben) und für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)
- Anlage J-03: Übersicht über die Kennzahlen des Niederschlags für die Beobachtungsdaten und für die Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen
- Anlage J-04: Übersicht über die Kennzahlen des Niederschlags für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (oben) und für die 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)
- Anlage J-05: Übersicht über die Kennzahlen der Globalstrahlung für die 24 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (links oben) und der nahen Zukunft (rechts oben) sowie für die 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)
- Anlage J-06: Übersicht über die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit für die 24 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (links oben) und der nahen Zukunft (rechts oben) sowie für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)

Anlage A-01: Übersicht über die 29 ausgewählten regionalen Klimaprojektionen mit Quellenangabe

SRES-Szenario	GCM	RCM	Modellreferenz	Förderung	Quelle	
A1B	HadCM3Q0	CLM 2.4.6	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Schweiz	1	2
		HadRM3Q0	Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Großbritannien	1	2
A1B	HadCM3Q16	HadRM3Q16	Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Großbritannien	1	2
		C4IRCA3	Community Climate Change Consortium for Ireland	Nordirland	1	2
A1B	HadCM3Q3	HadRM3Q3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Großbritannien	1	2
		SMHIRCA	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	Schweden	1	2
A1B	BCM	SMHIRCA	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	Schweden	1	2
		HIRHAM5	Danmarks Meteorologiske Institut	Dänemark	1	2
A1B	ARPEGE	HIRHAM5	Danmarks Meteorologiske Institut	Dänemark	1	2
		RM5.1	Meteo France	Frankreich	1	2
A1B	ECHAM5-r3	SMHIRCA	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	Schweden	1	2
		REGCM3	International Centre for Theoretical Physics	Italien	1	2
		RACMO2.1	Koninklijk Neder-lands Meteorologisch Instituut	Niederlande	1	2
		REMO 5.7	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Deutschland	1	2
		HIRHAM5	Danmarks Meteorologiske Institut	Dänemark	1	2
A1B	ECHAM5-r3	CCLM-4.8 ls	KIT-IMK	Deutschland	LUBW	3
A1B	ECHAM5-r2	CCLM-4.8 ls	KIT-IMK	Deutschland	LUBW	3
		CLM 2.4.11	Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung	Deutschland	BfG	4
A1B	ECHAM5-r1	REMO 2005	5	Deutschland	UBA	6
		CLM 2.4.11	7	Deutschland	BMBF	4
		WETTREG2006	8	Deutschland	UBA	9
		WETTREG2010	10	Deutschland	UBA	11
A1B	CGCM3	CCLM-4.8 ls	KIT-IMK	Deutschland	LUBW	12
B2	ECHAM4	WETTREG2003	13	Deutschland	LUBW	12

¹ The ENSEMBLES data used in this work was funded by European Commission's 6th Framework Programme Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539) whose support is gratefully acknowledged

² <http://ensembles-eu.metoffice.com/>

³ Schädler G., Berg, P., Dütthmann D., Feldmann H., Ihringer J., Kunstmann H., Liebert J., Merz B., Ott I. & Wagner S. (2012): Flood Hazards in a Changing Climate. Project Report. 83 pp. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM), Karlsruhe; http://www.cedim.de/download/Flood_Hazards_in_a_Changing_Climate.pdf

⁴ Keuler K.; Lautenschlager M., Wunram C., Keup-Thiel E., Schubert M., Will A., Rockel B. & Boehm U. (2009): 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. http://dx.doi.org/DOI:10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D2

⁵ Jacob D., Göttel H., Kotlarski S., Lorenz P. & Sieck K. (2008): Klimaauwirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. (Climate impact and adaptation in Germany - Phase 1: Compilation of regional climate scenarios for Germany). Tech. Rep. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138, 11, 154 pp, UBA-Reihe Climate Change, Dessau.

⁶ Jacob D. (2005a): REMO A1B scenario run, UBA project, 0.088 degree resolution, run no. 006211, 1h data. World Data Center for Climate. CERA-DB 'REMO UBA A1B 1 R0062111H'. Jacob D. (2005b): REMO climate of the 20th century run, UBA project, 0.088 degree resolution run no. 006210, 1h data. CERA-DB 'REMO UBA C20 1 R006210 1H'.

⁷ Hollweg H.-D., Fast I., Henne-muth B., Keuler K., Keup-Thiel E., Lautenschlager M., Legutke S., Radtke K., Rockel B., Schubert M., Will A., Woldt M. & Wunram C. (2008): Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 global scenarios. Tech. Rep. No. 3, Model and Data group at the Max-Planck Institut for Meteorology, Hamburg. ISSN printed: 1619-2249, ISSN electronic: 1619-2257.

⁸ Enke W., Deutschländer T., Schneider F. & Kuchler W. (2005): Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. Meteorol. Zeitschrift, 14, 247-257

⁹ Kreienkamp F. & Enke W. (2006): WETTREG 20C control run 1961-2000 und WETTREG A1B scenario run 2001-2100, UBA Project. CERA-Datenbank: <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=WETTREG-UBA>

¹⁰ Spekat A., Kreienkamp F. & Enke W. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarios B1, A1B und A2

¹¹ CERA-Datenbank: <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=WETTREG2010>

¹² Schädler G., Berg, P., Dütthmann D., Feldmann H., Ihringer J., Kunstmann H., Liebert J., Merz B., Ott I. & Wagner S. (2012): Flood Hazards in a Changing Climate. Project Report. 83 pp. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM), Karlsruhe; http://www.cedim.de/download/Flood_Hazards_in_a_Changing_Climate.pdf

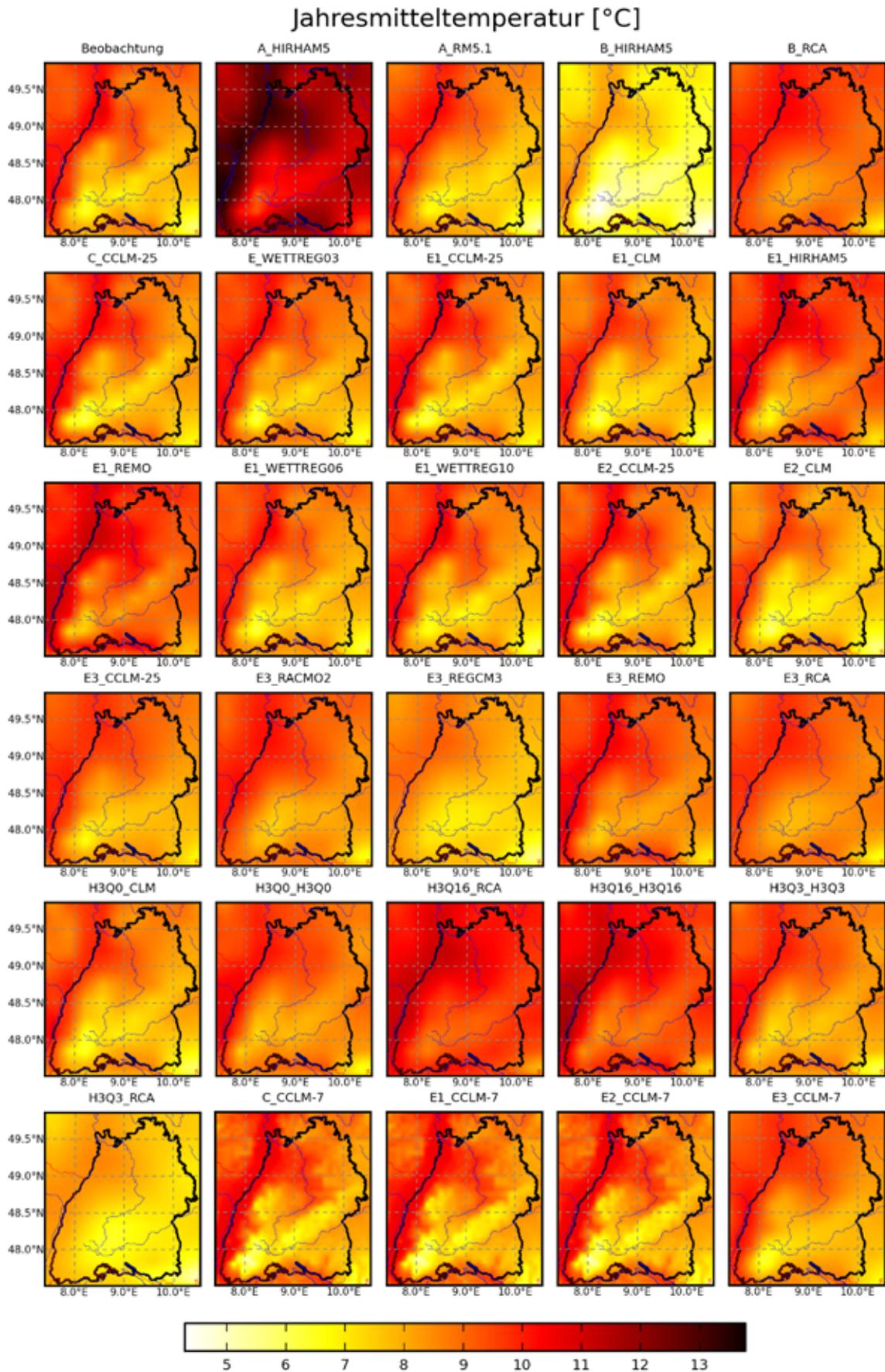
¹³ Enke W. (2003): Abschlussbericht – Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM 4 Klimasimulationslaufs (Szenario B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. Meteo-Research, Berlin, im Auftrag des Arbeitskreis KLWA, unveröffentlicht.

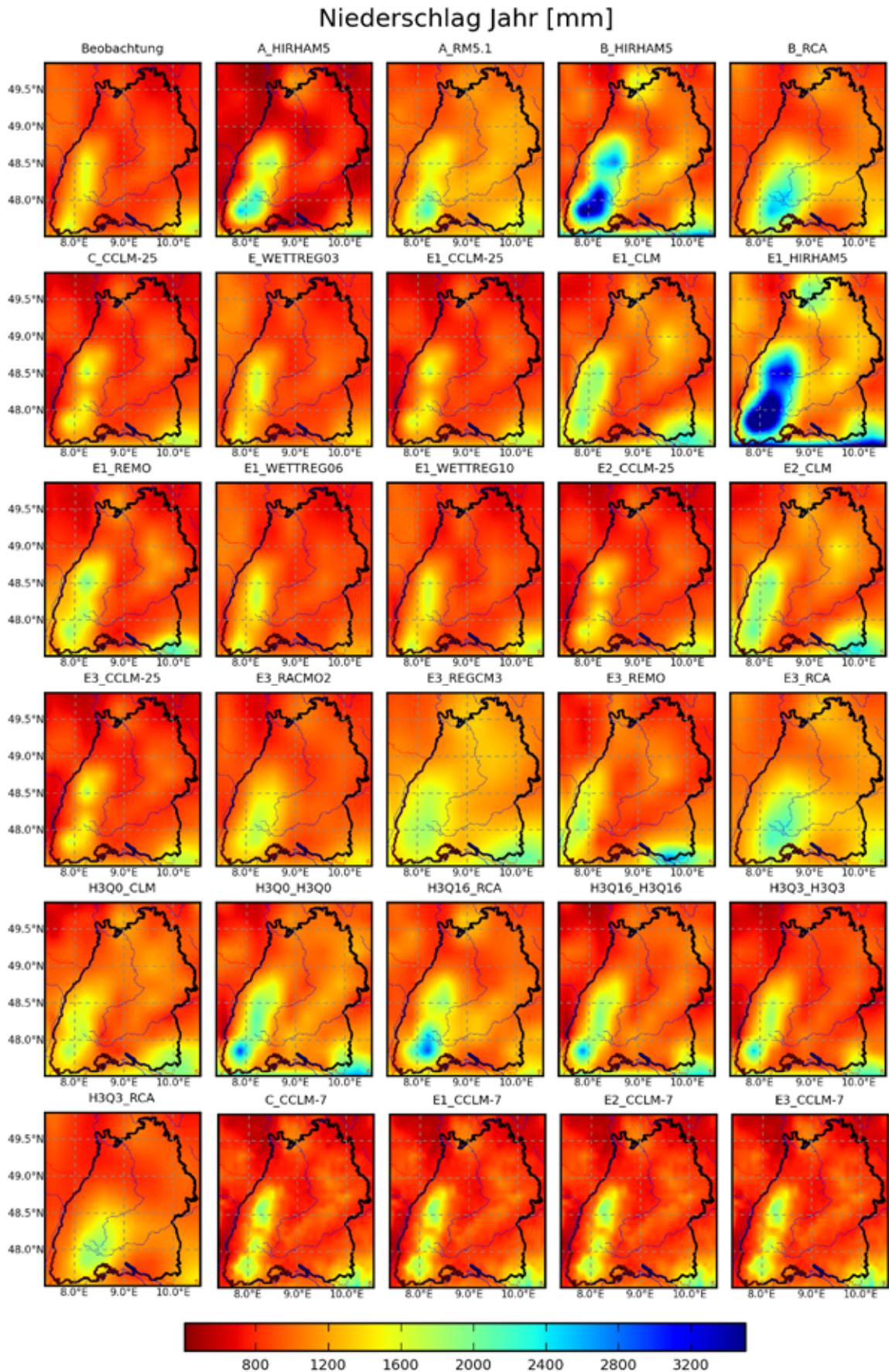
Anlage A-02: Übersicht über die 29 ausgewählten regionalen Klimaprojektionen mit Auflösung und Namenskürzel

SRES-Szenario	GCM	RCM	Original-Auflösung	Ausgewertete Auflösung	Kürzel
A1B	HadCM3Q0	CLM 2.4.6	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q0_CLM
		HadRM3Q0	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q0_H3Q0
A1B	HadCM3Q16	HadRM3Q16	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q16_H3Q16
		C4IRCA3	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q16_RCA
A1B	HadCM3Q3	HadRM3Q3	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q3_H3Q3
		SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q3_RCA
A1B	BCM	SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	B_RCA
		HIRHAM5	25x25 km ²	25x25 km ²	B_HIRHAM5
A1B	ARPEGE	HIRHAM5	25x25 km ²	25x25 km ²	A_HIRHAM5
		RM5.1	25x25 km ²	25x25 km ²	A_RM5.1
A1B	ECHAM5-r3	SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_RCA
		REGCM3	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_REGCM3
		RACMO2.1	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_RACMO2
		REMO 5.7	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_REMO
		HIRHAM5	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_HIRHAM5
		CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	25x25 km ²	E3_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	7x 7 km ²	E3_CCLM-7
A1B	ECHAM5-r2	CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	25x25 km ²	E2_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	7x7 km ²	E2_CCLM-7
		CLM 2.4.11	20x20 km ²	25x25 km ²	E2_CLM
A1B	ECHAM5-r1	CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	25x25 km ²	E1_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	7x7 km ²	E1_CCLM-7
		REMO 2005	10x10 km ²	25x25 km ²	E1_REMO
		CLM 2.4.11	20x20 km ²	25x25 km ²	E1_CLM
		WETTREG2006	Stationen	25x25 km ²	E1_WETTREG06
		WETTREG2010	Stationen	25x25 km ²	E1_WETTREG10
A1B	CGCM3	CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	25x25 km ²	C_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls	7x7 km ²	7x7 km ²	C_CCLM-7
B2	ECHAM4	WETTREG2003	Stationen	25x25 km ²	E_WETTREG03

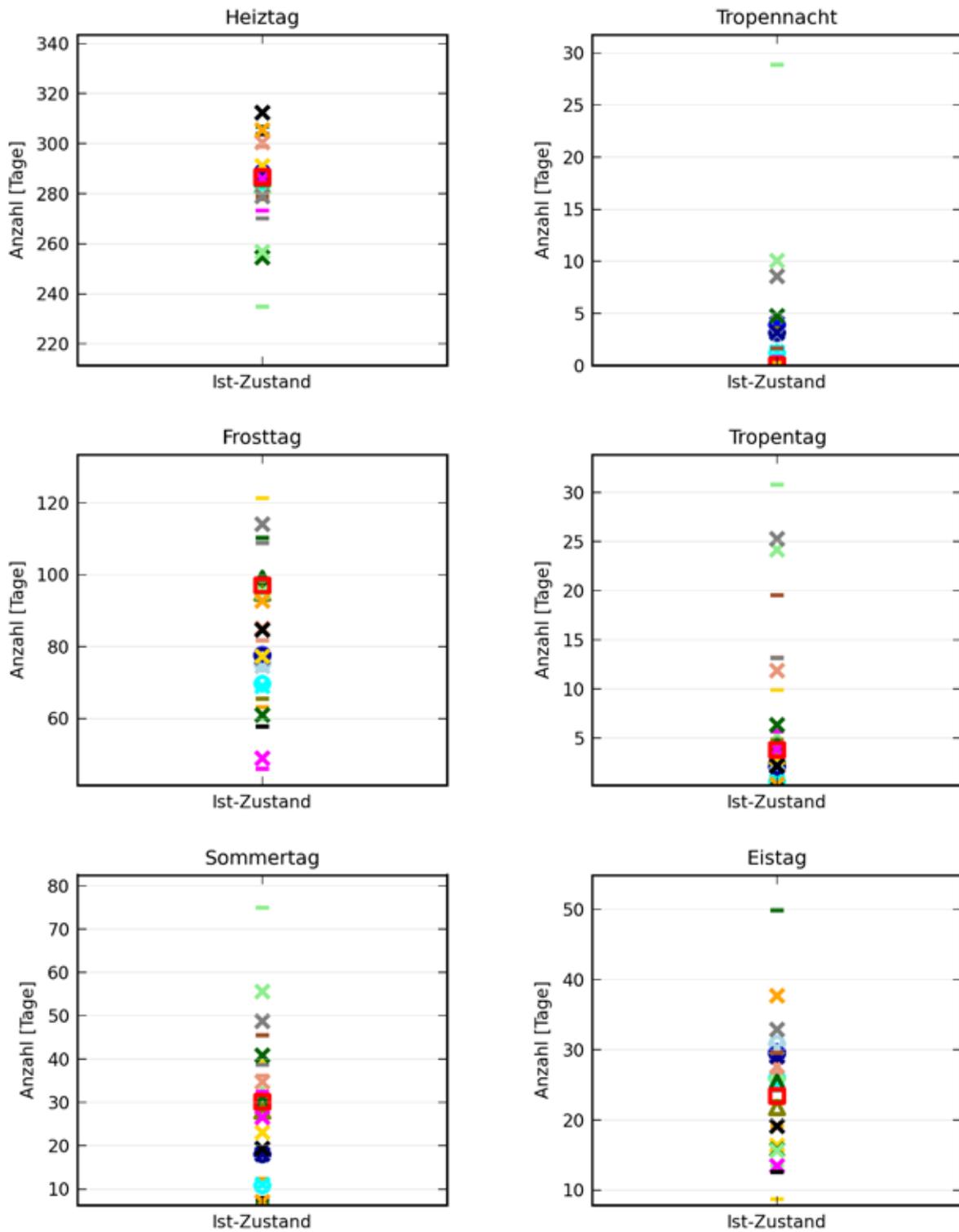
Anlage A-03: Übersicht über die 29 ausgewählten regionalen Klimaprojektionen mit Verfügbarkeit und Anwendung für das Auswerte-Ensemble und für das reduzierte Auswerte-Ensemble

SRES-Szenario	GCM	Auswerte-Ensemble			Reduziertes Ensemble		
		Ist-Zustand	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft	Ist- Zustand	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
HadCM3Q0	CLM 2.4.6	x	x	x	x	x	x
	HadRM3Q0	x	x	x	-	-	-
HadCM3Q16	HadRM3Q16	-	-	-	-	-	-
	C4IRCA3	-	-	-	-	-	-
HadCM3Q3	HadRM3Q3	x	x	x	-	-	-
	SMHIRCA	x	x	x	-	-	-
BCM	SMHIRCA	x	x	x	-	-	-
	HIRHAM5	-	-	-	-	-	-
ARPEGE	HIRHAM5	-	-	-	-	-	-
	RM5.1	x	x	x	x	x	x
ECHAM5-r3	SMHIRCA	x	x	x	-	-	-
	REGCM3	x	x	x	-	-	-
	RACMO2.1	x	x	x	x	x	x
	REMO 5.7	x	x	x	x	x	x
	HIRHAM5	-	-	-	-	-	-
	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
ECHAM5-r2	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
	CLM 2.4.11	x**	x**	x**	x**	x**	x**
ECHAM5-r1	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
	REMO 2005	x	x	x*	x	x	-
	CLM 2.4.11	x**	x**	x**	x**	x**	x**
	WETTREG2006	x	x	x	x	x	x
	WETTREG2010	x	x	x	x	x	x
CGCM3	CCLM-4.8 Is#	x	x	-	x	x	-
	CCLM-4.8 Is##	x	x	-	x	x	-
ECHAM4	WETTREG2003	x	x	-	x	x	-
ANZAHL		24	24	15	18	18	8
#	Auflösung 25x25 km ²						
##	Auflösung 7x7 km ²						
*	Für den Parameter Niederschlag liegen keine Daten vor						
**	Für den Parameter Globalstrahlung liegen keine Daten vor						

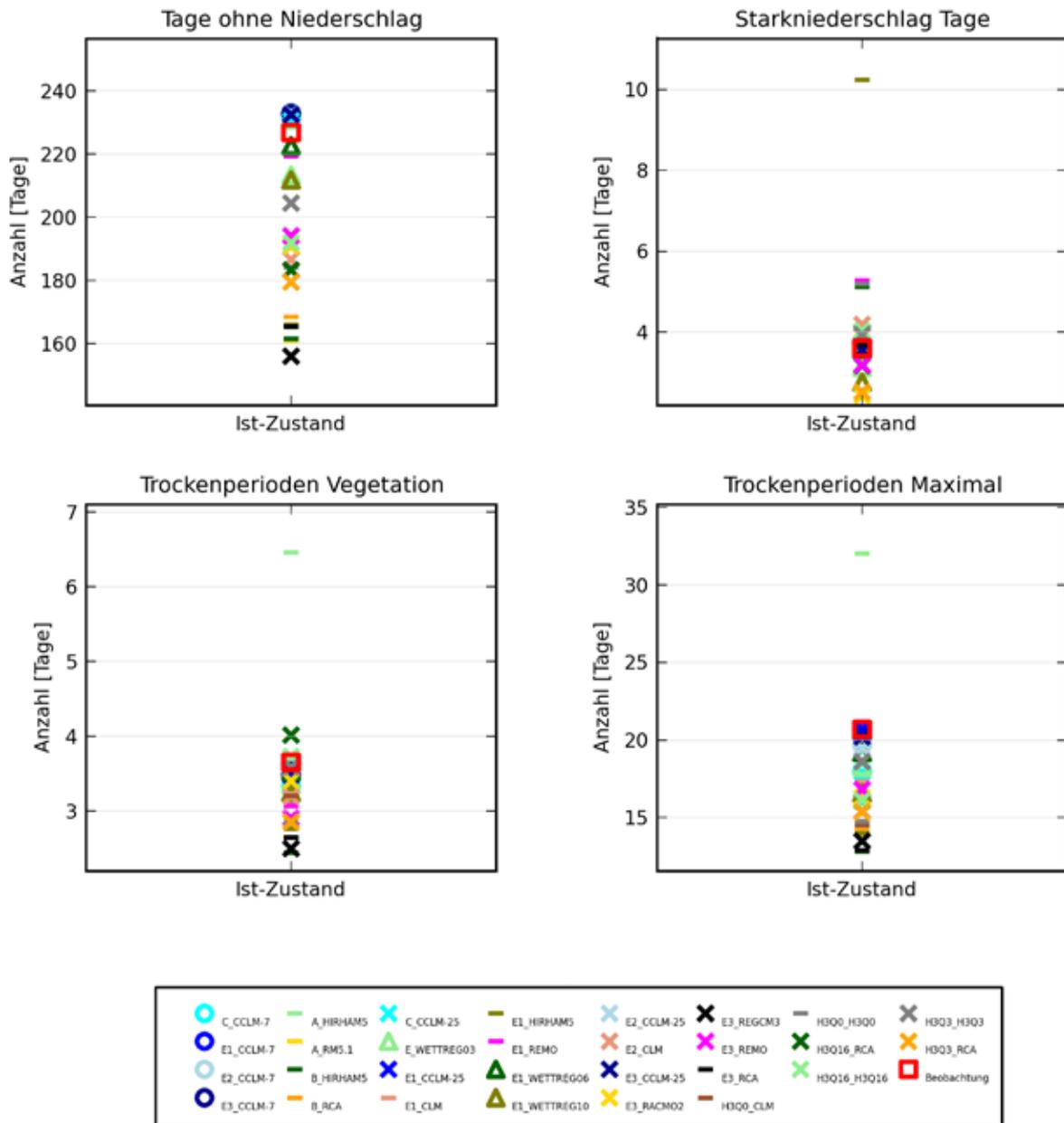




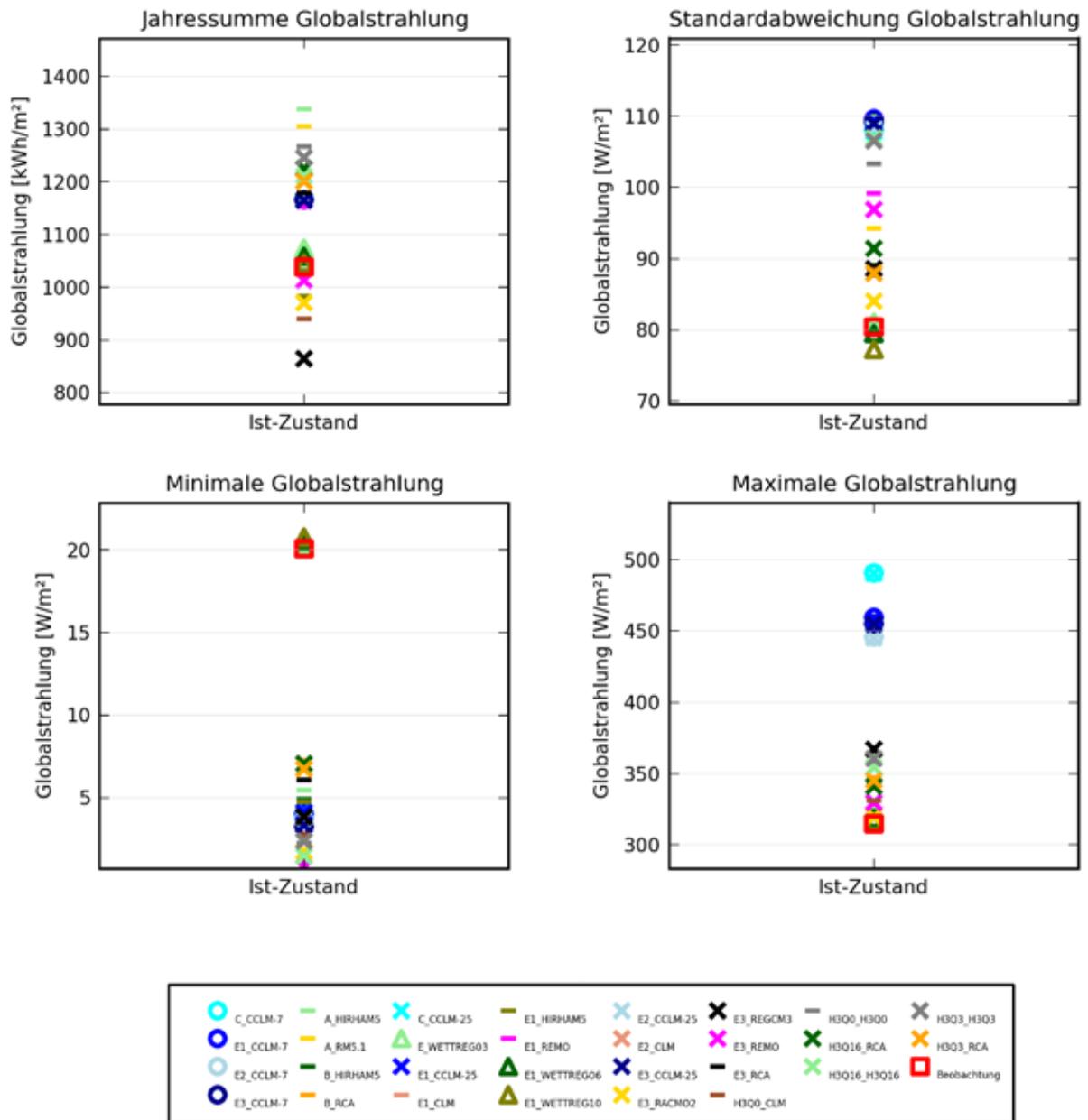
Anlage B-03: Ausgewählte Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



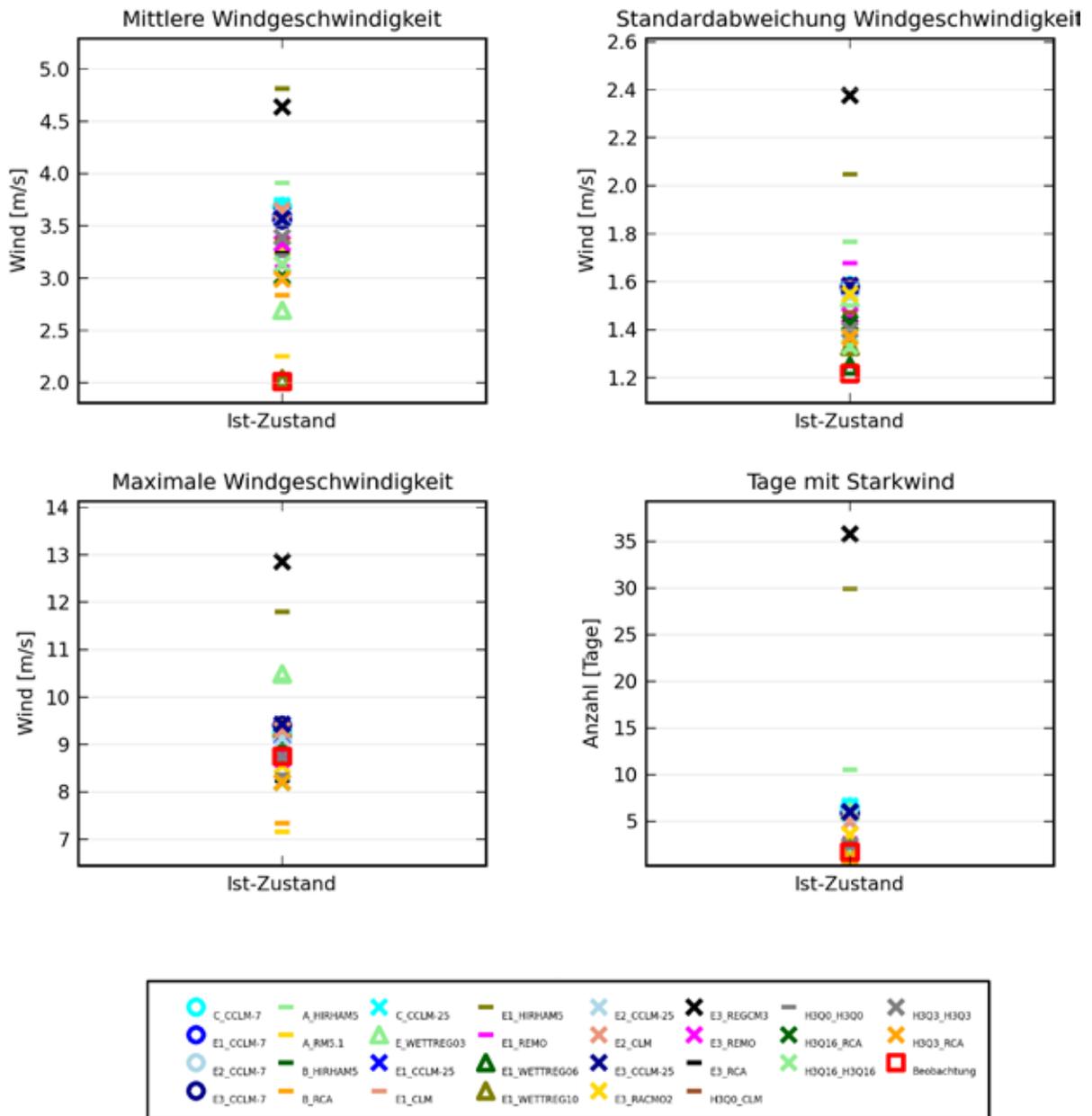
Anlage B-04: Ausgewählte Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



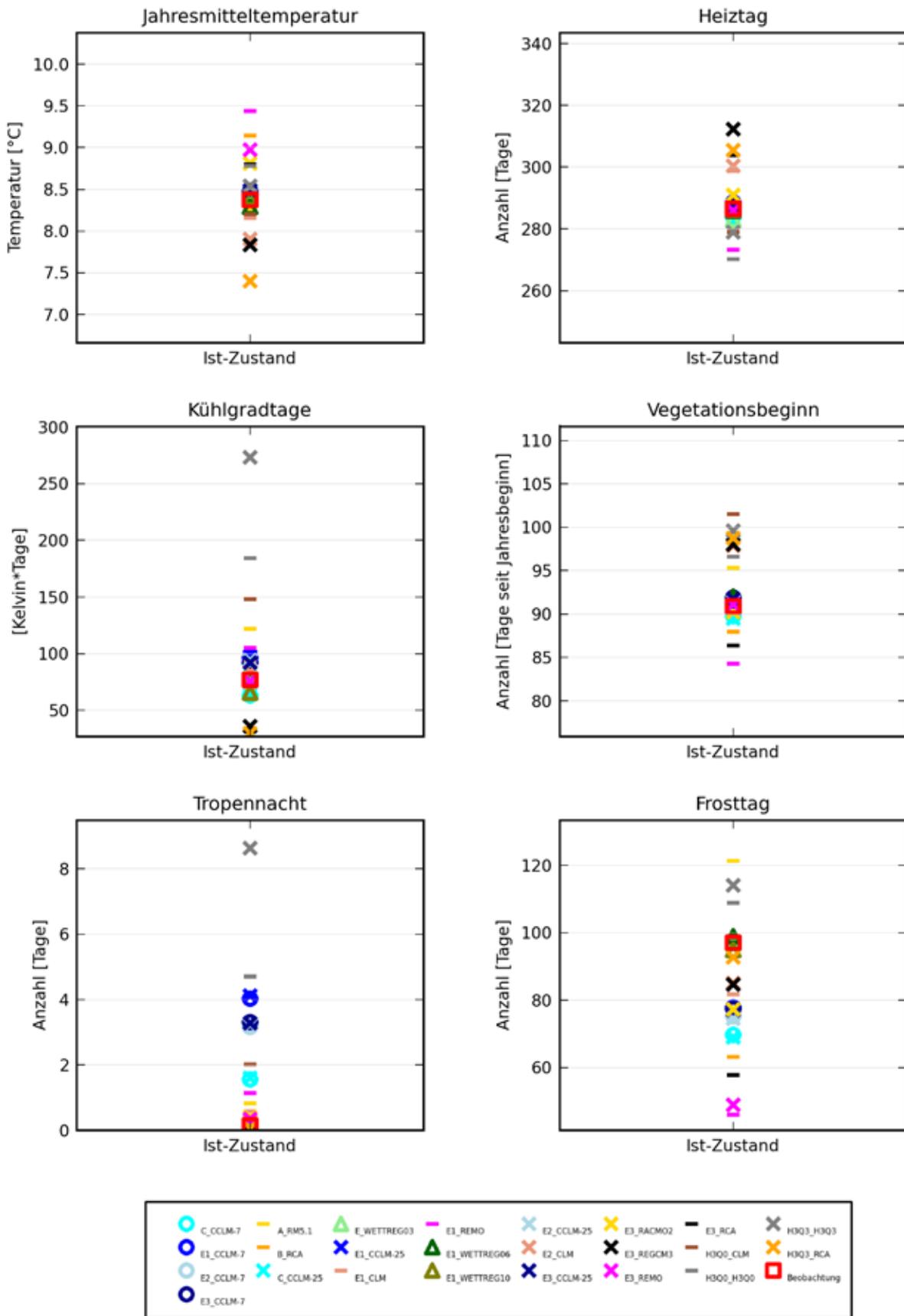
Anlage B-05: Ausgewählte Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



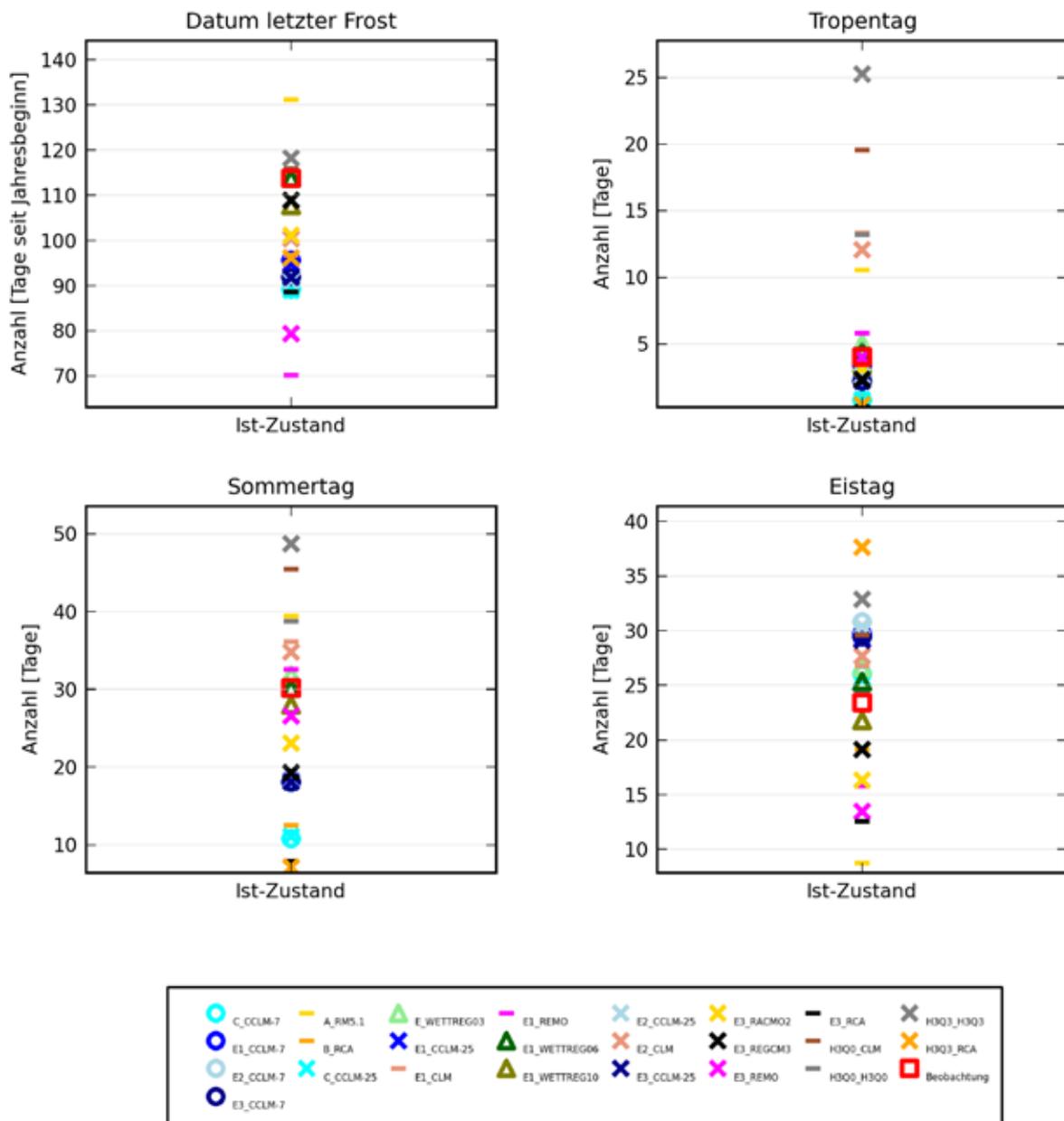
Anlage B-06: Ausgewählte Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 29 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



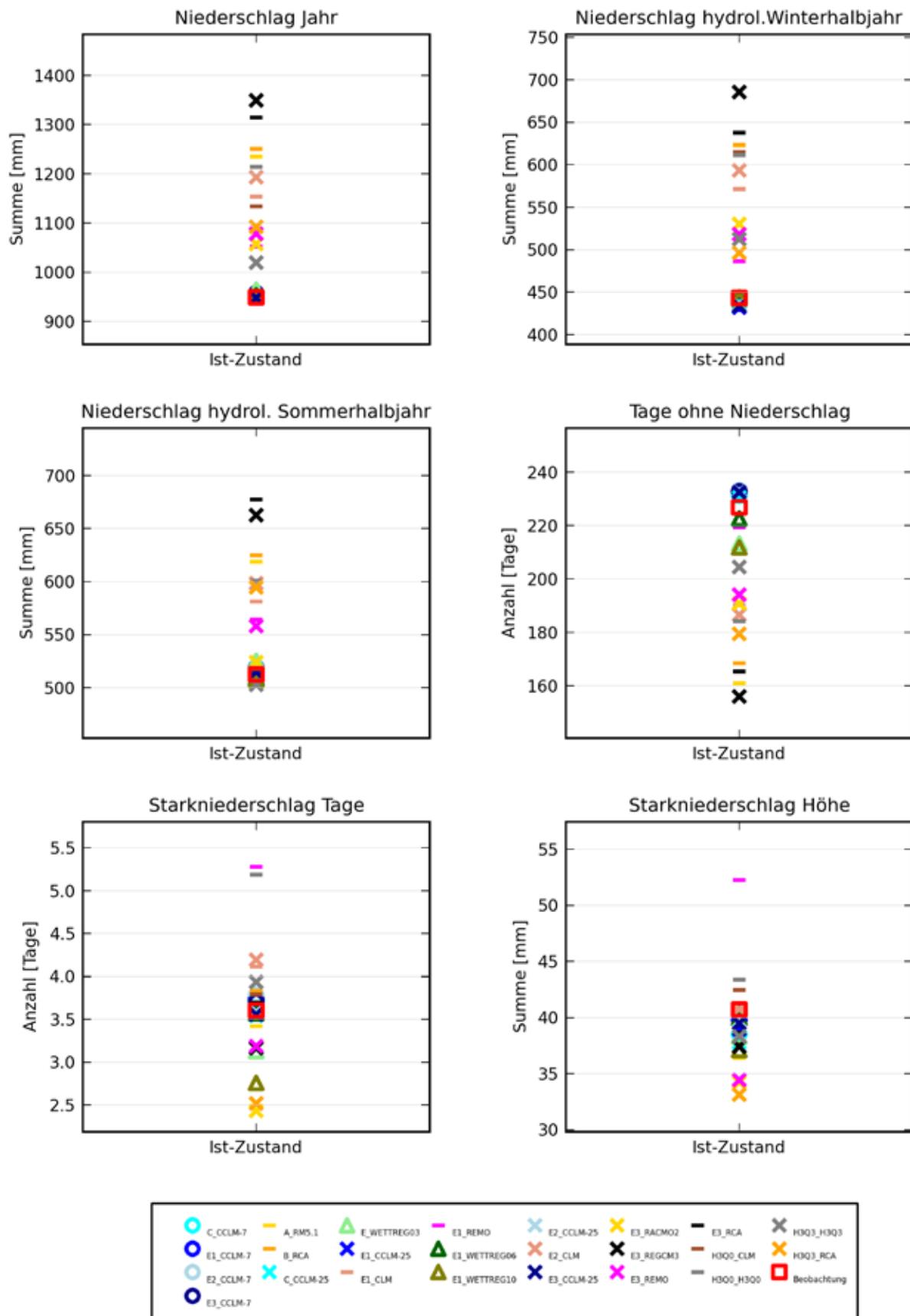
Anlage C-01: Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klima-
projektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



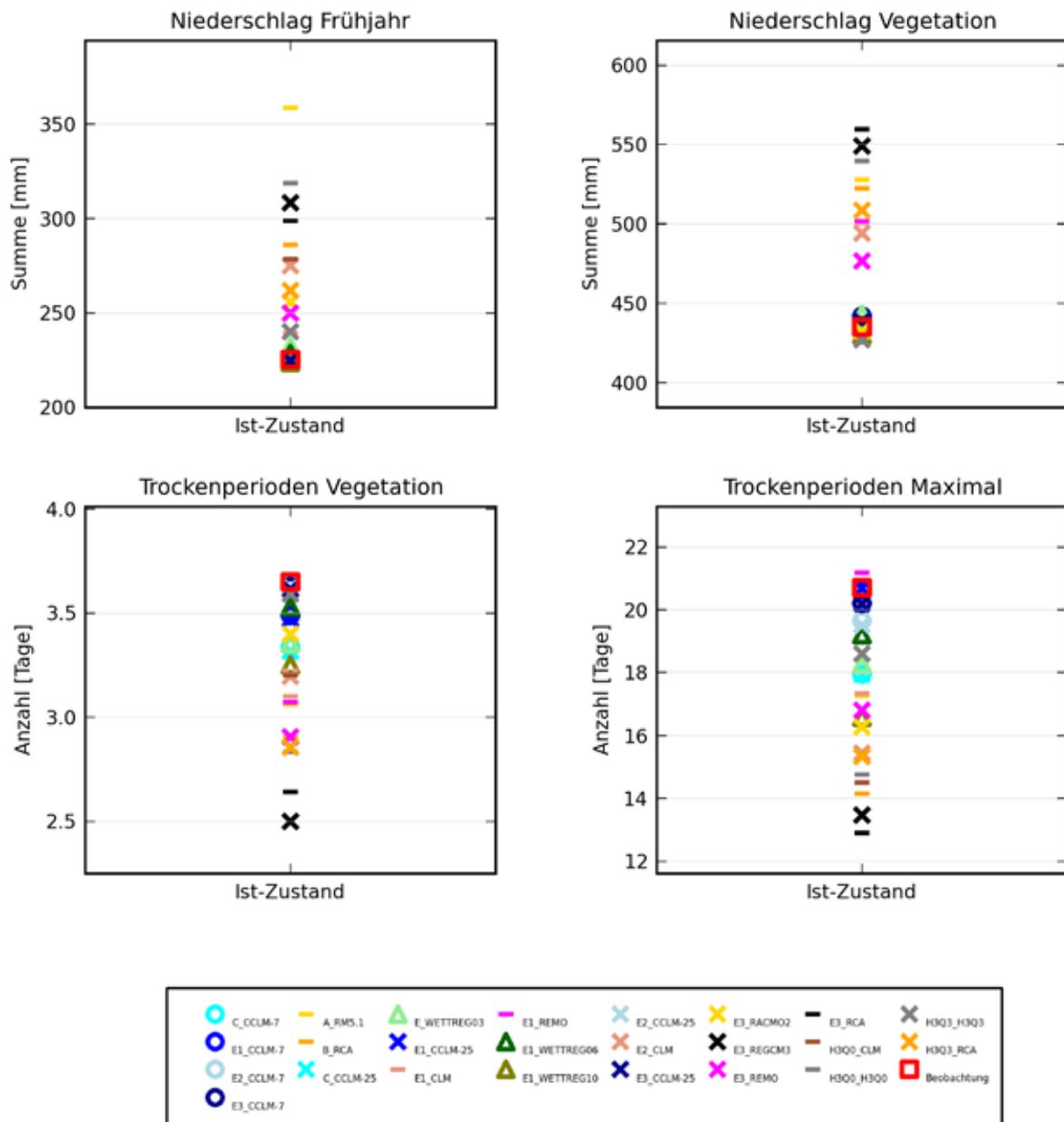
Anlage C-01: Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klima-projektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



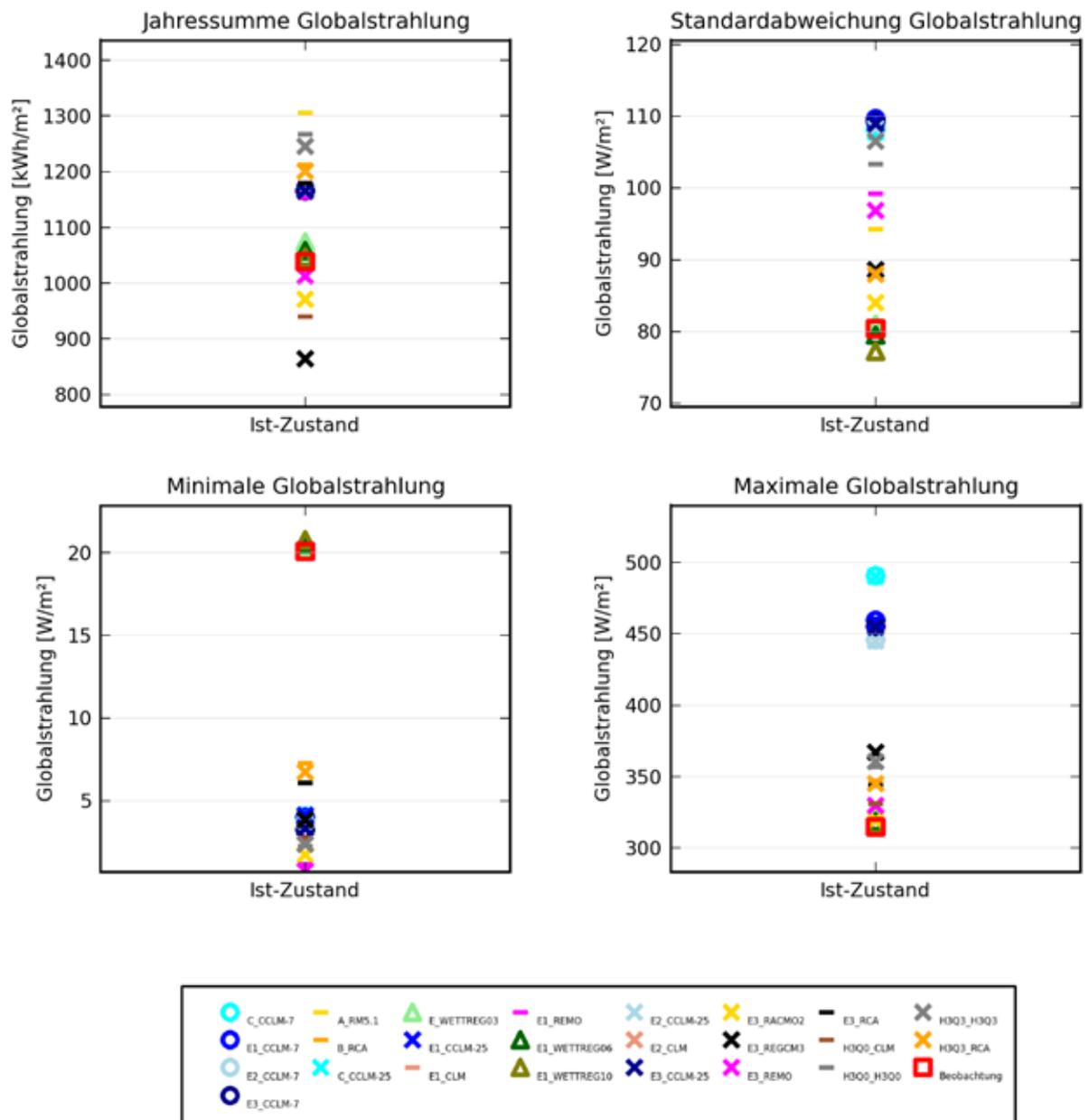
Anlage C-02: Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klima-projektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



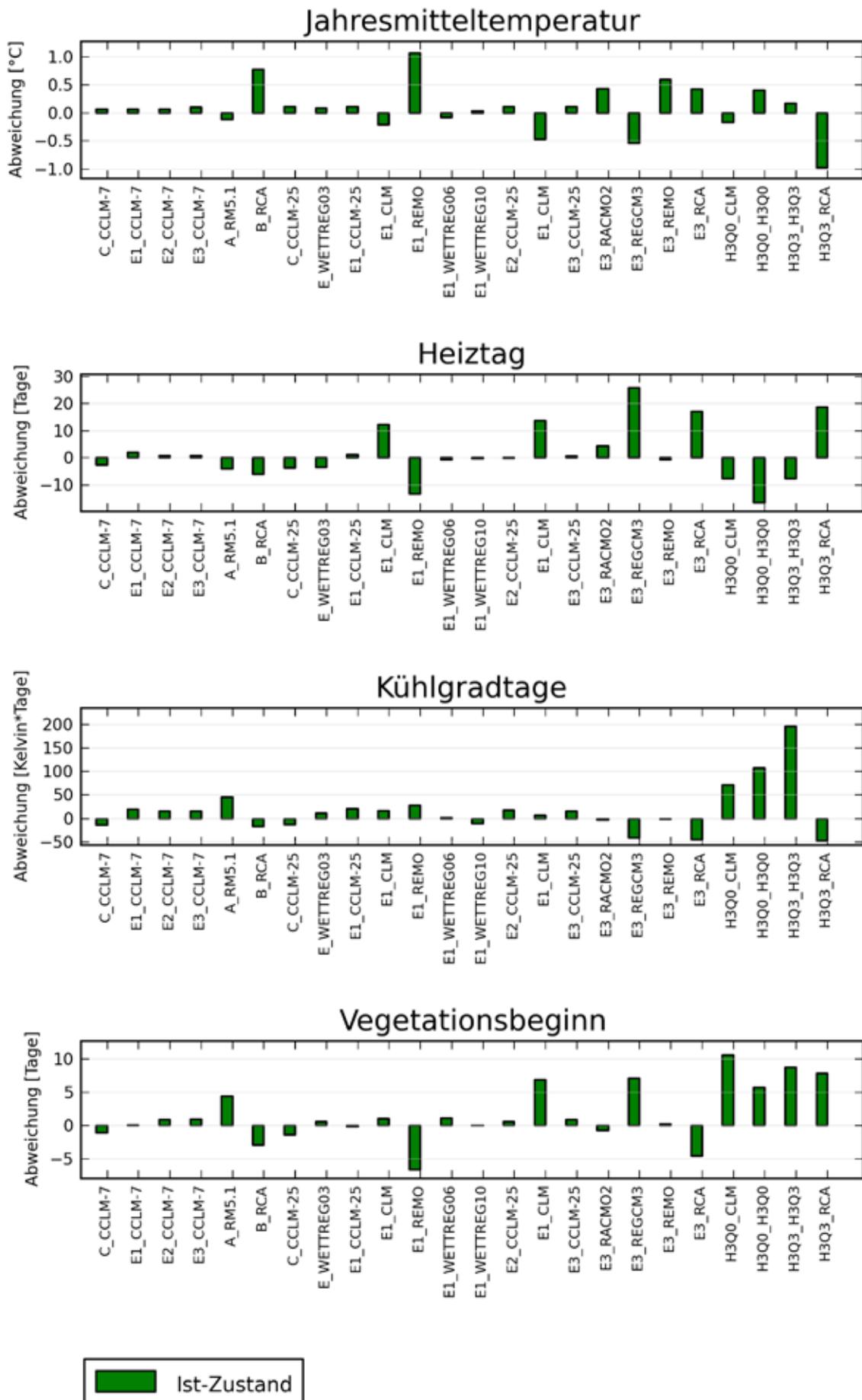
Anlage C-02: Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klima-projektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



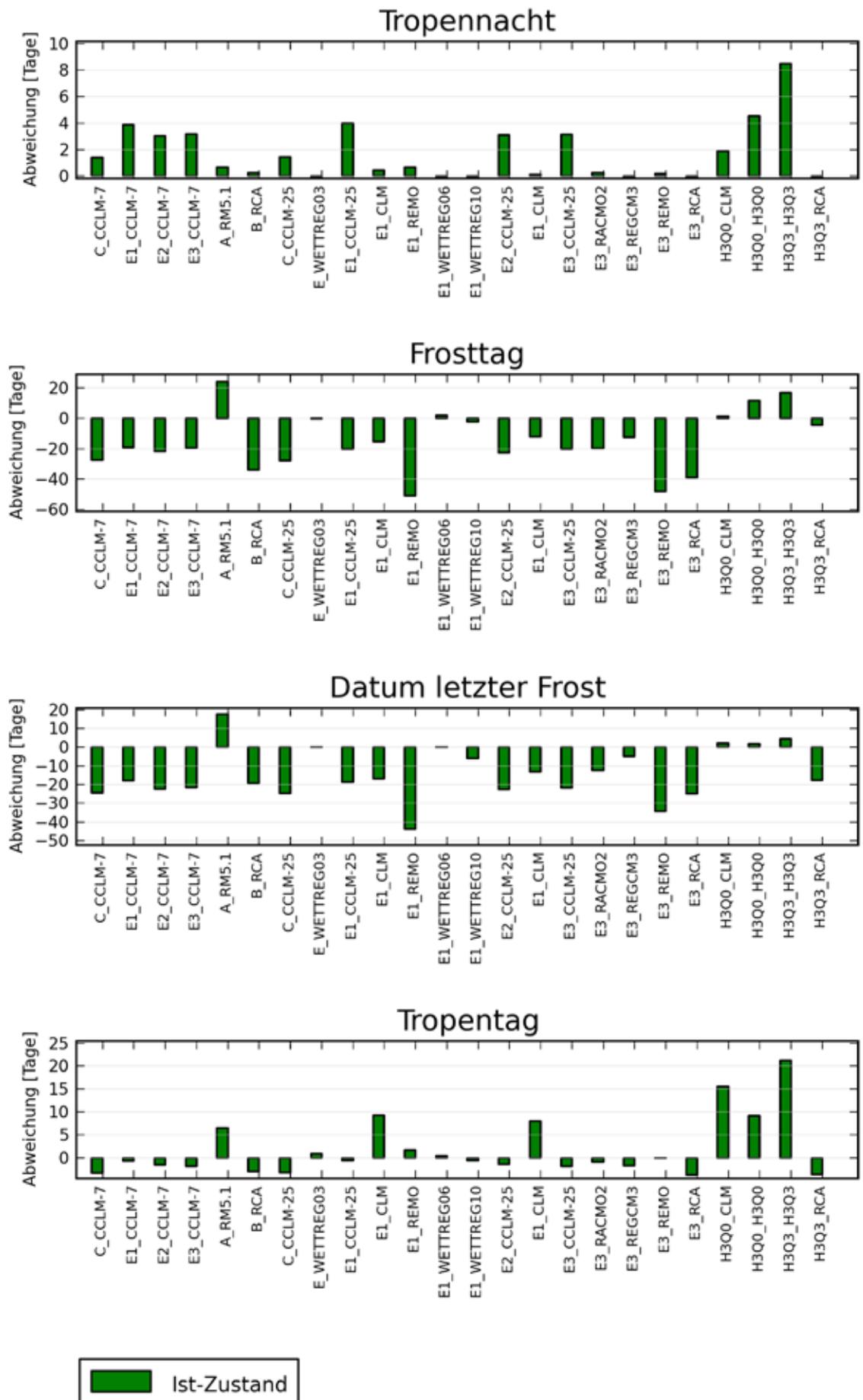
Anlage C-03: Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten und für 24 Klima-
projektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



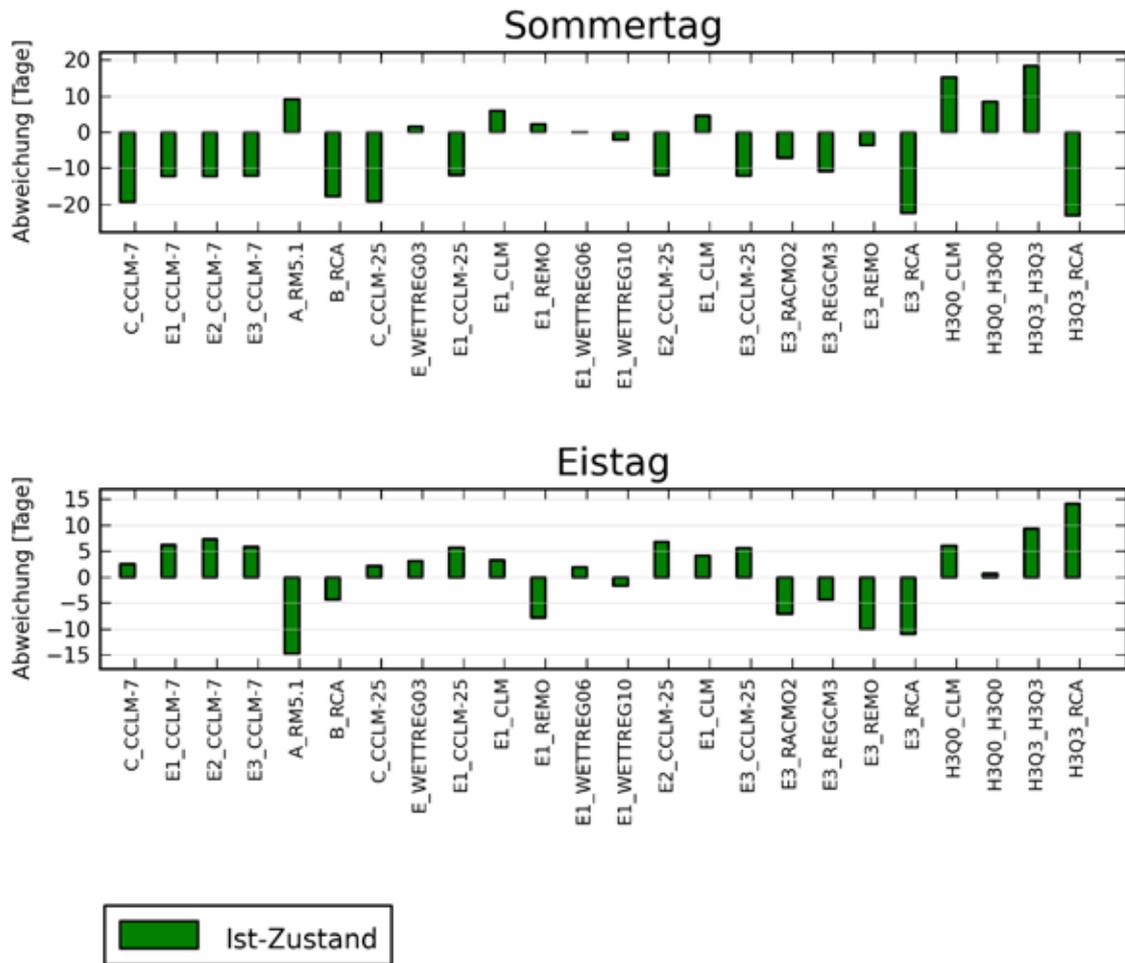
Anlage D-01: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg



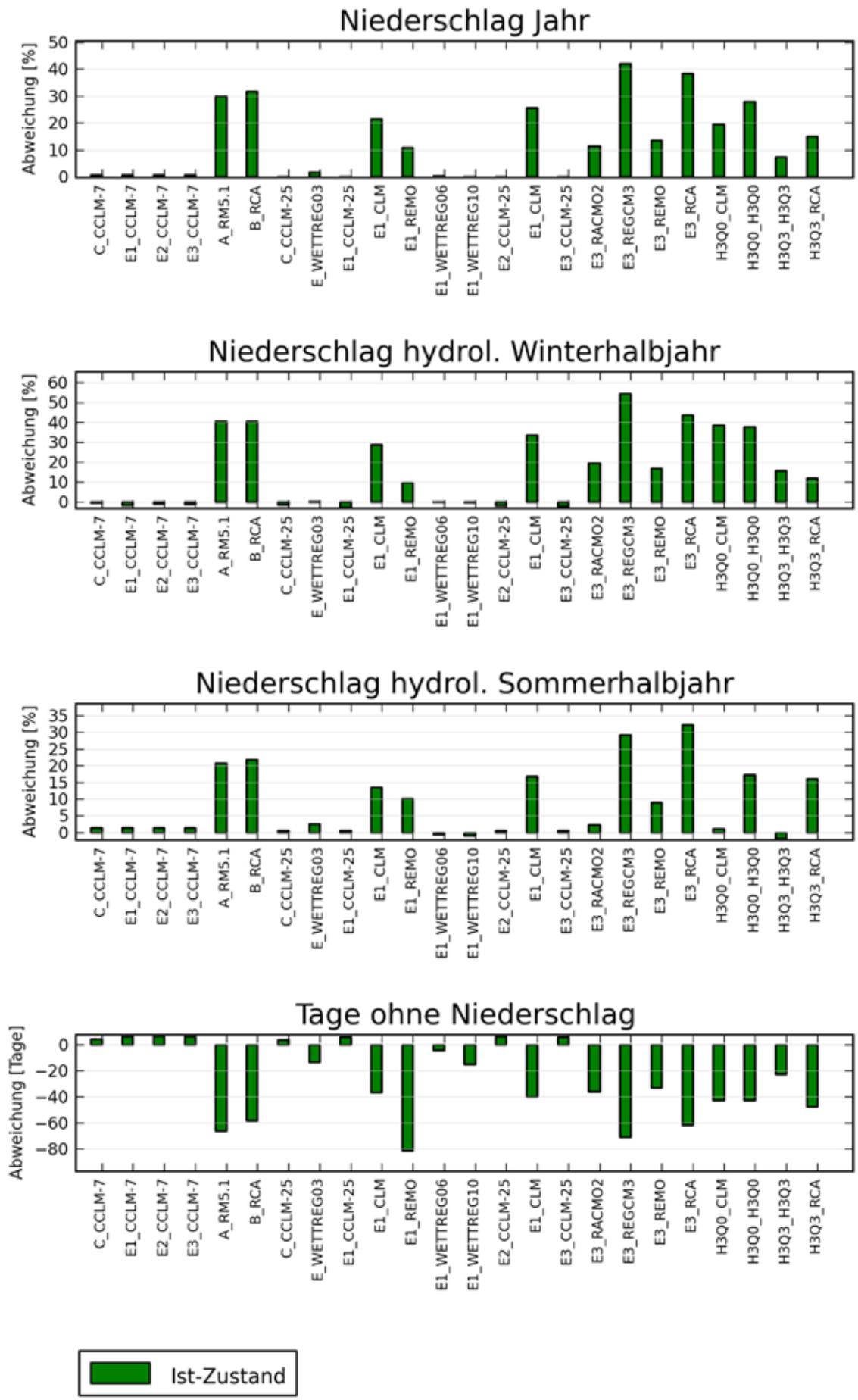
Anlage D-01: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg



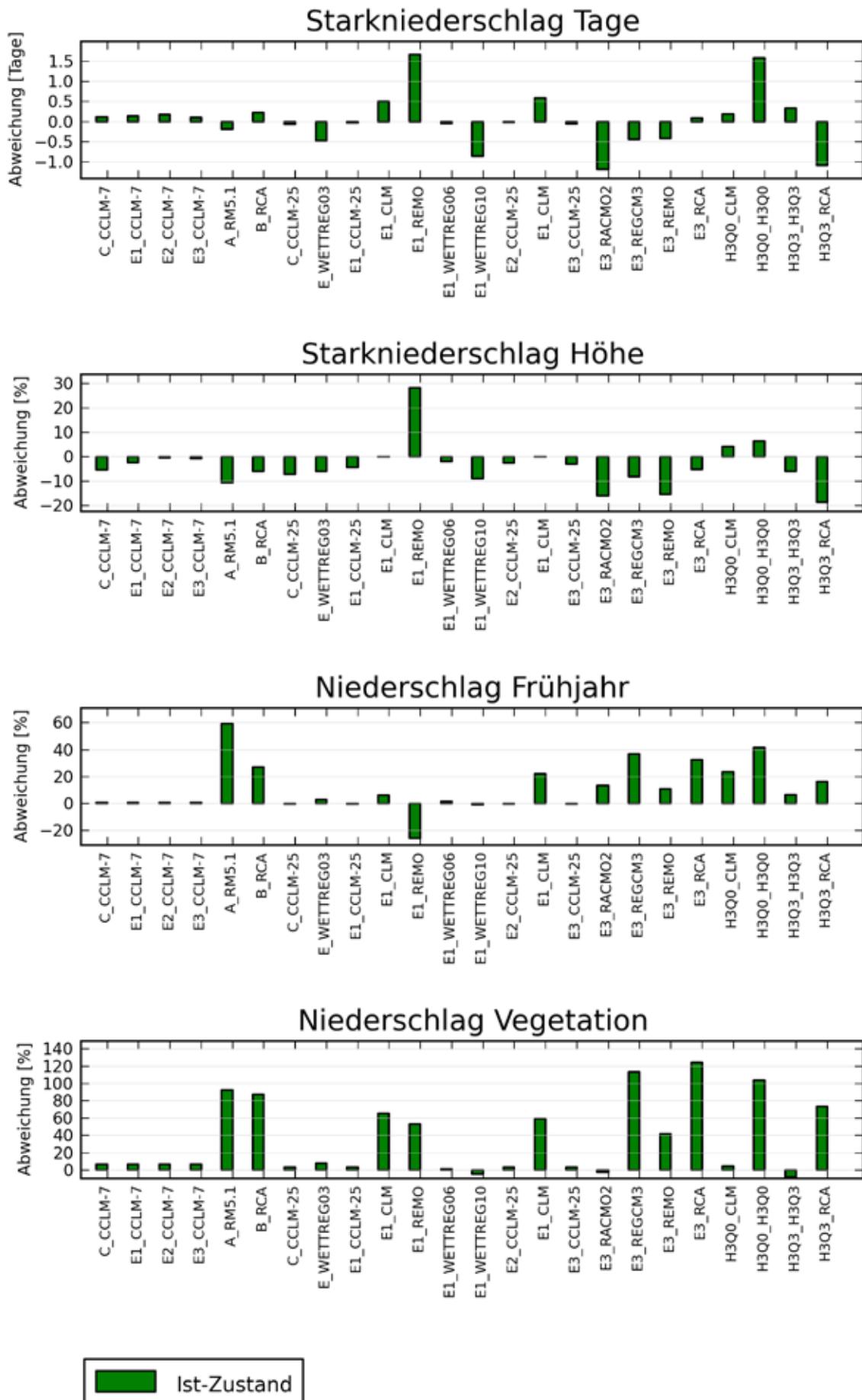
Anlage D-01: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg



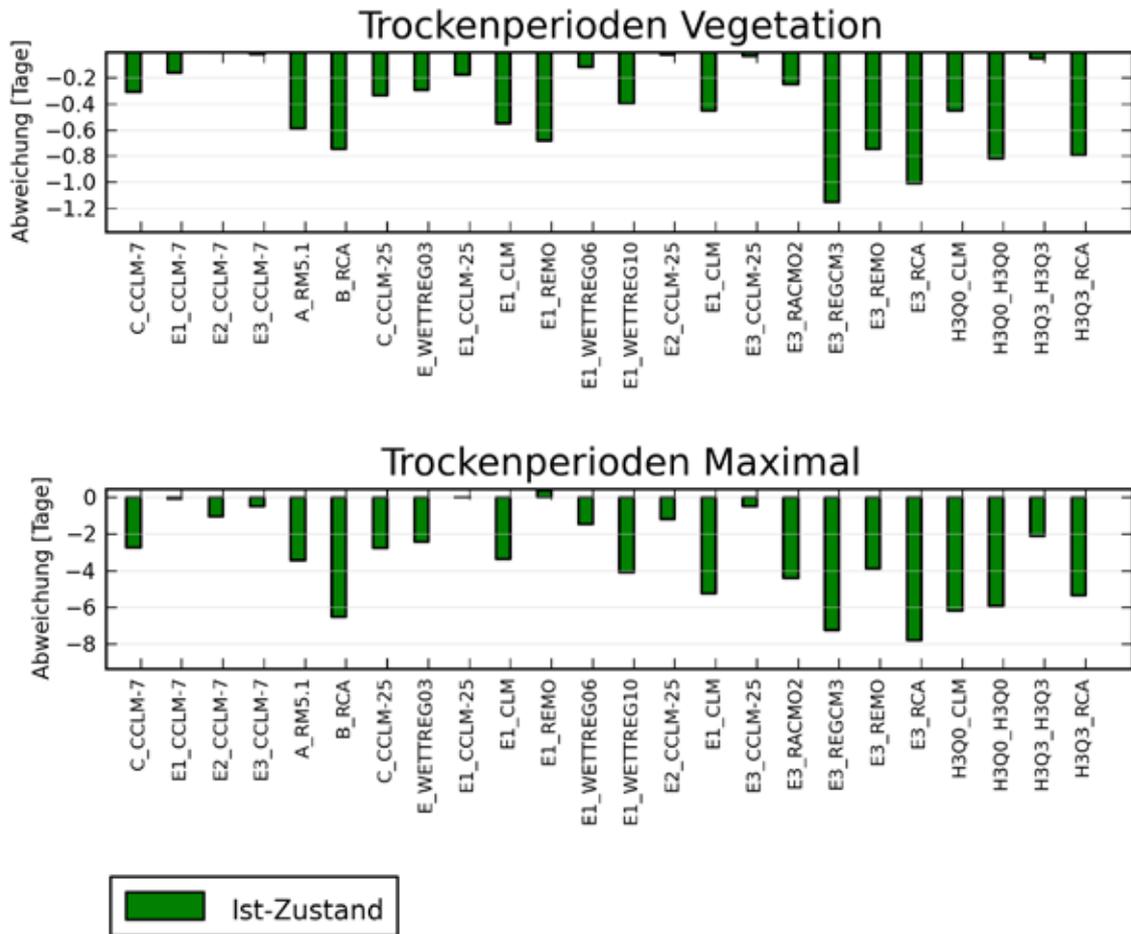
Anlage D-02: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg



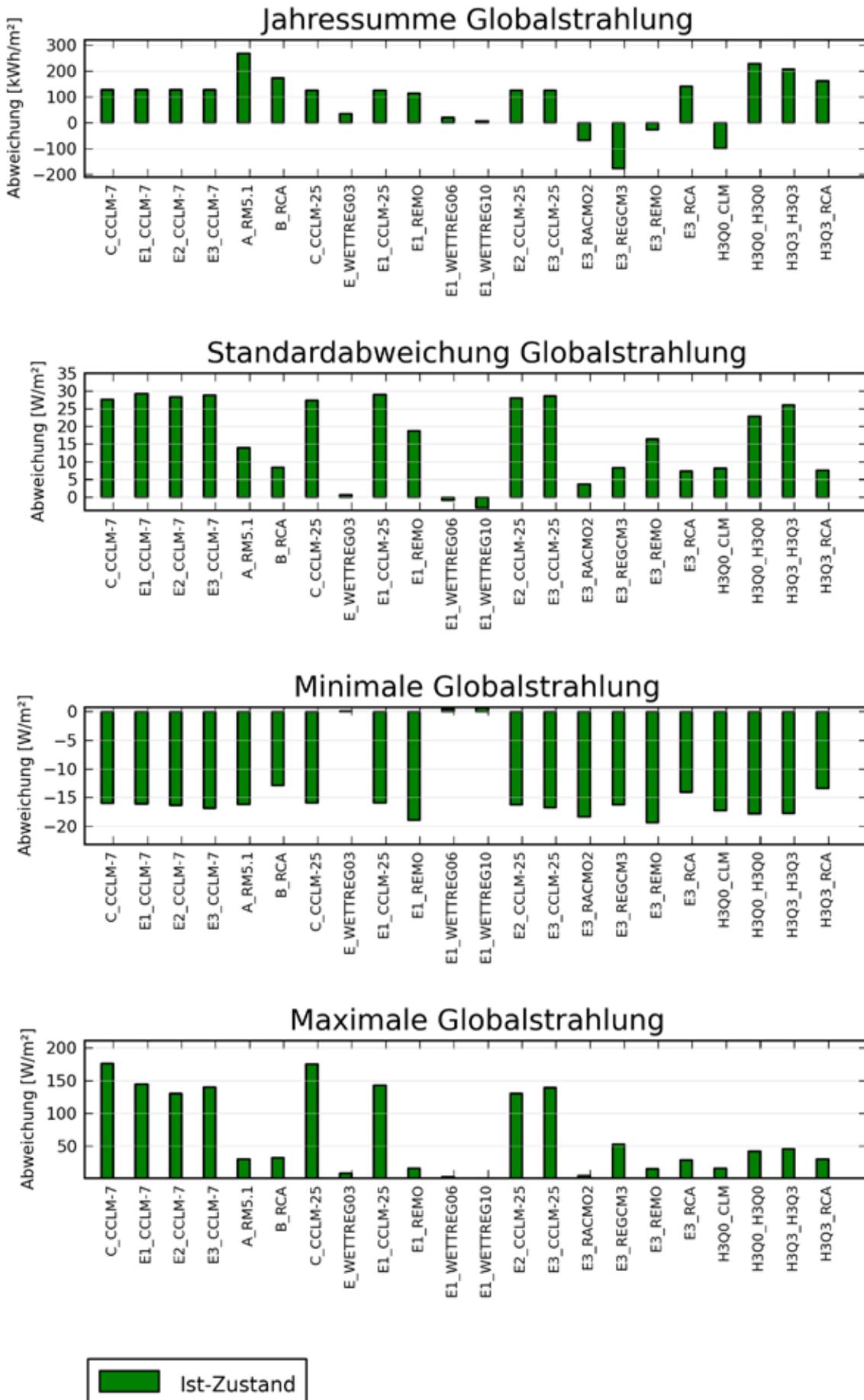
Anlage D-02: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg



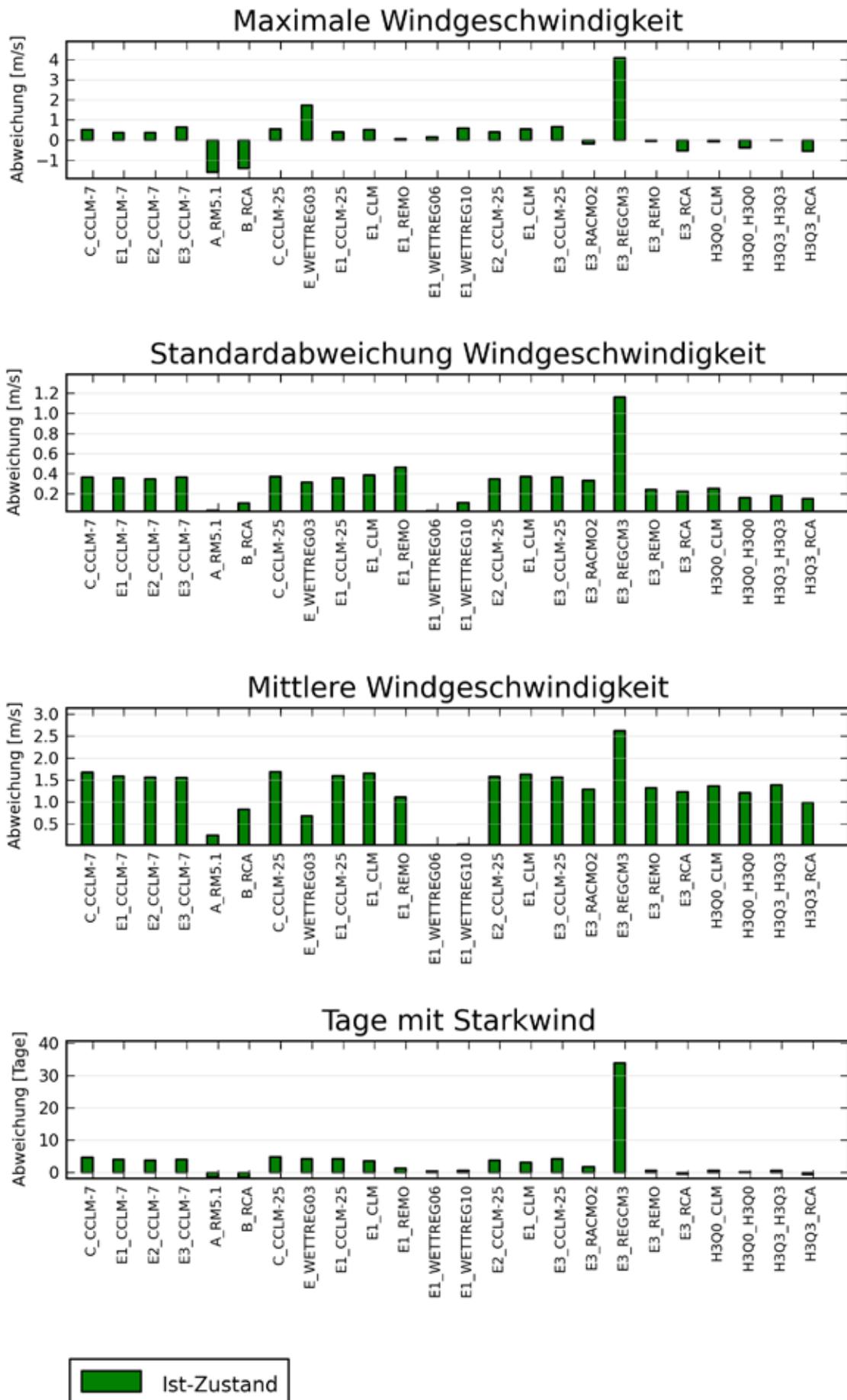
Anlage D-02: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg



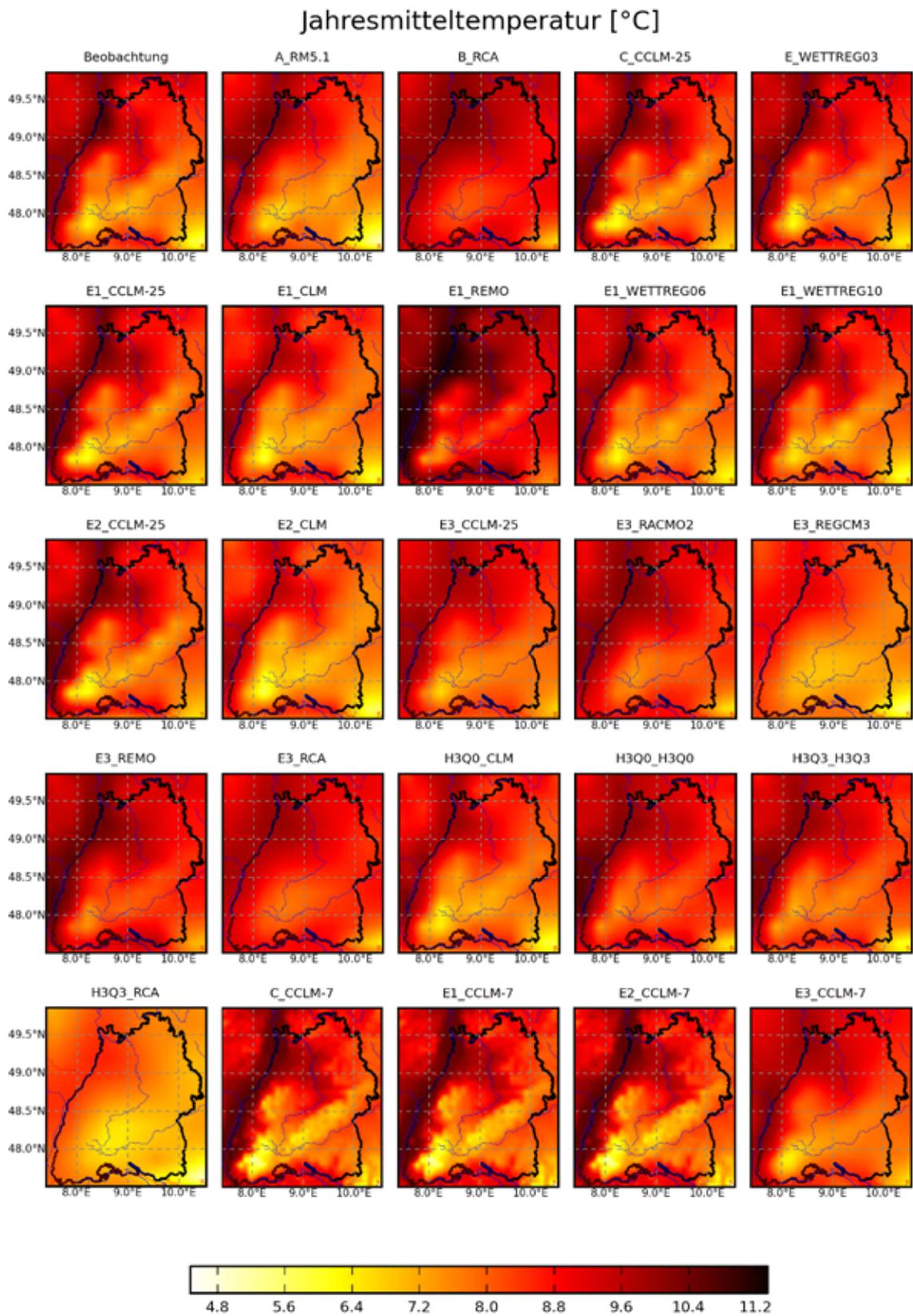
Anlage D-03: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg



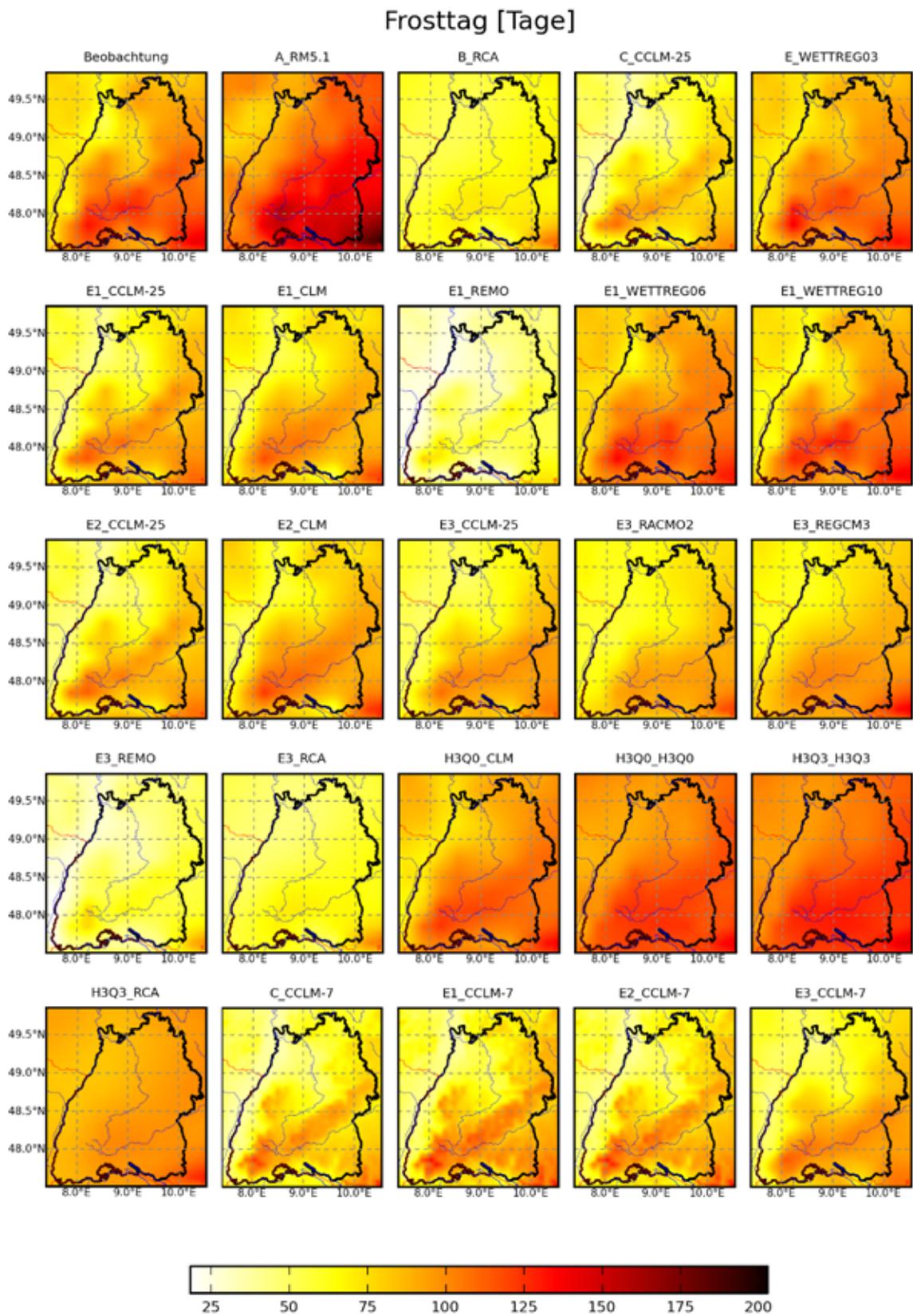
Anlage D-04: Differenz der Modelldaten der 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000) von den Beobachtungsdaten für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg



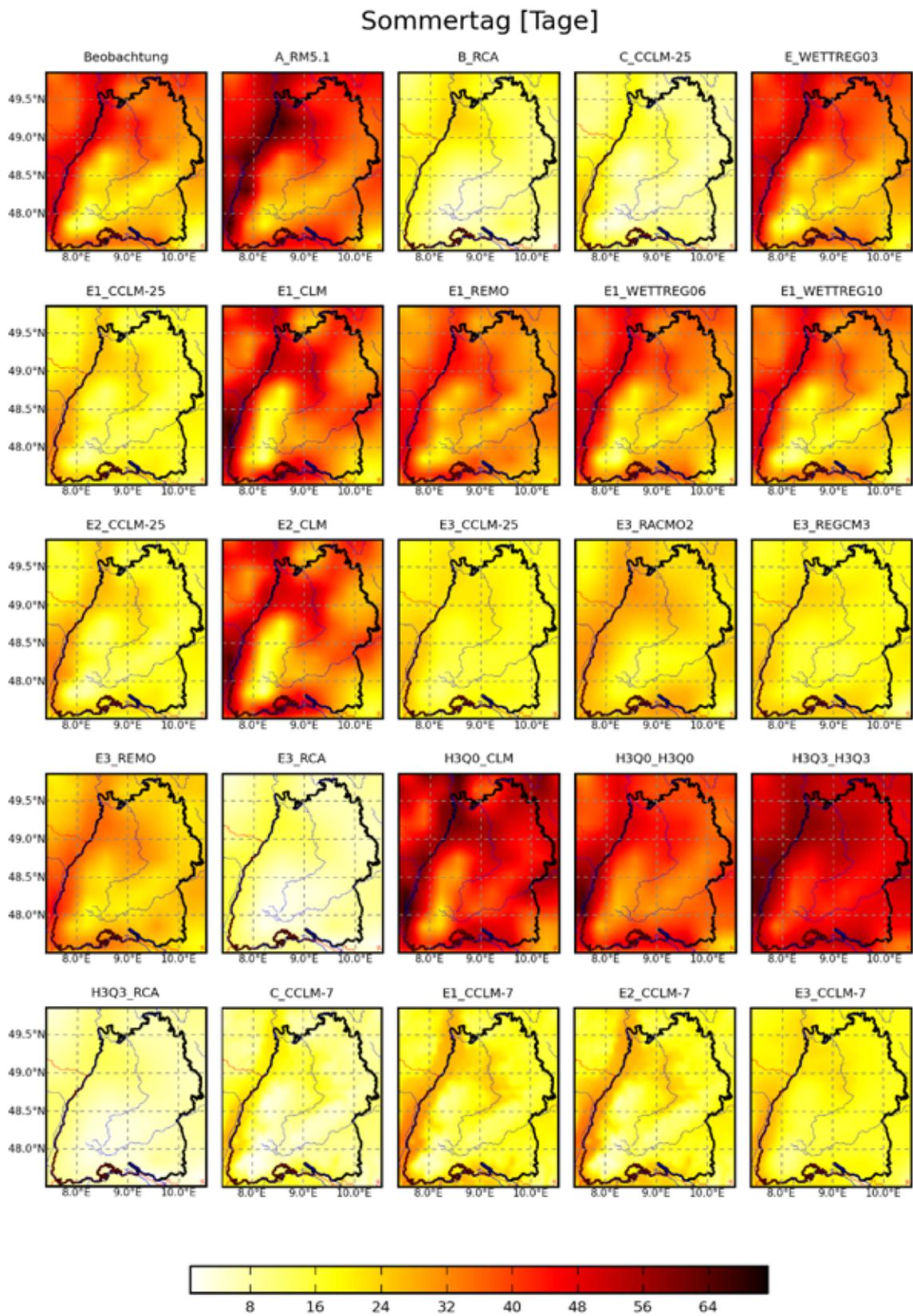
Anlage E-01: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Jahresmitteltemperatur“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



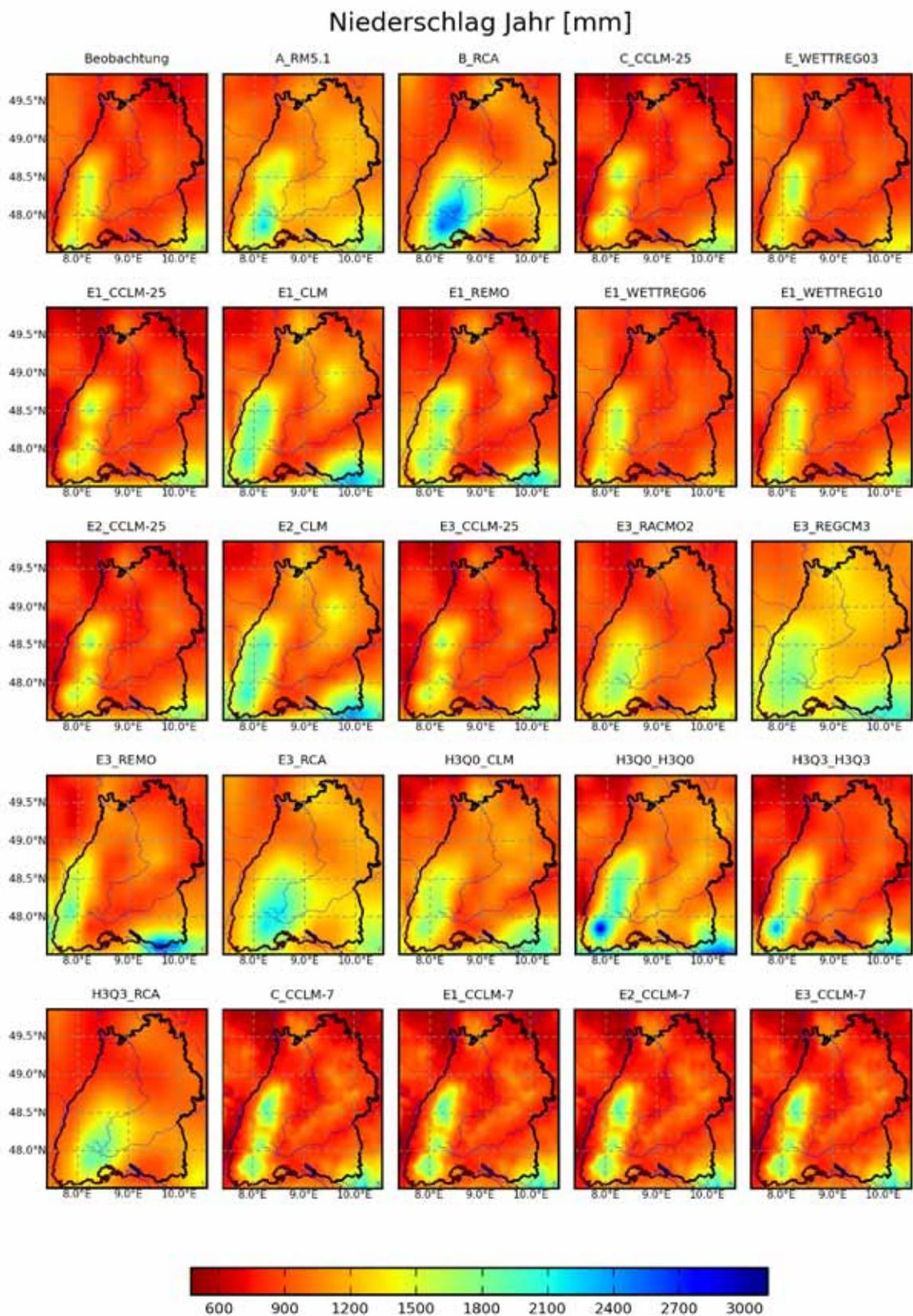
Anlage E-02: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Frosttag“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klima-
projektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



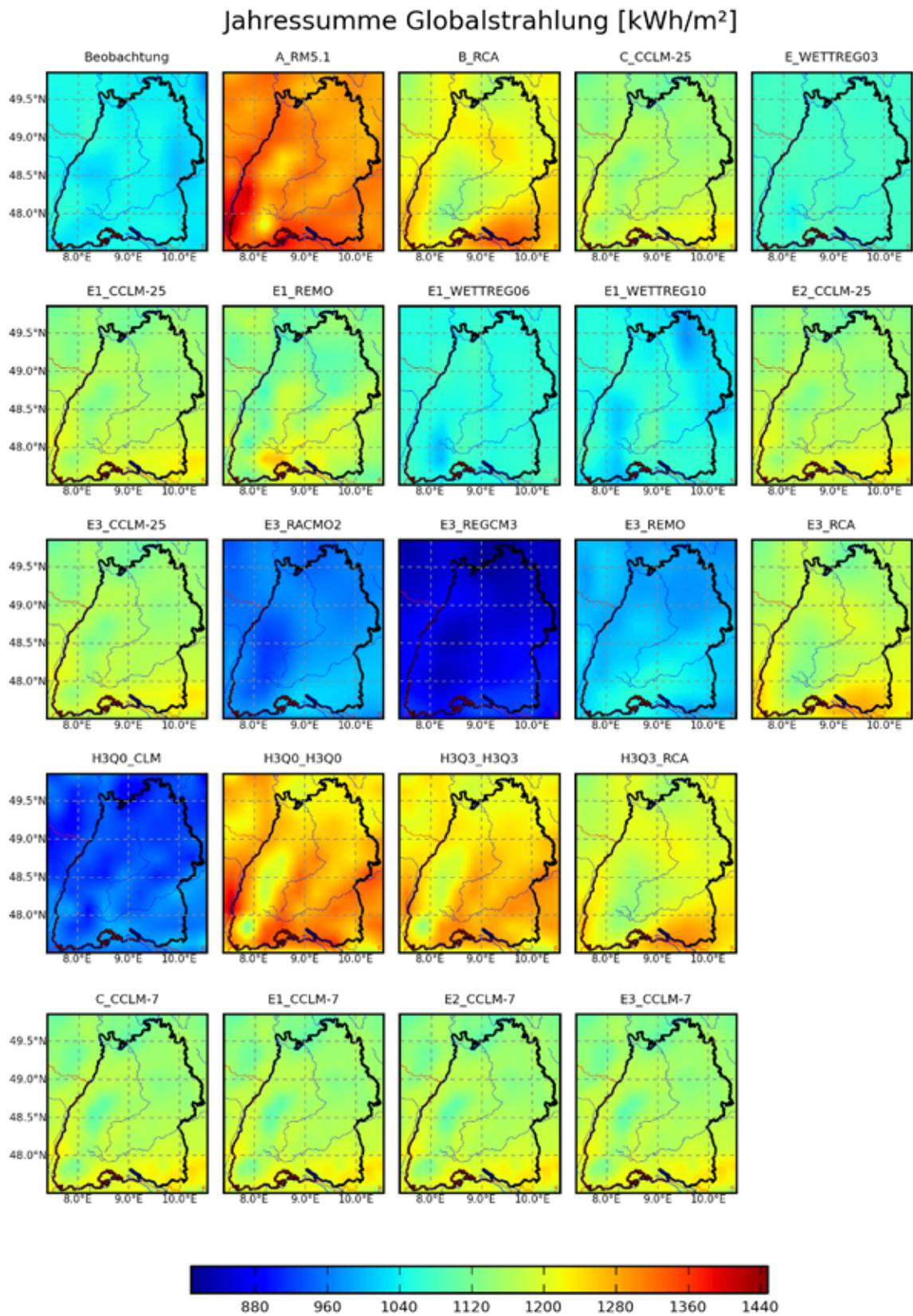
Anlage E-03: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Sommertag“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klima-
projektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



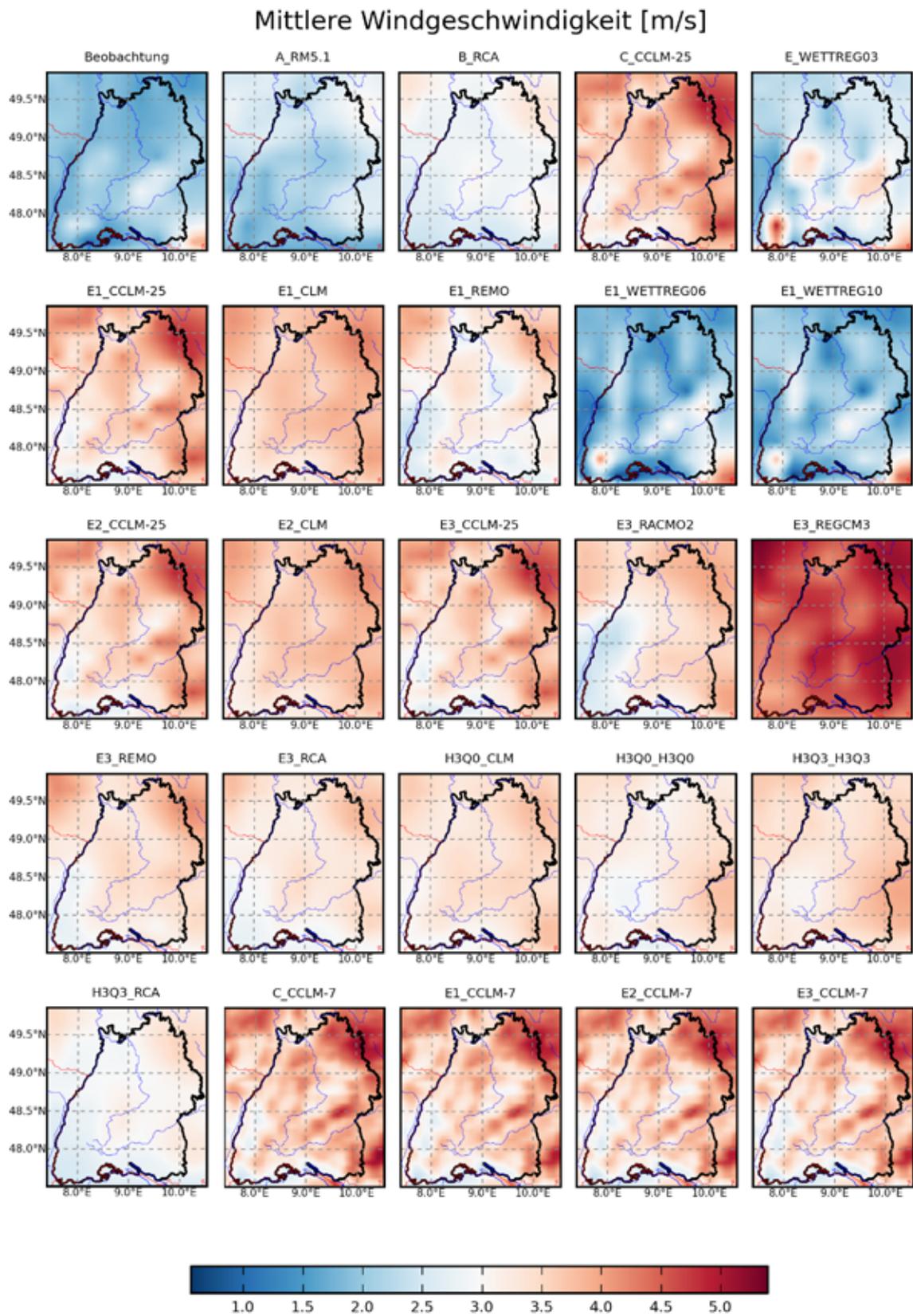
Anlage E-04: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Niederschlagssumme im Jahr“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



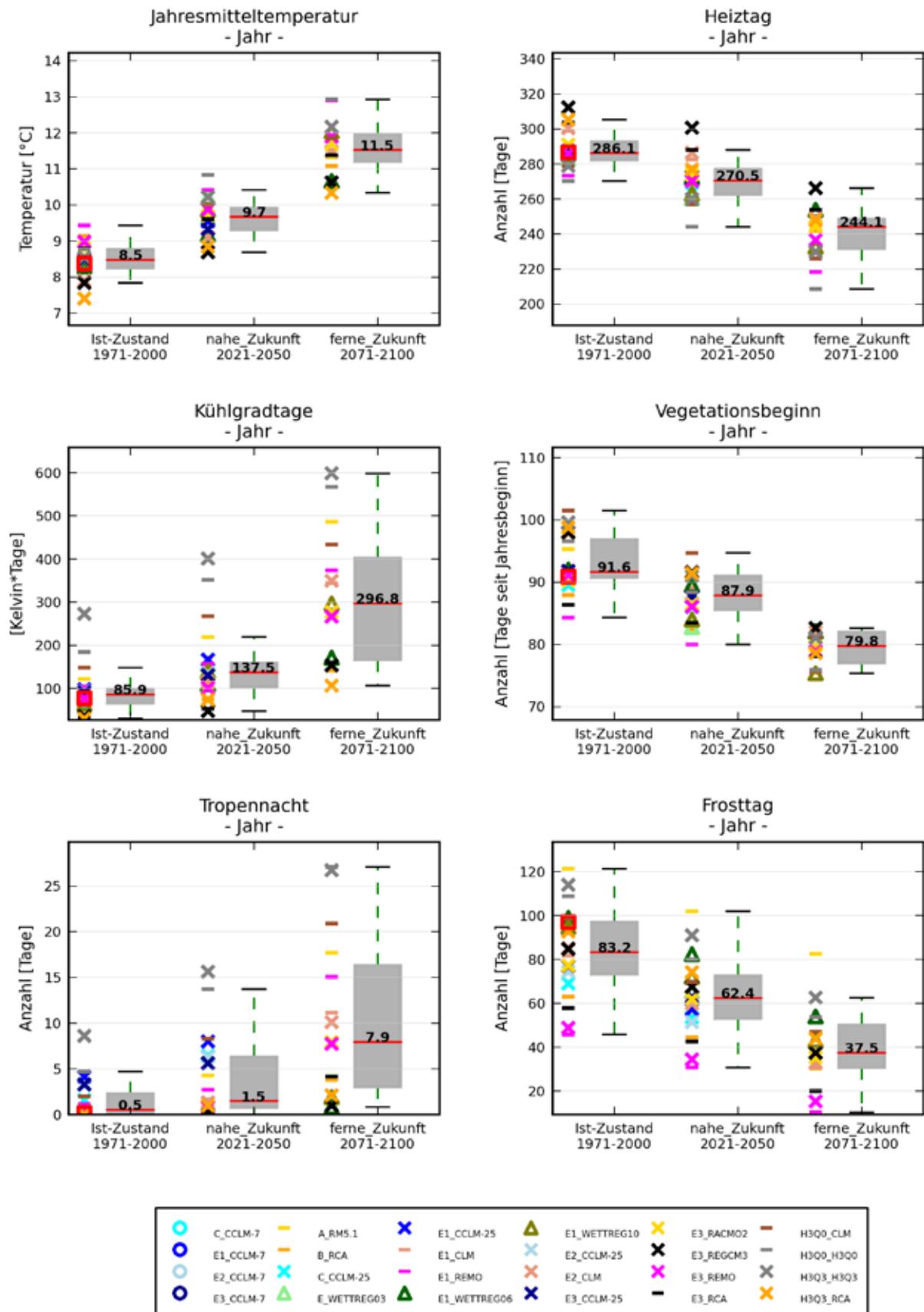
Anlage E-05: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Summe der Globalstrahlung/Jahr“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



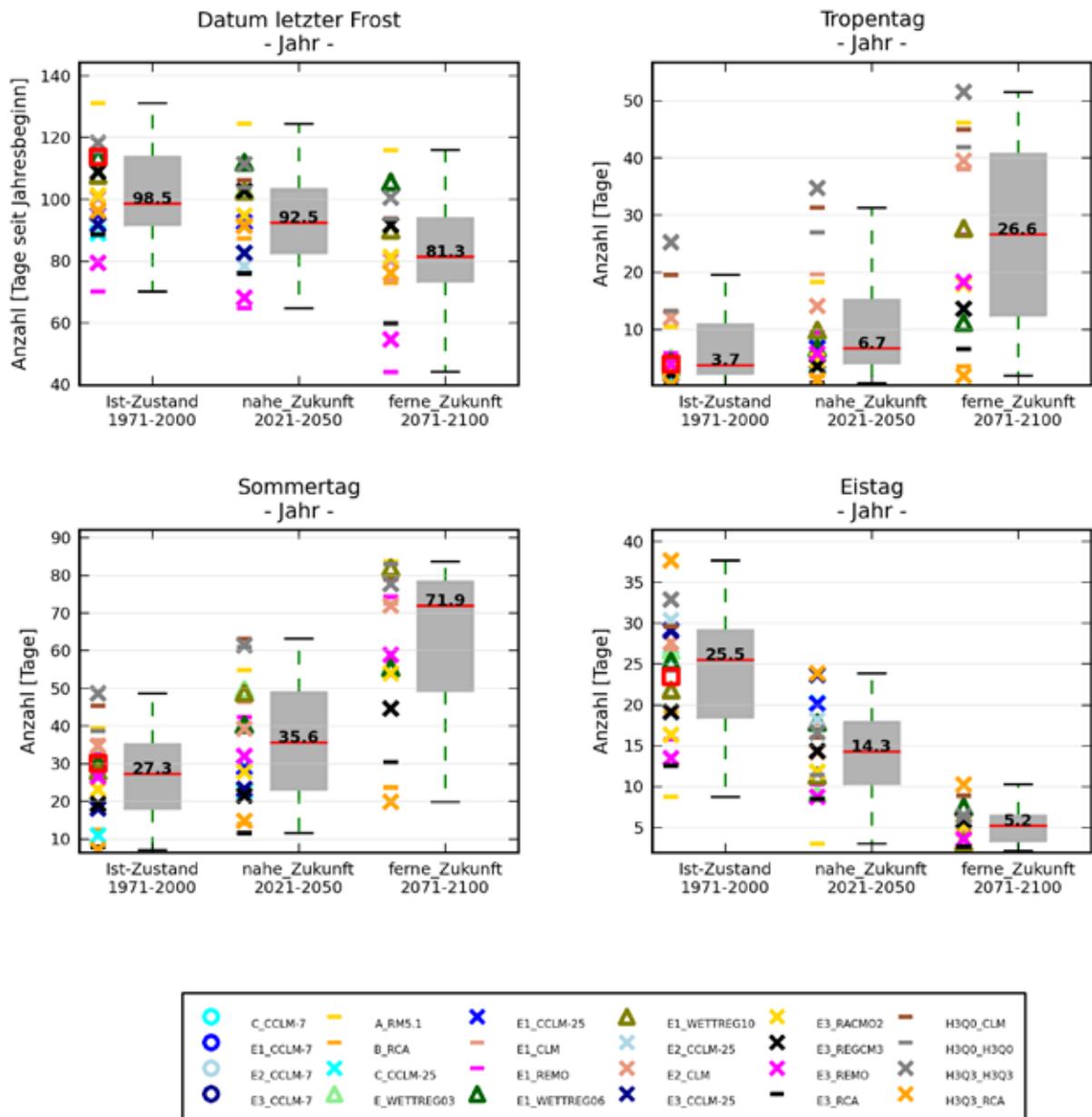
Anlage E-06: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „mittlere Windgeschwindigkeit“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)



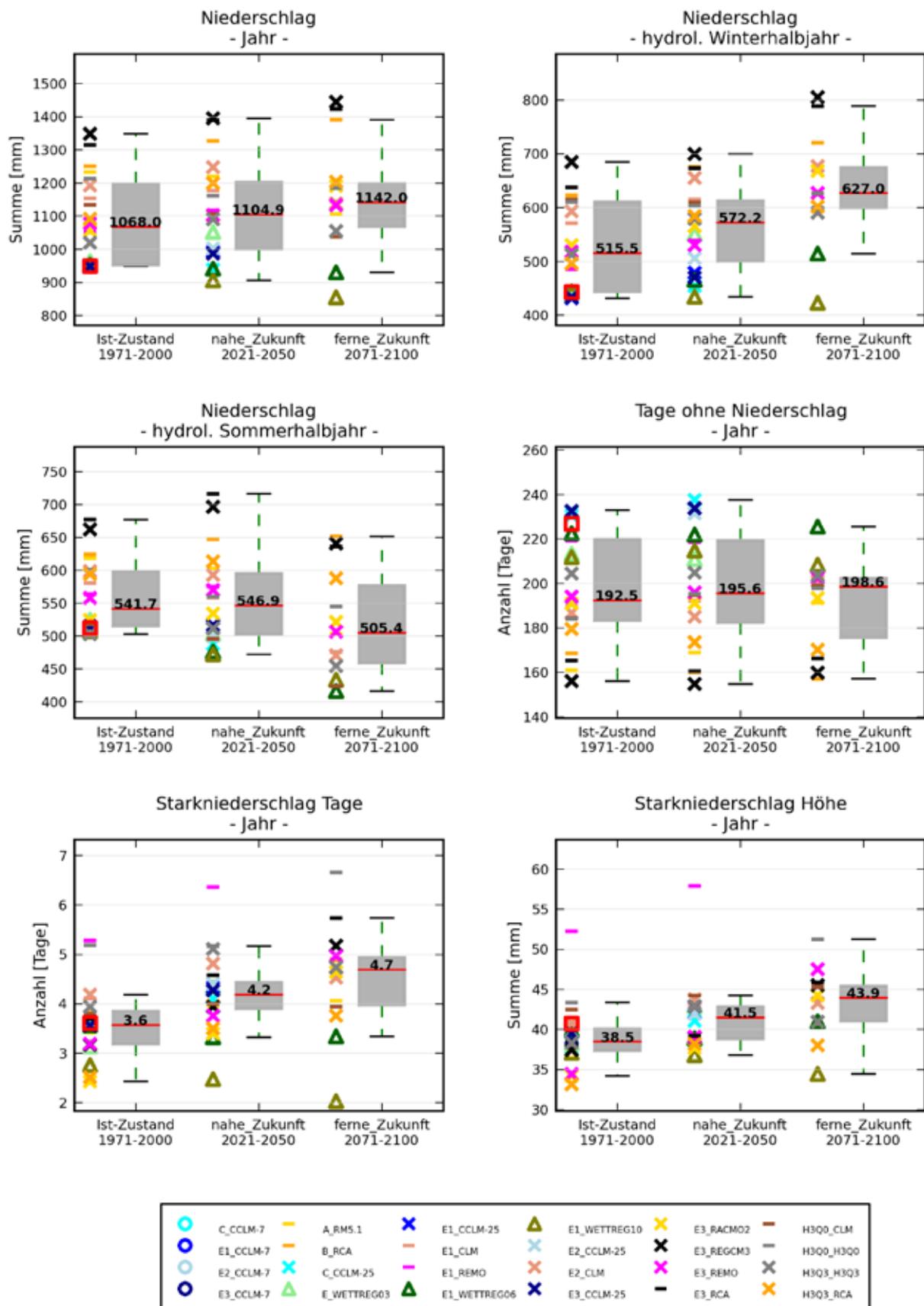
Anlage F-01: Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



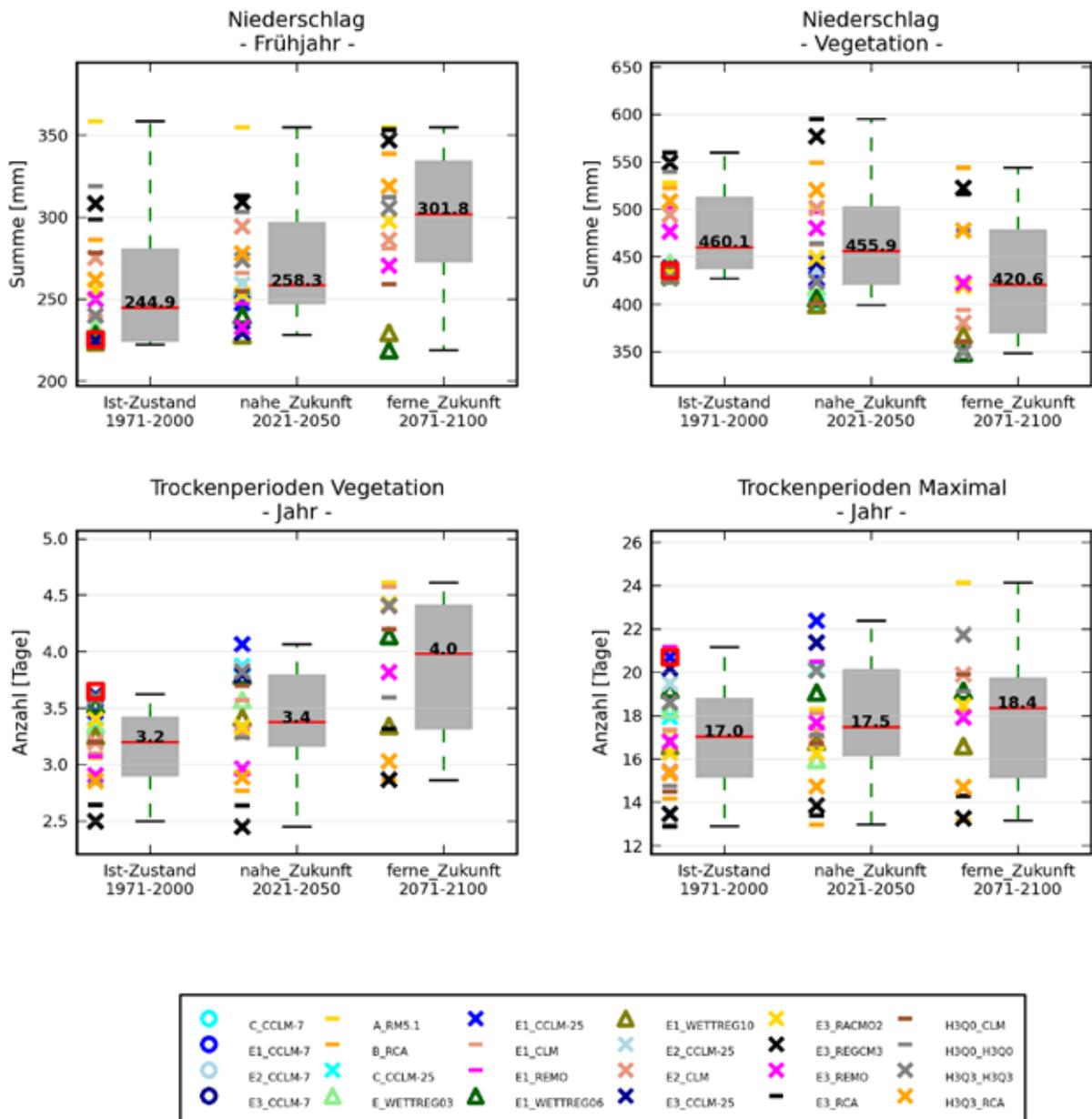
Anlage F-01: Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



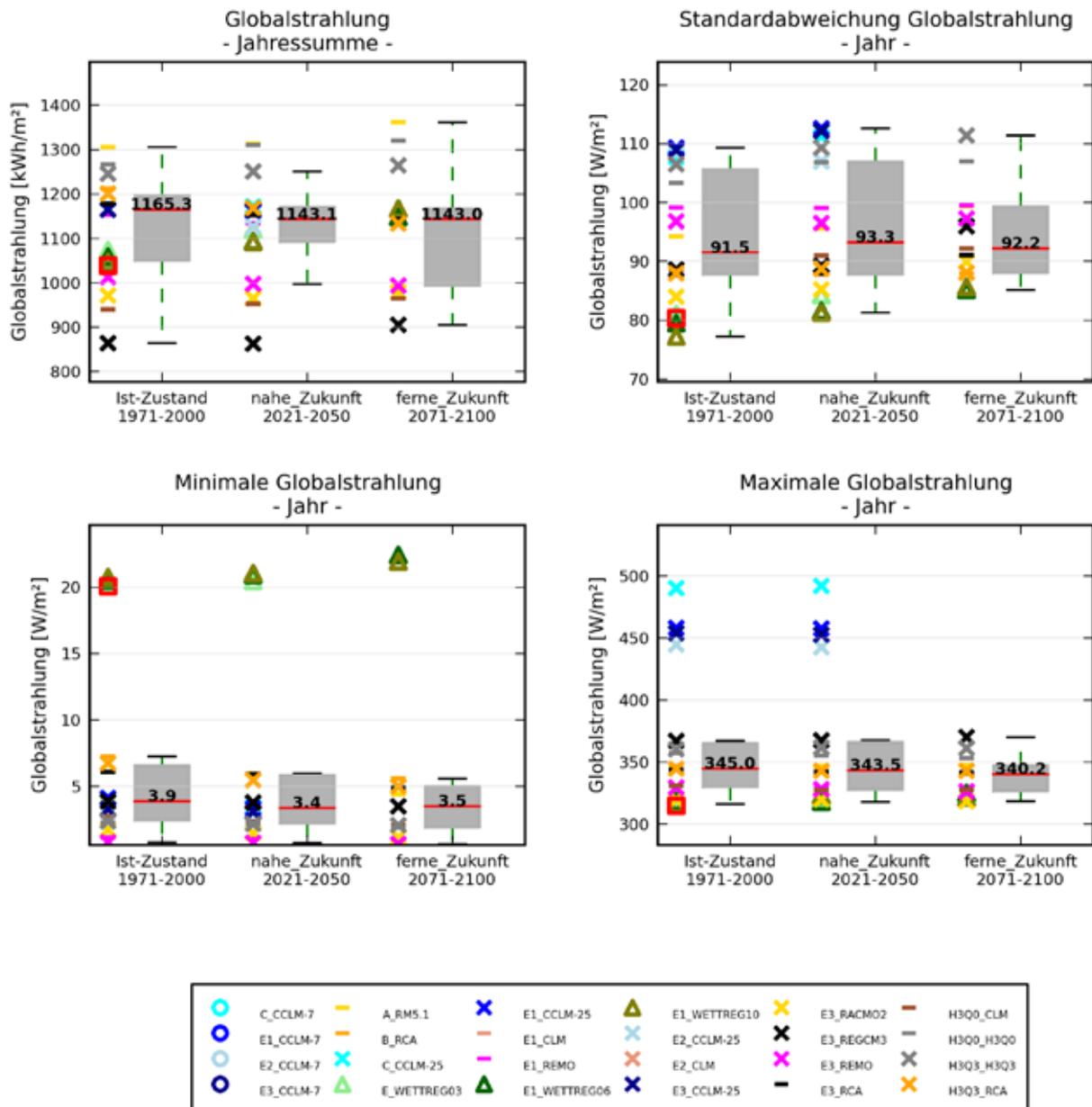
Anlage F-02: Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



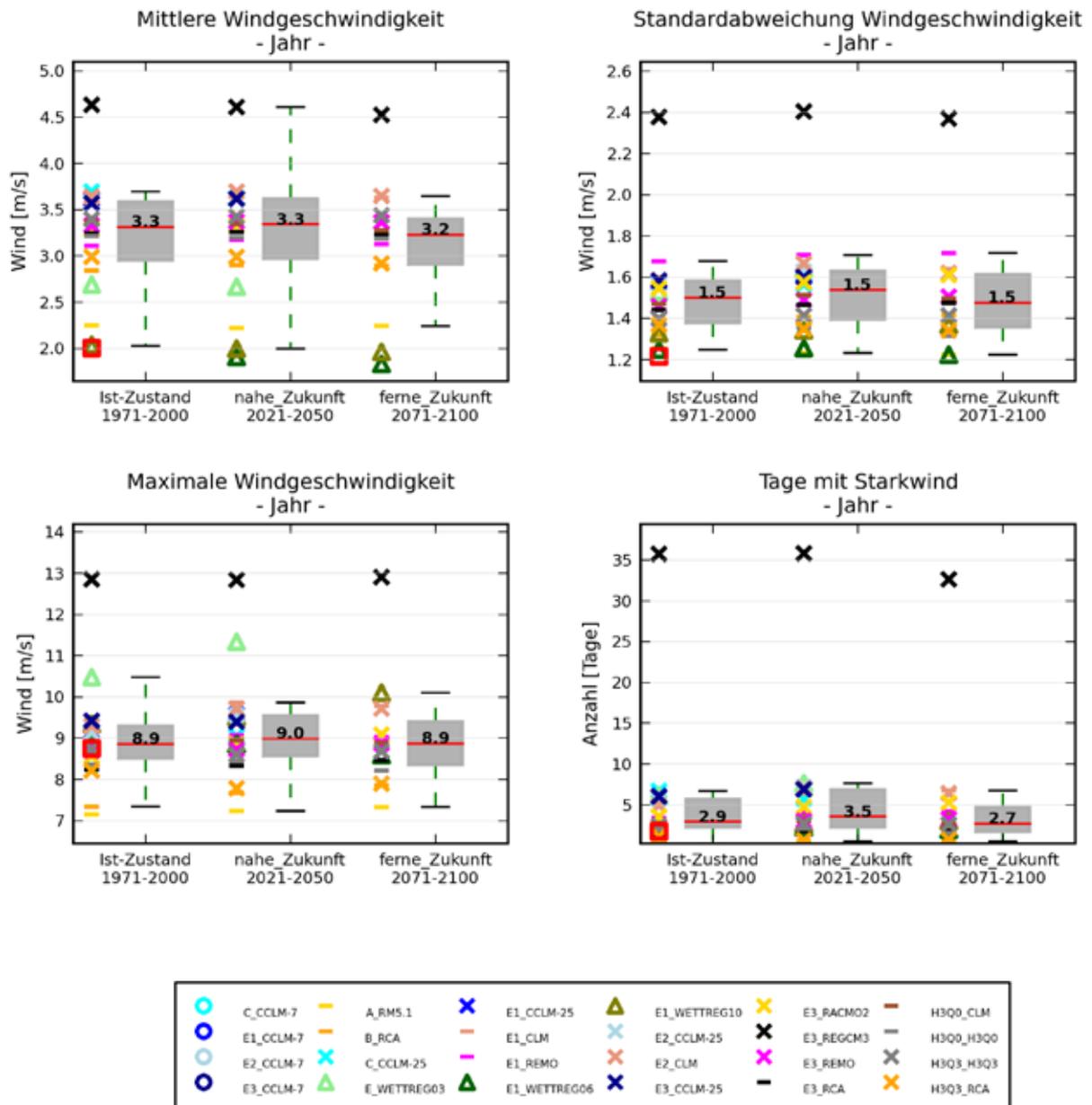
Anlage F-02: Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



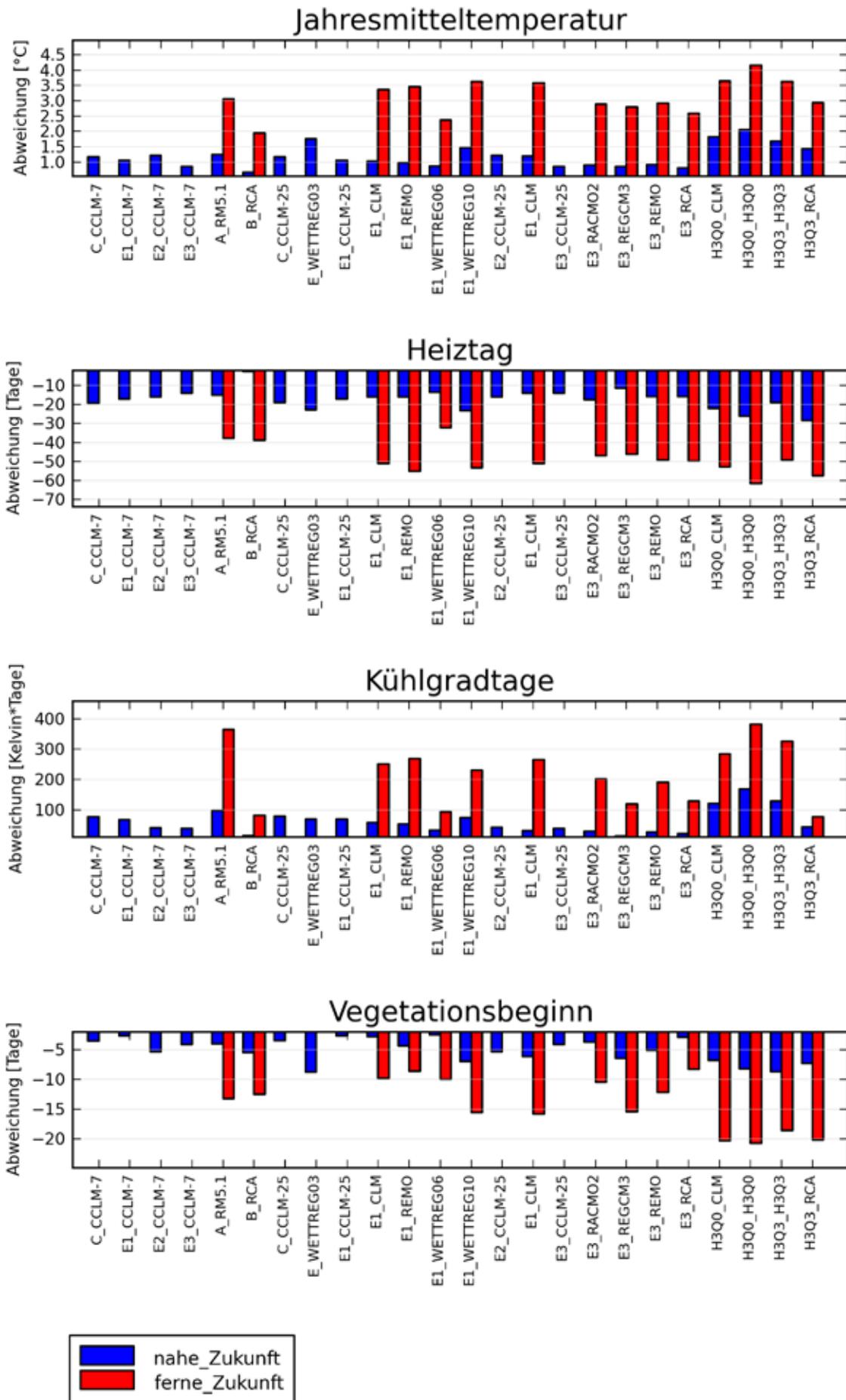
Anlage F-03: Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



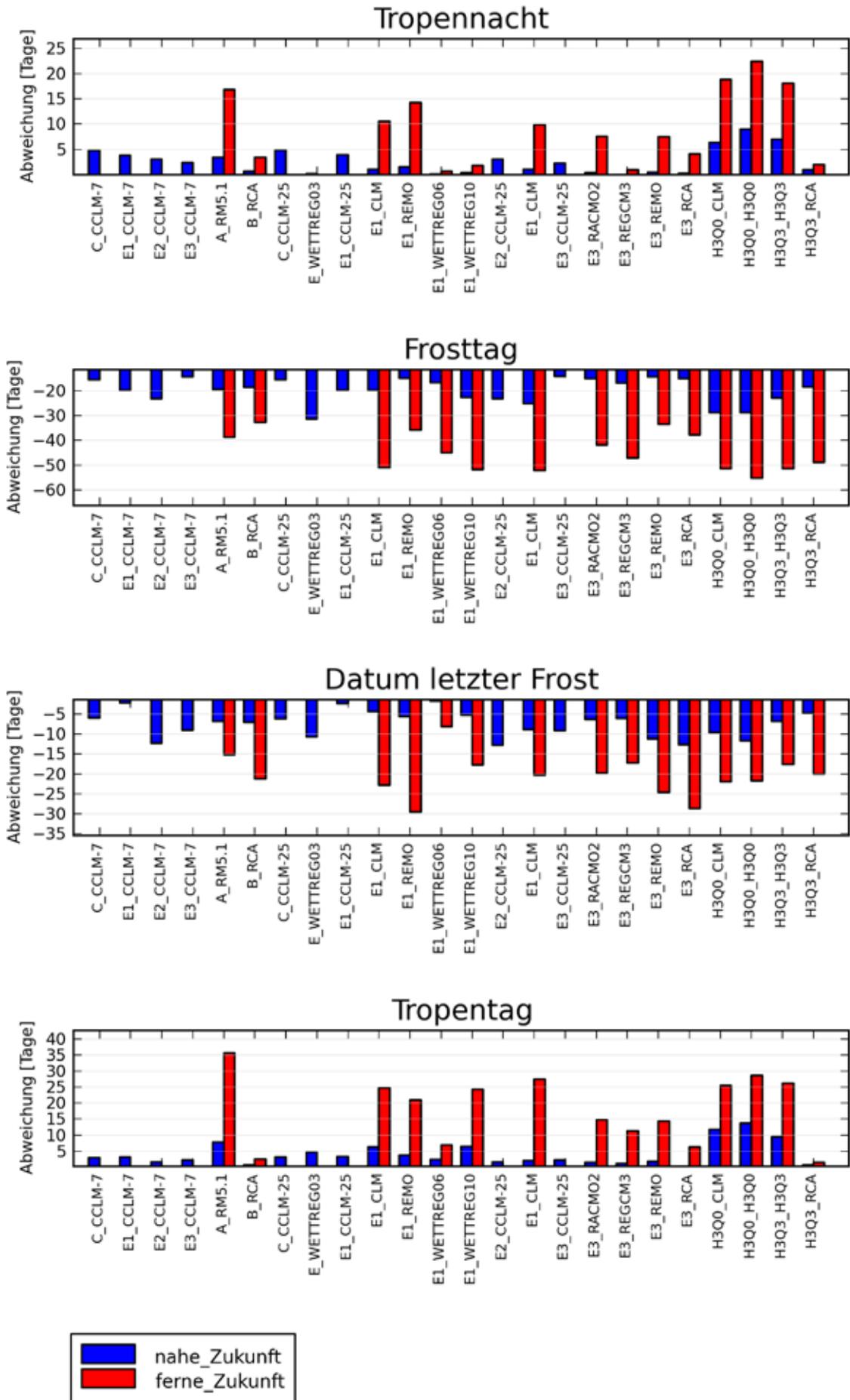
Anlage F-04: Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



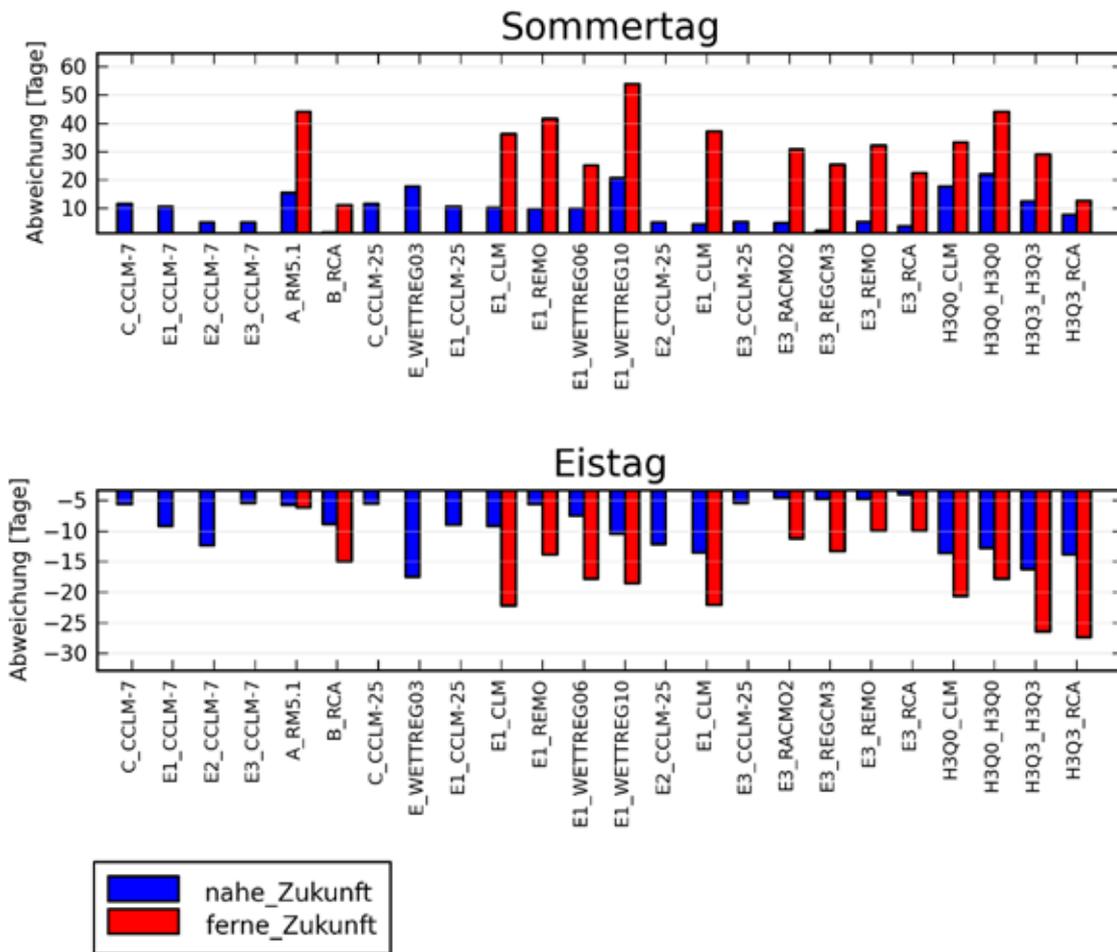
Anlage G-01: Klimasignal der Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



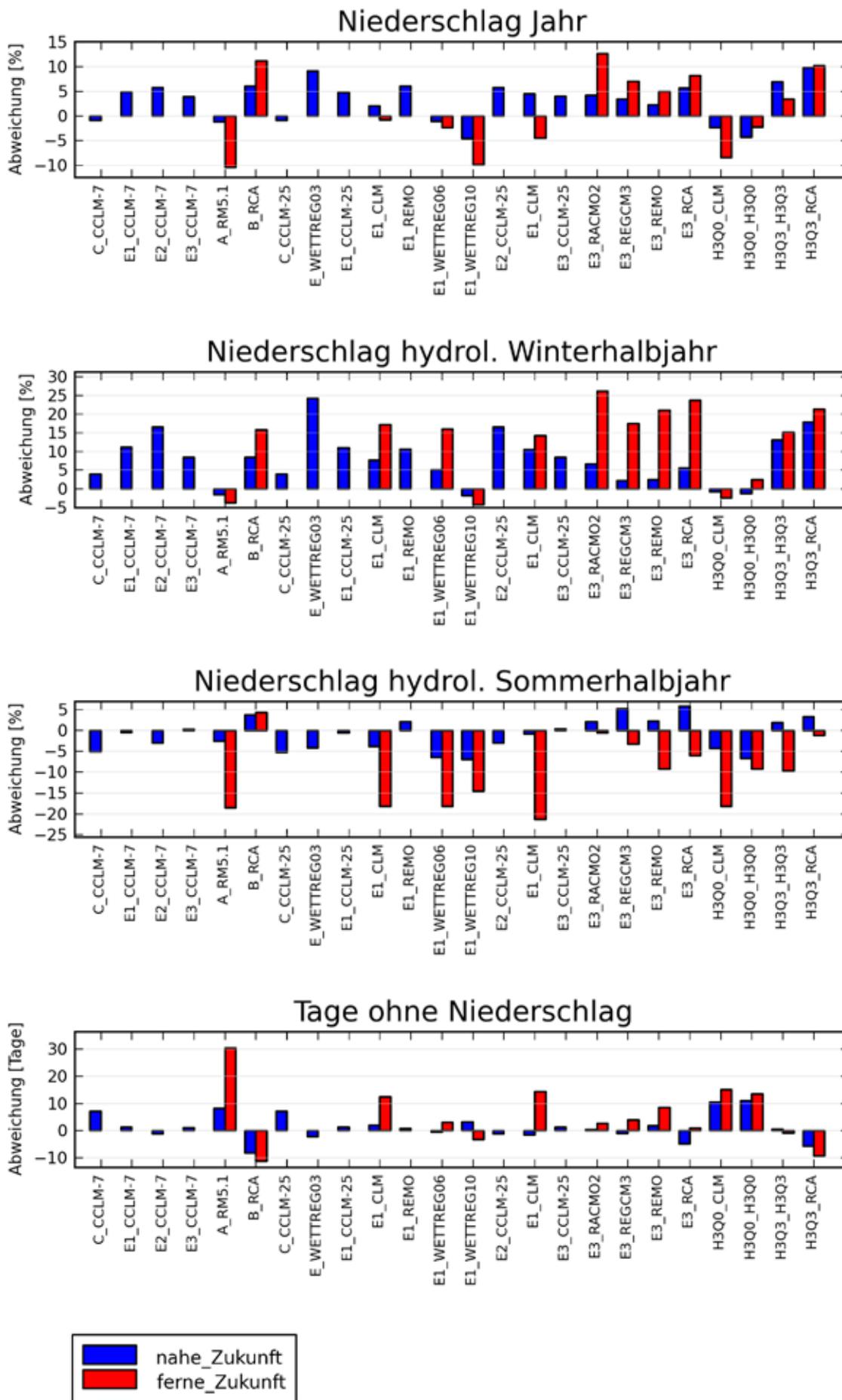
Anlage G-01: Klimasignal der Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



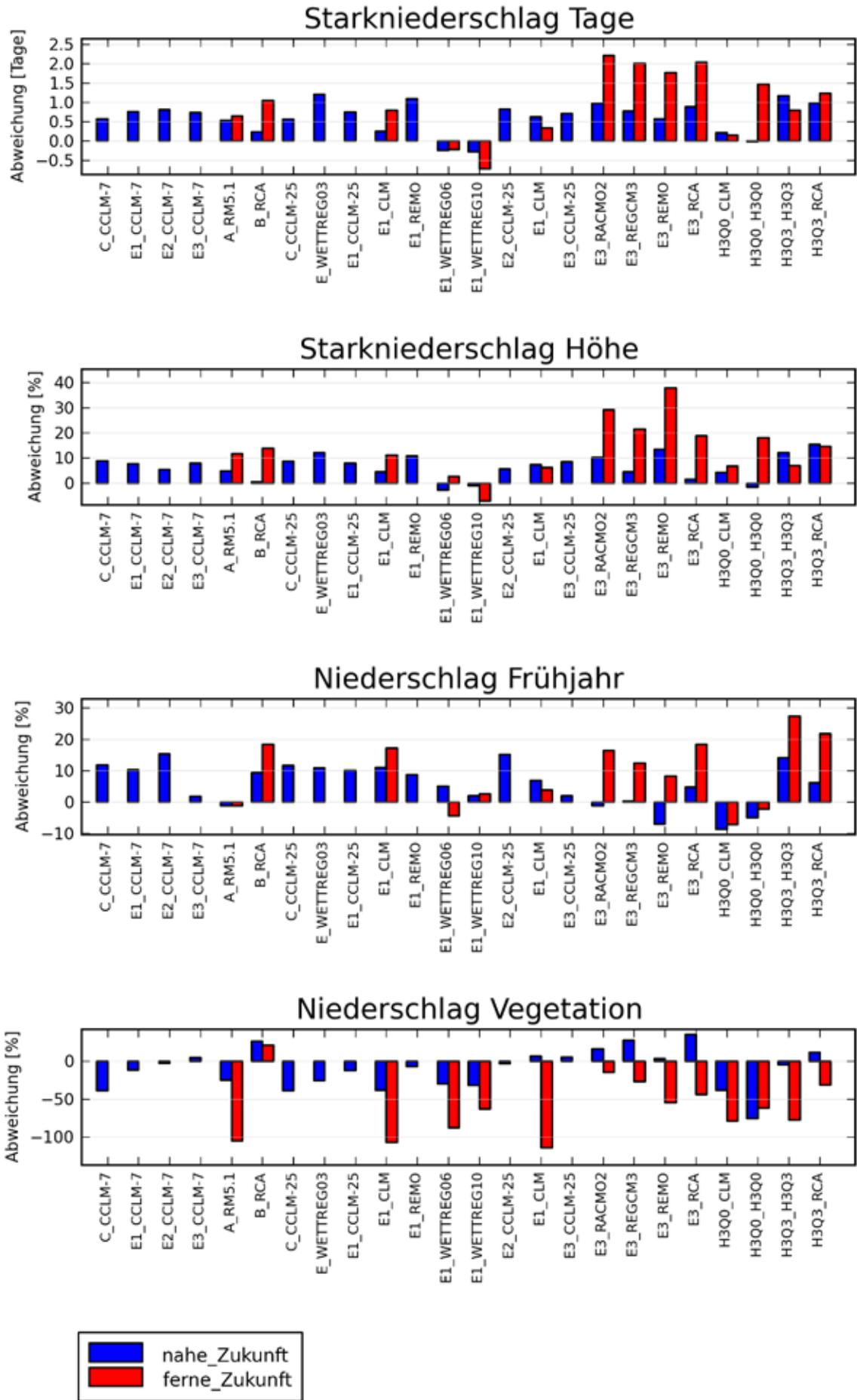
Anlage G-01: Klimasignal der Kennzahlen der Temperatur als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



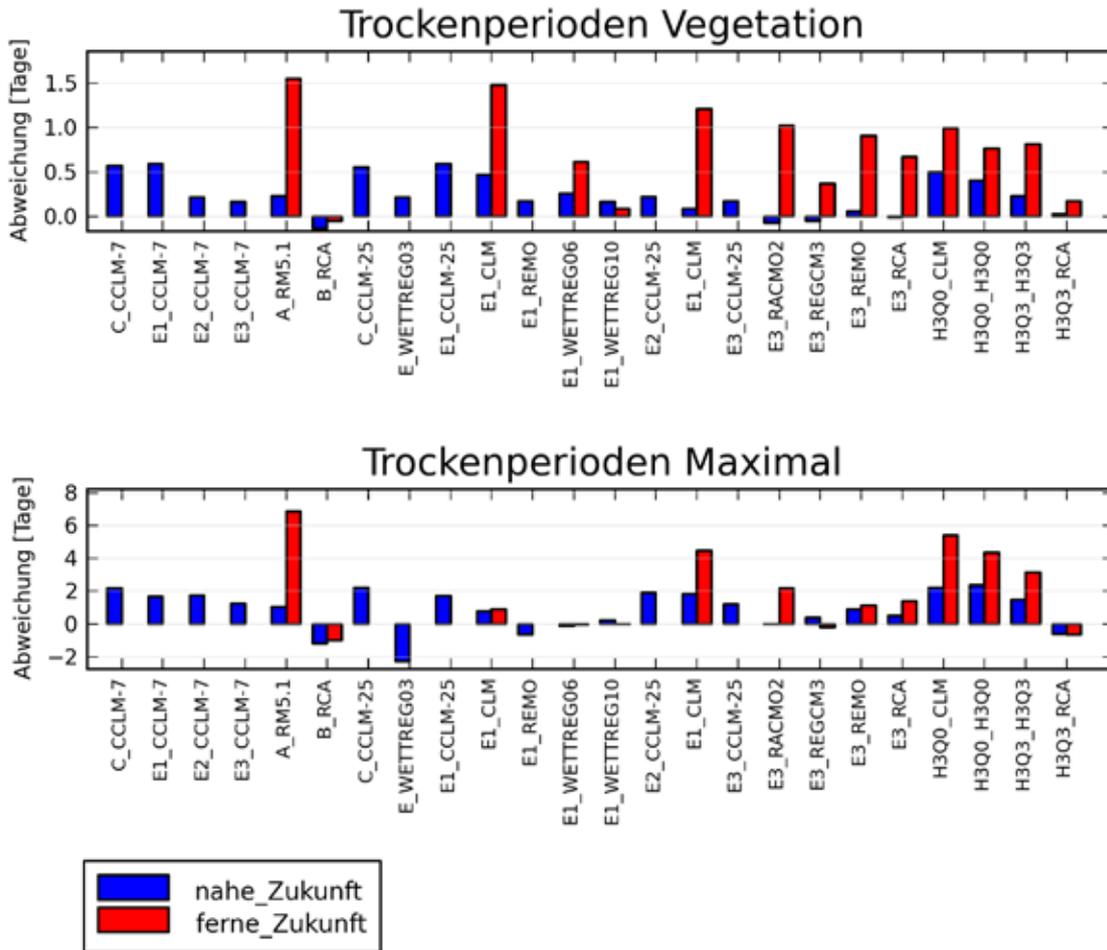
Anlage G-02: Klimasignal der Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



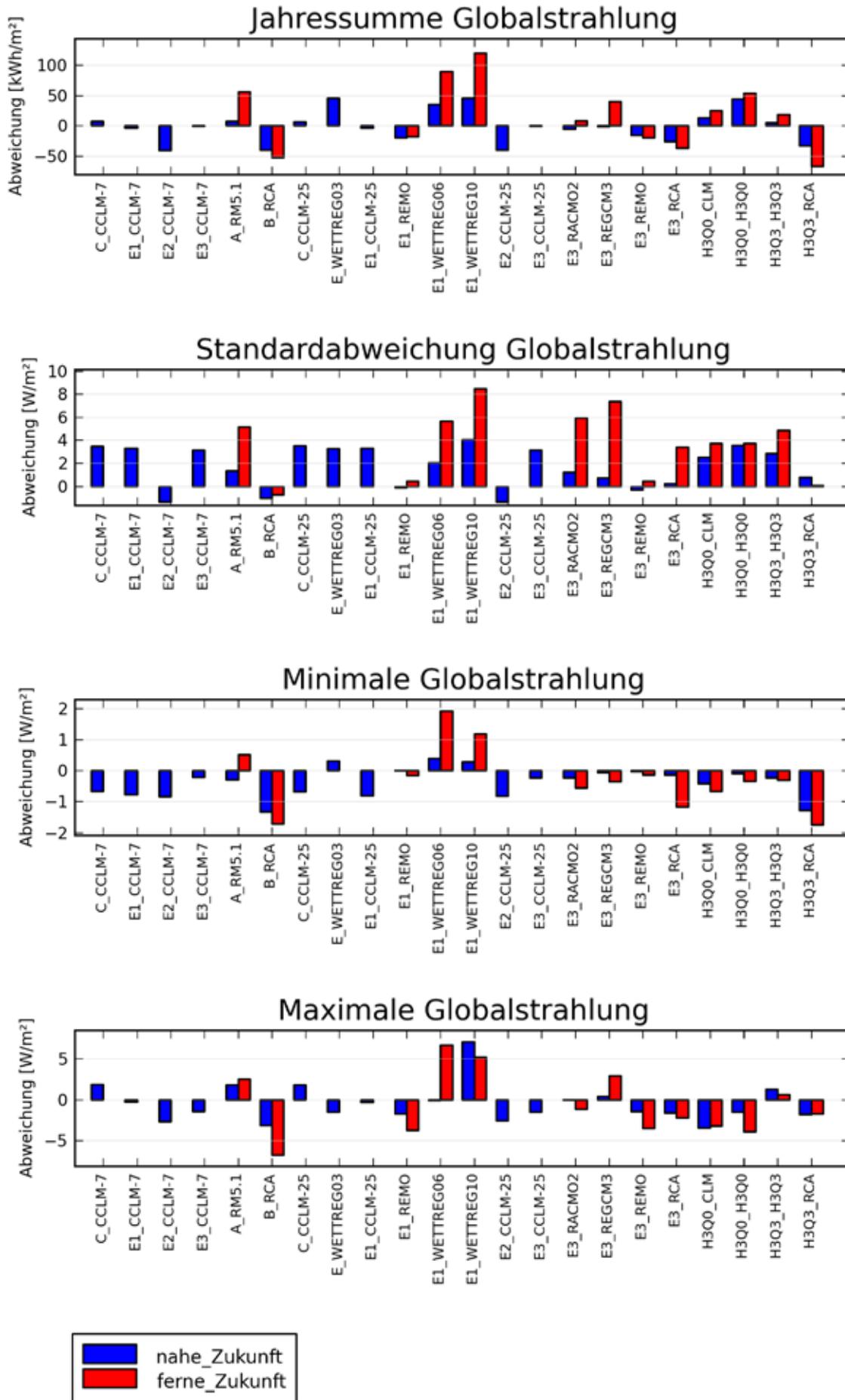
Anlage G-02: Klimasignal der Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



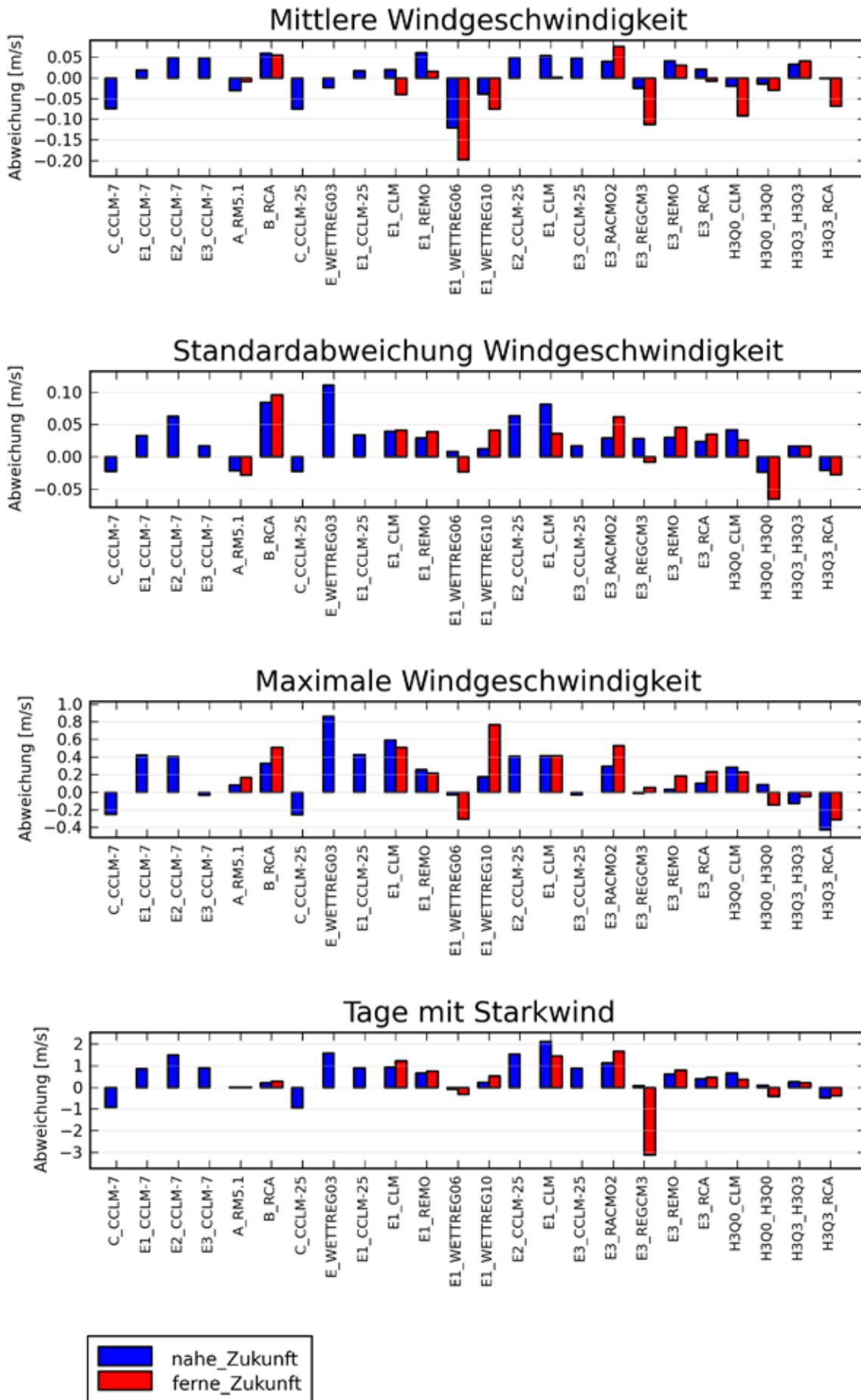
Anlage G-02: Klimasignal der Kennzahlen des Niederschlags als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



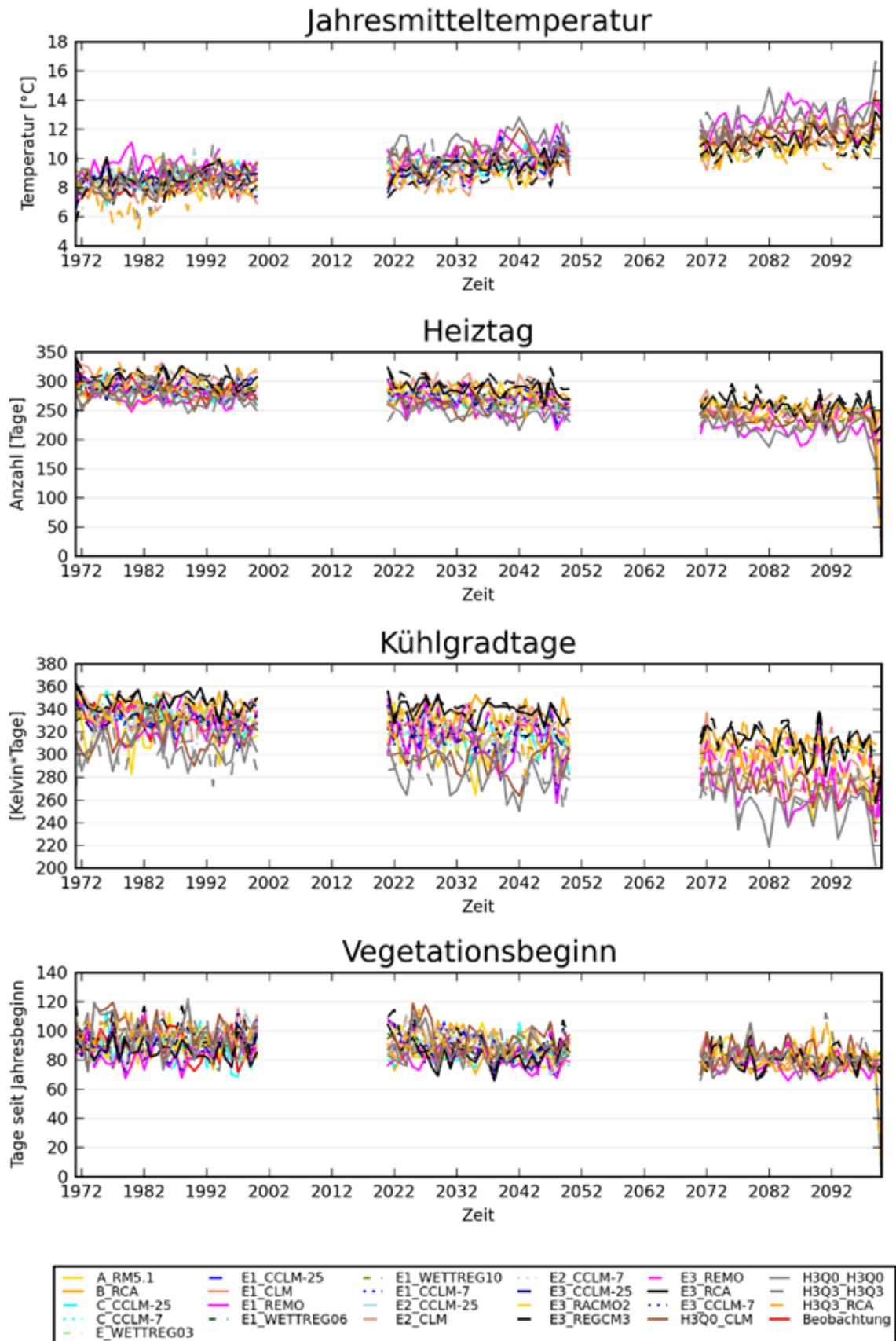
Anlage G-03: Klimasignal der Kennzahlen der Globalstrahlung als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



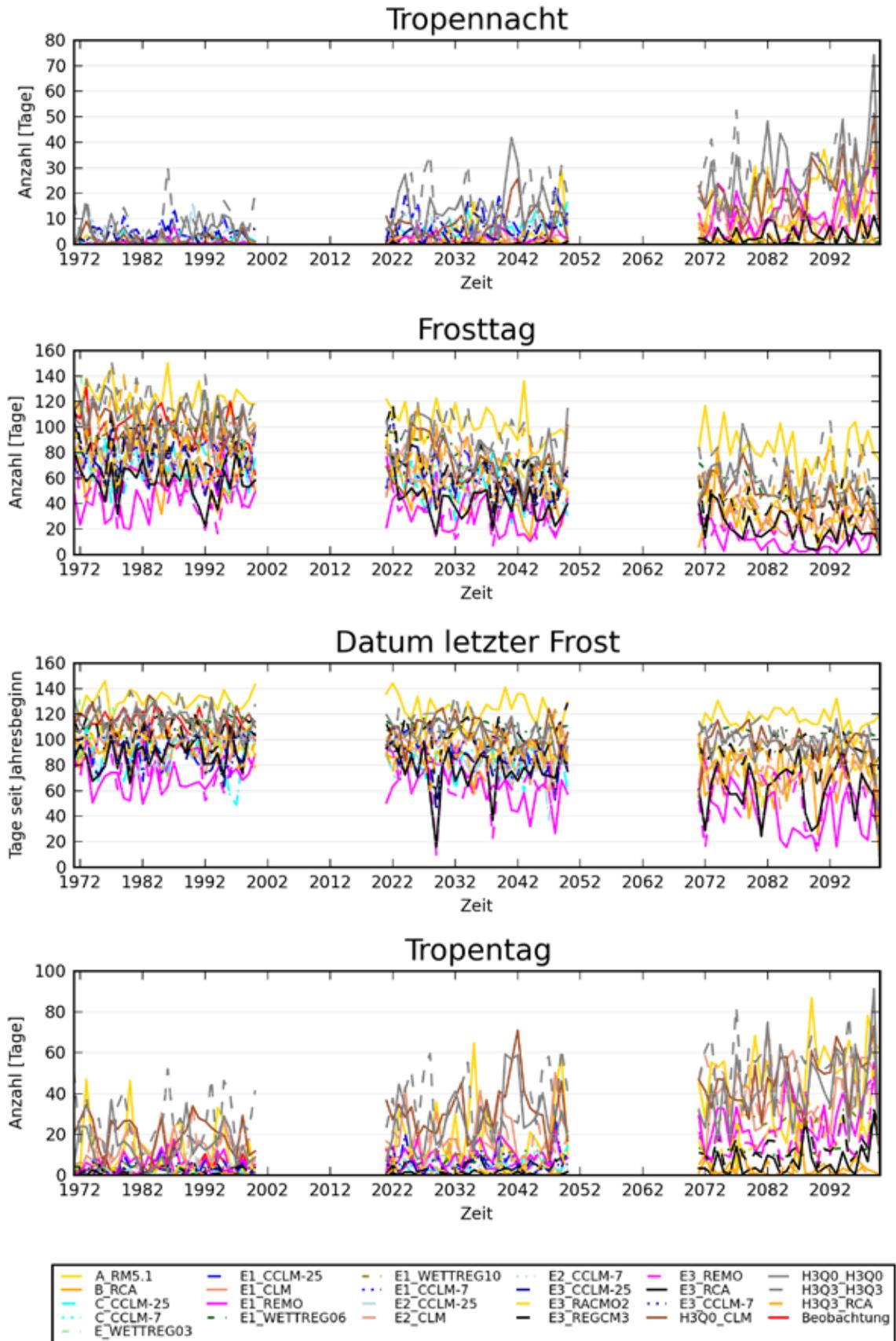
Anlage G-04: Klimasignal der Kennzahlen der Windgeschwindigkeit als Mittel über Baden-Württemberg für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)



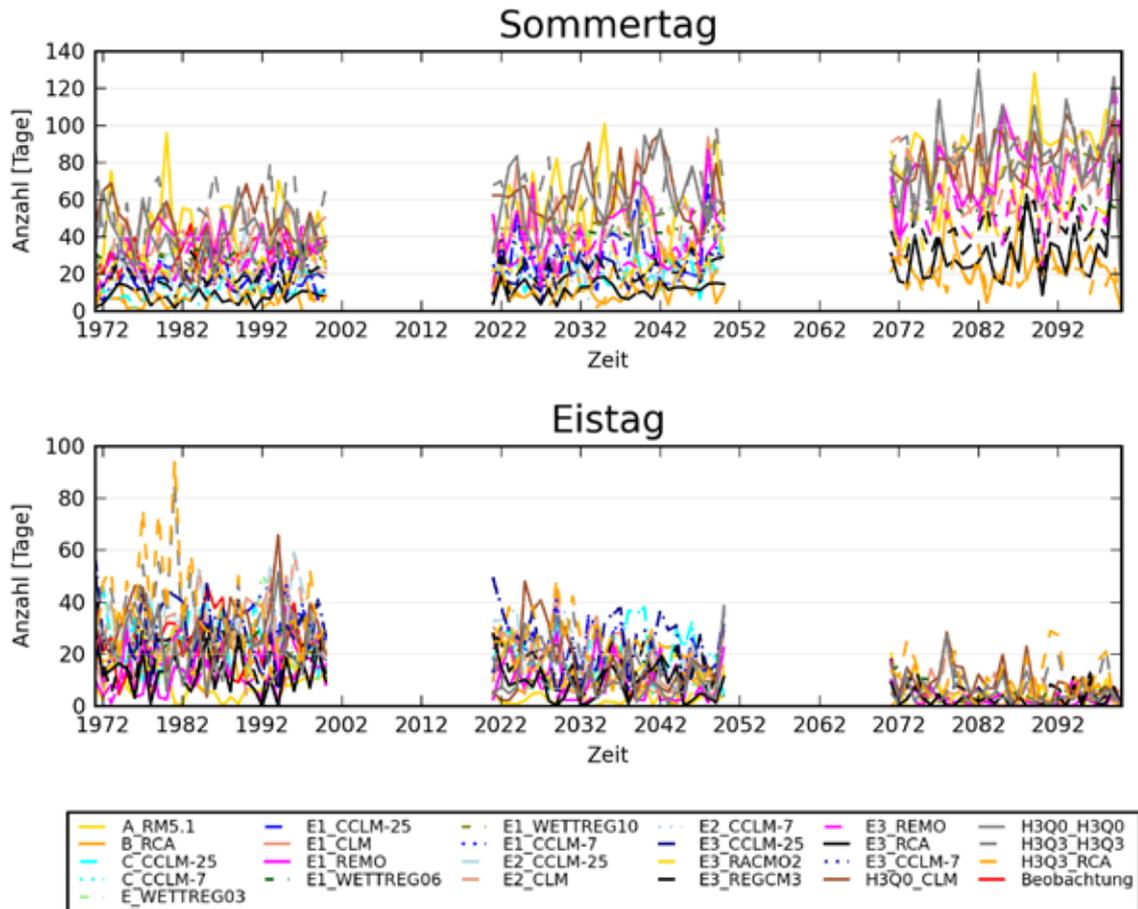
Anlage H-01: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen der Temperatur auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)



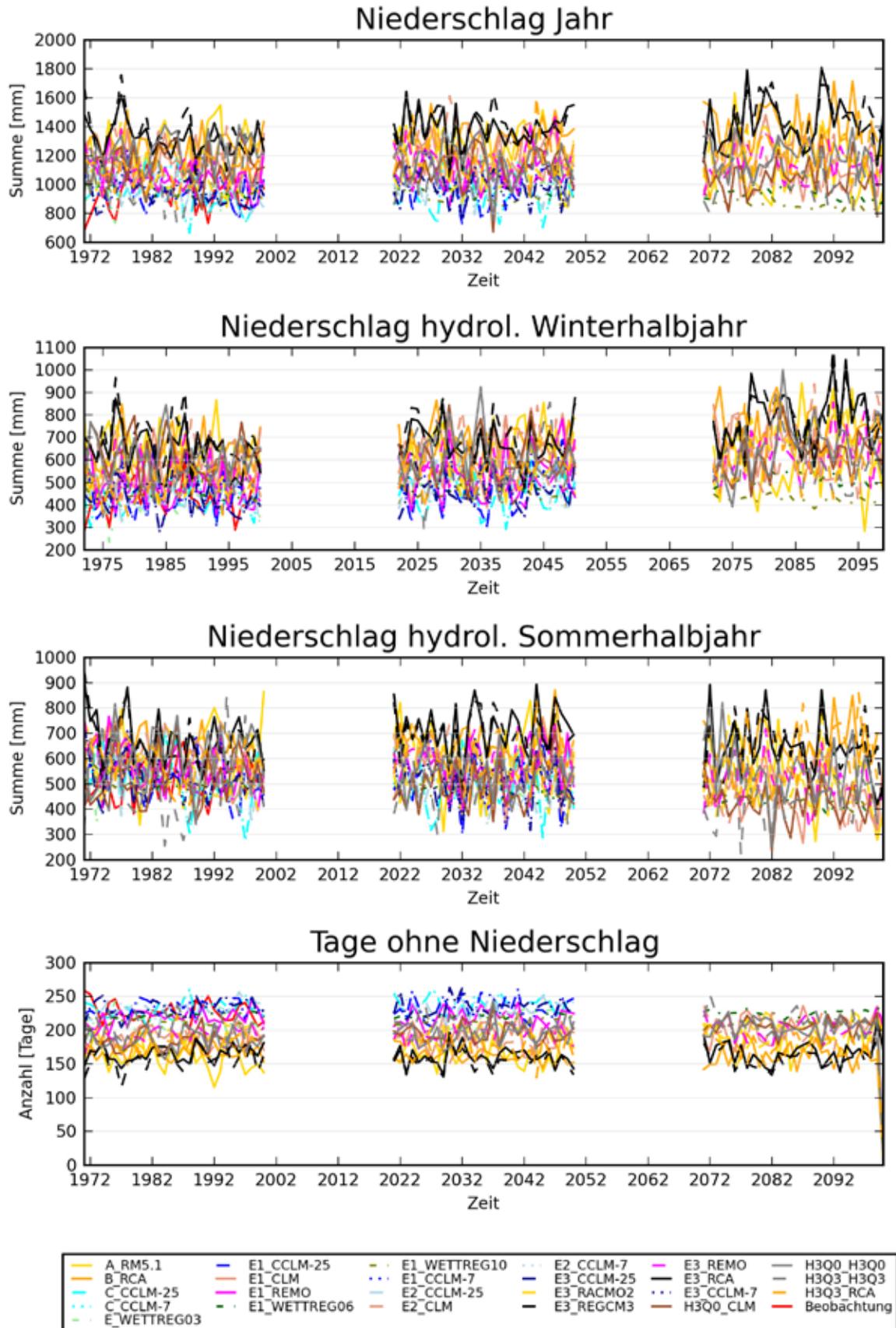
Anlage H-01: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen der Temperatur auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)



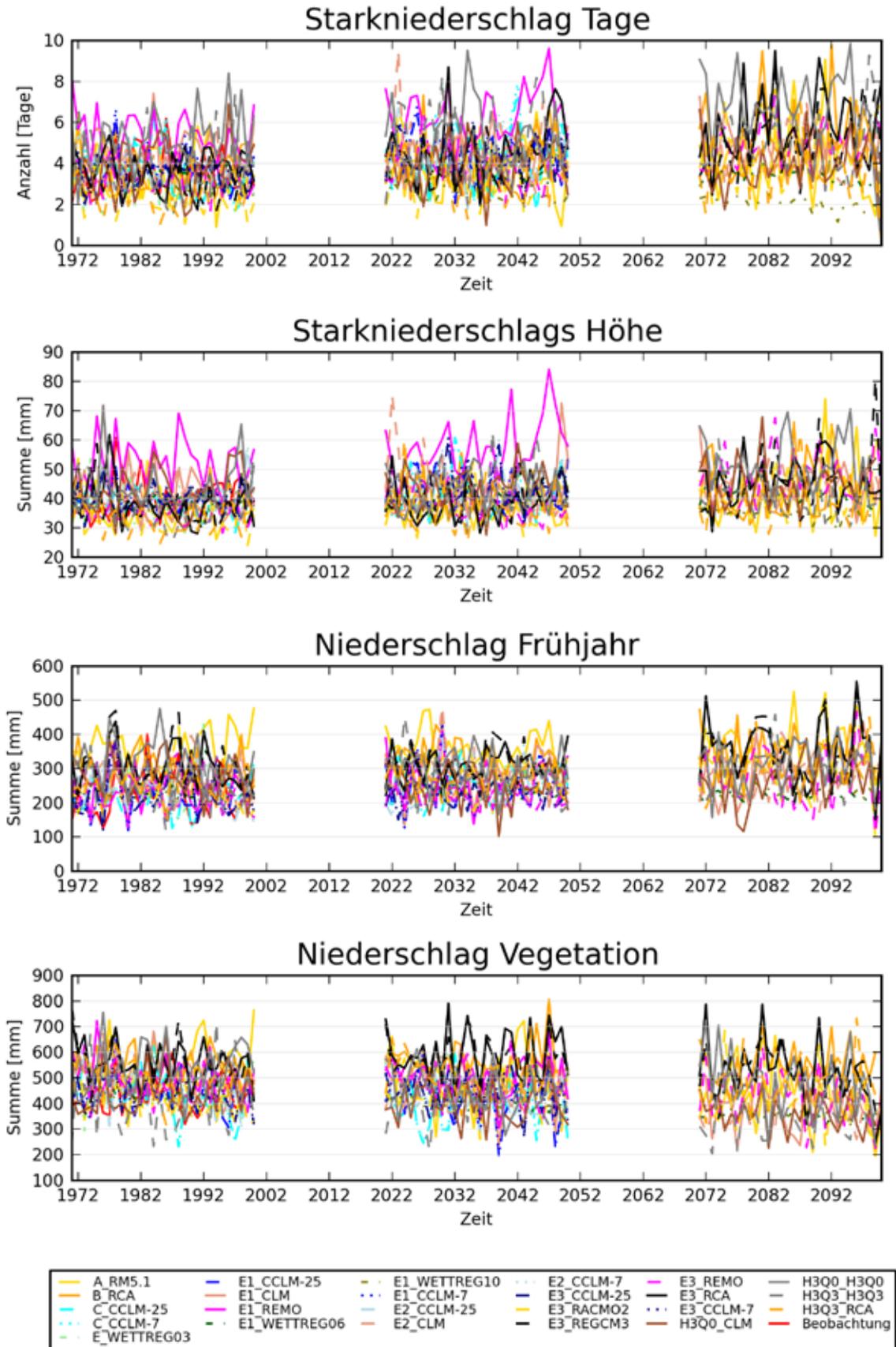
Anlage H-01: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen der Temperatur auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)



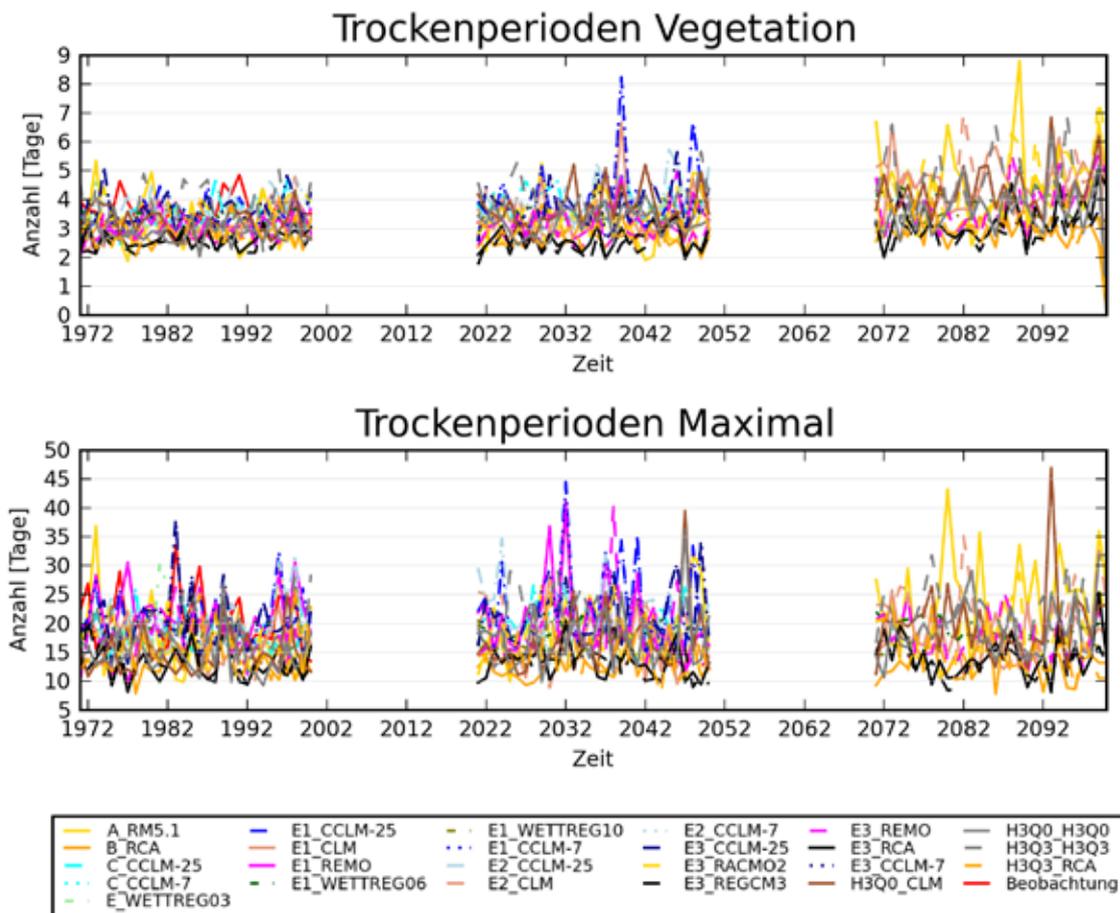
Anlage H-02: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen des Niederschlags auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)



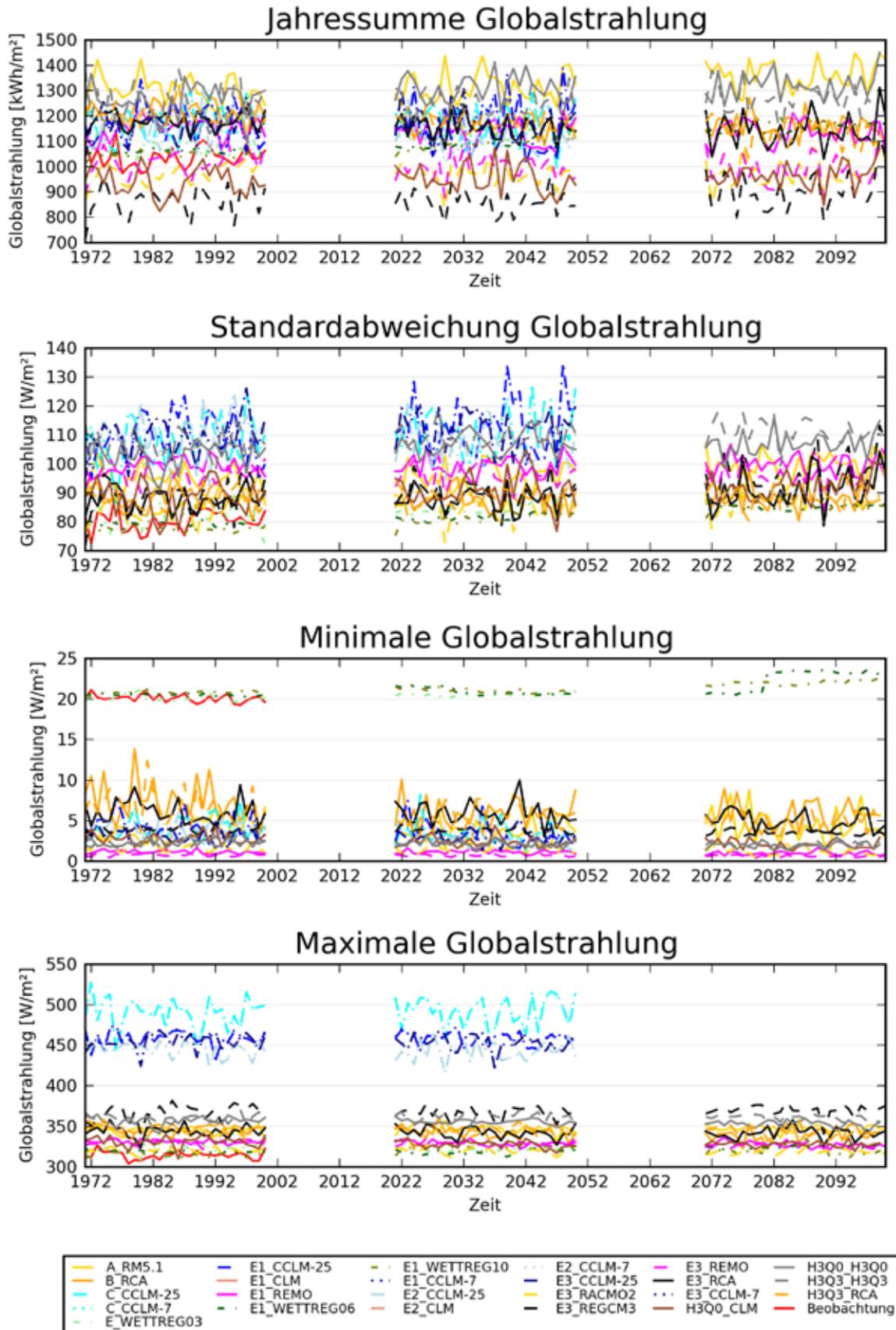
Anlage H-02: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen des Niederschlags auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)



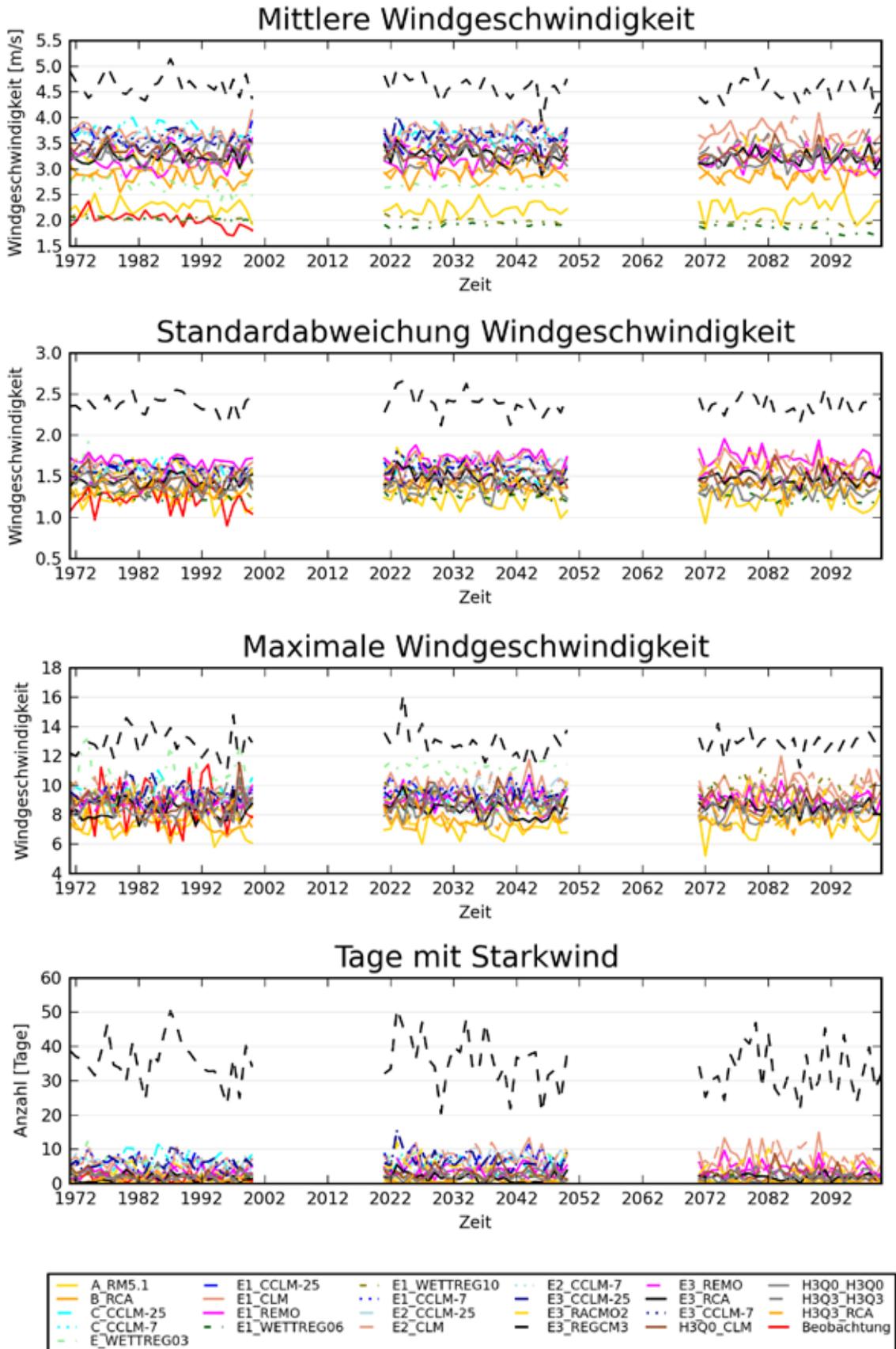
Anlage H-02: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen des Niederschlags auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)



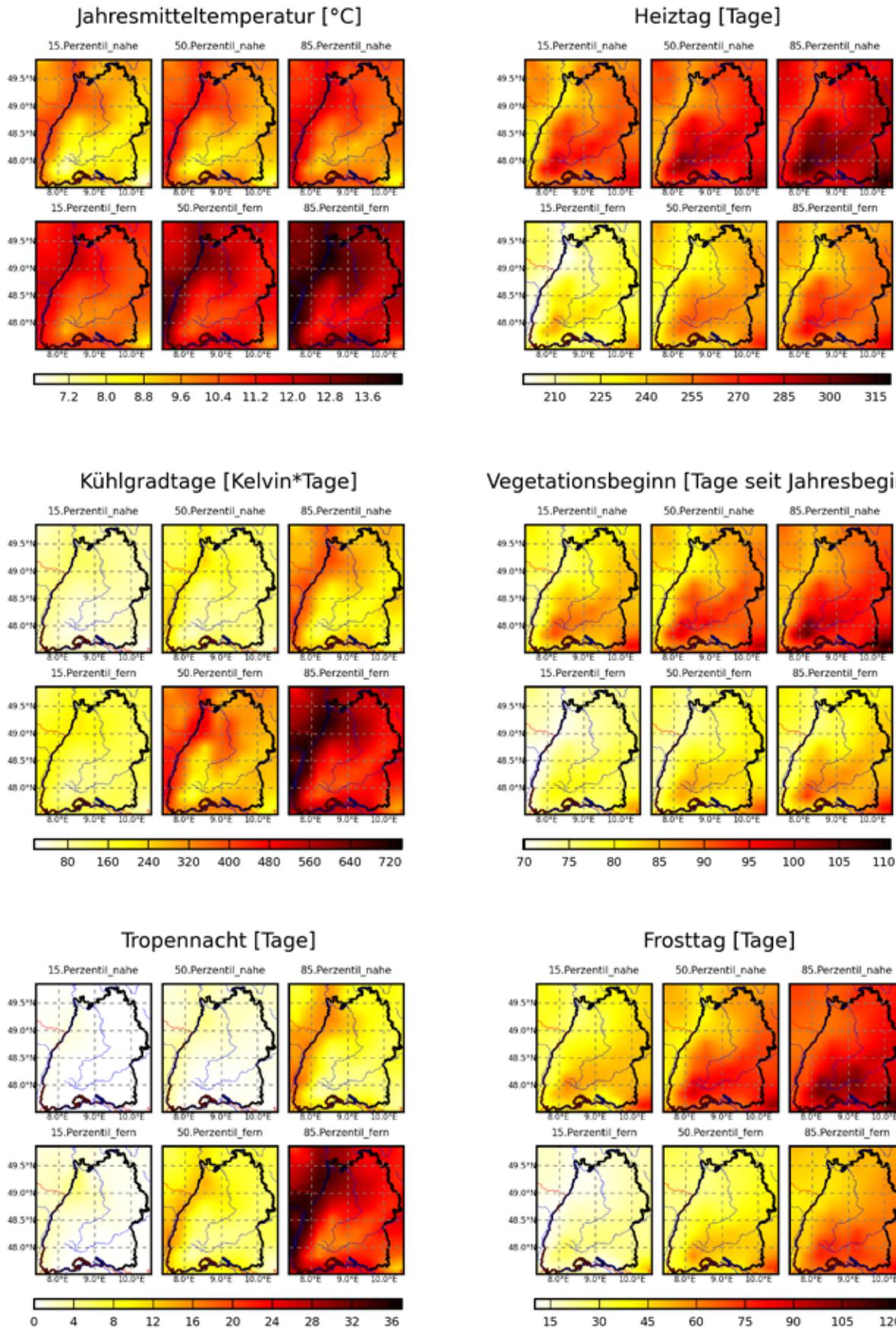
Anlage H-03: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen der Globalstrahlung auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)



Anlage H-04: Jahresscharfe Darstellungen der Kennzahlen der Windgeschwindigkeit auf Basis des Auswerte-Ensembles für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100)

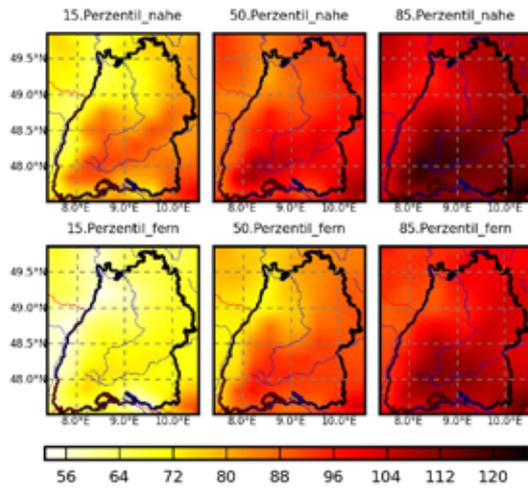


Anlage I-01: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Temperatur auf Basis von 20 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) und von 15 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)

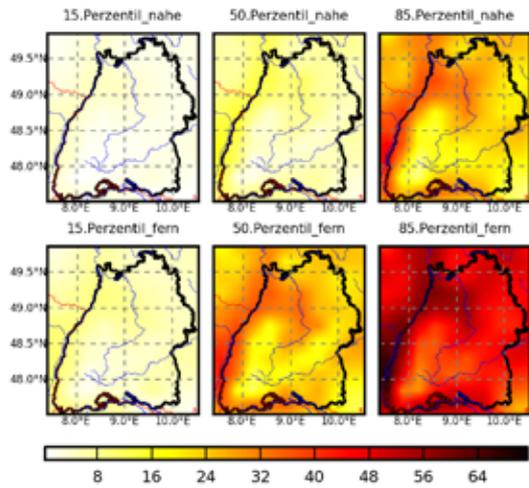


Anlage I-01: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Temperatur auf Basis von 20 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) und von 15 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)

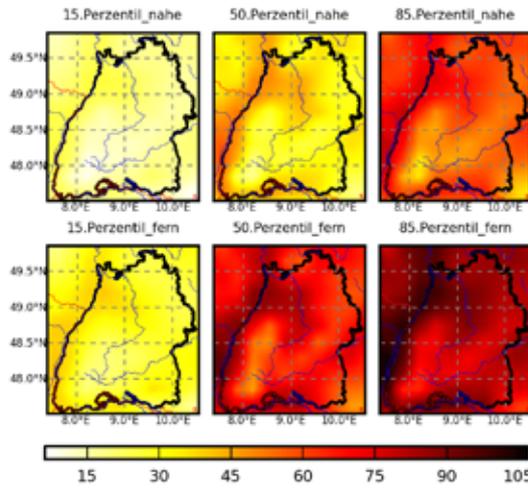
Datum letzter Frost [Tage seit Jahresbeginn]



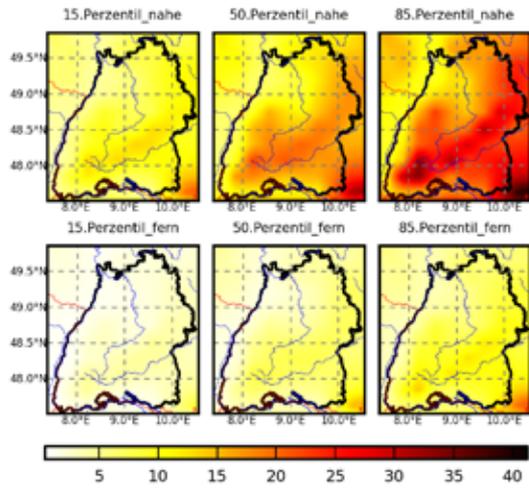
Tropentag [Tage]



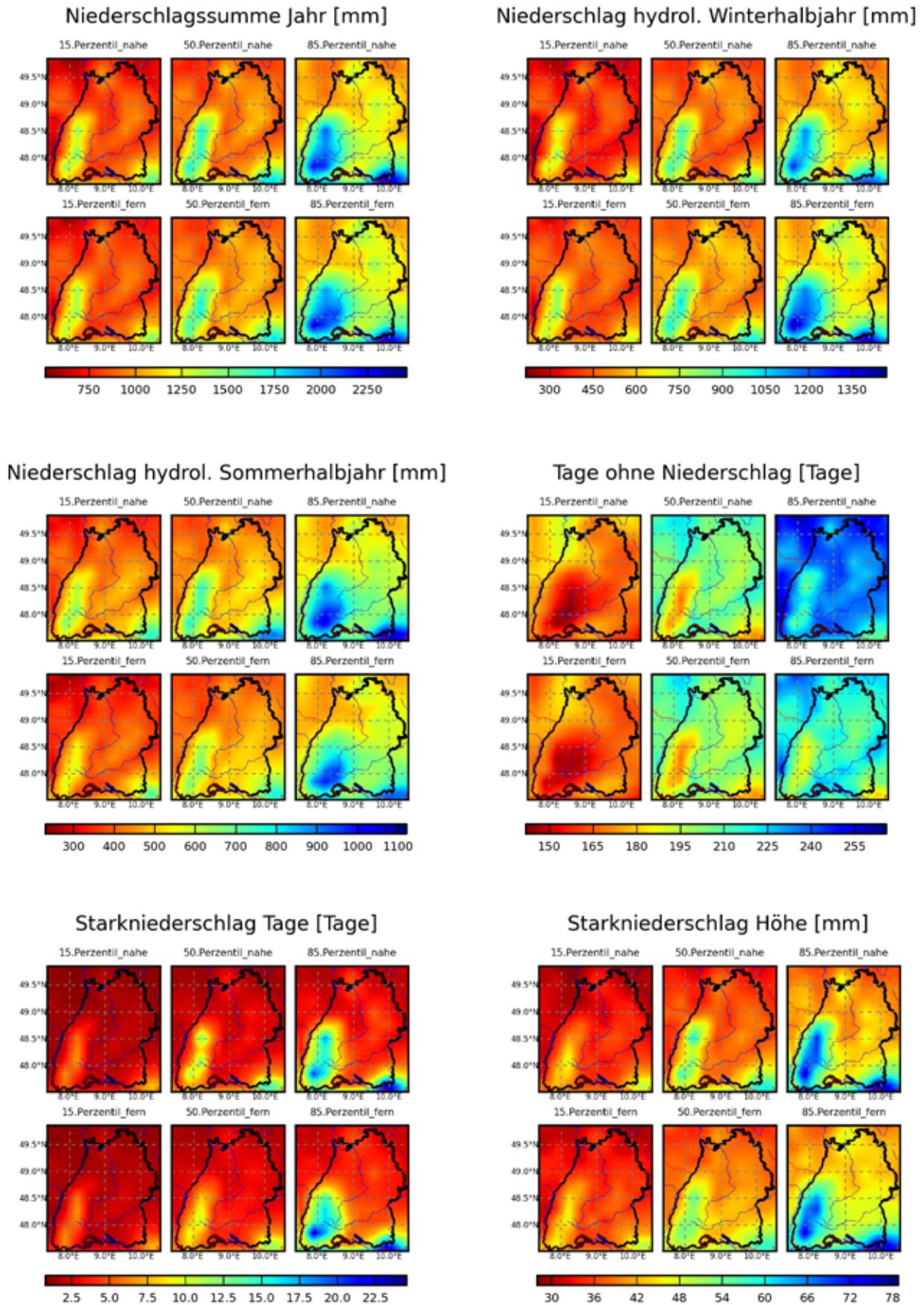
Sommertag [Tage]



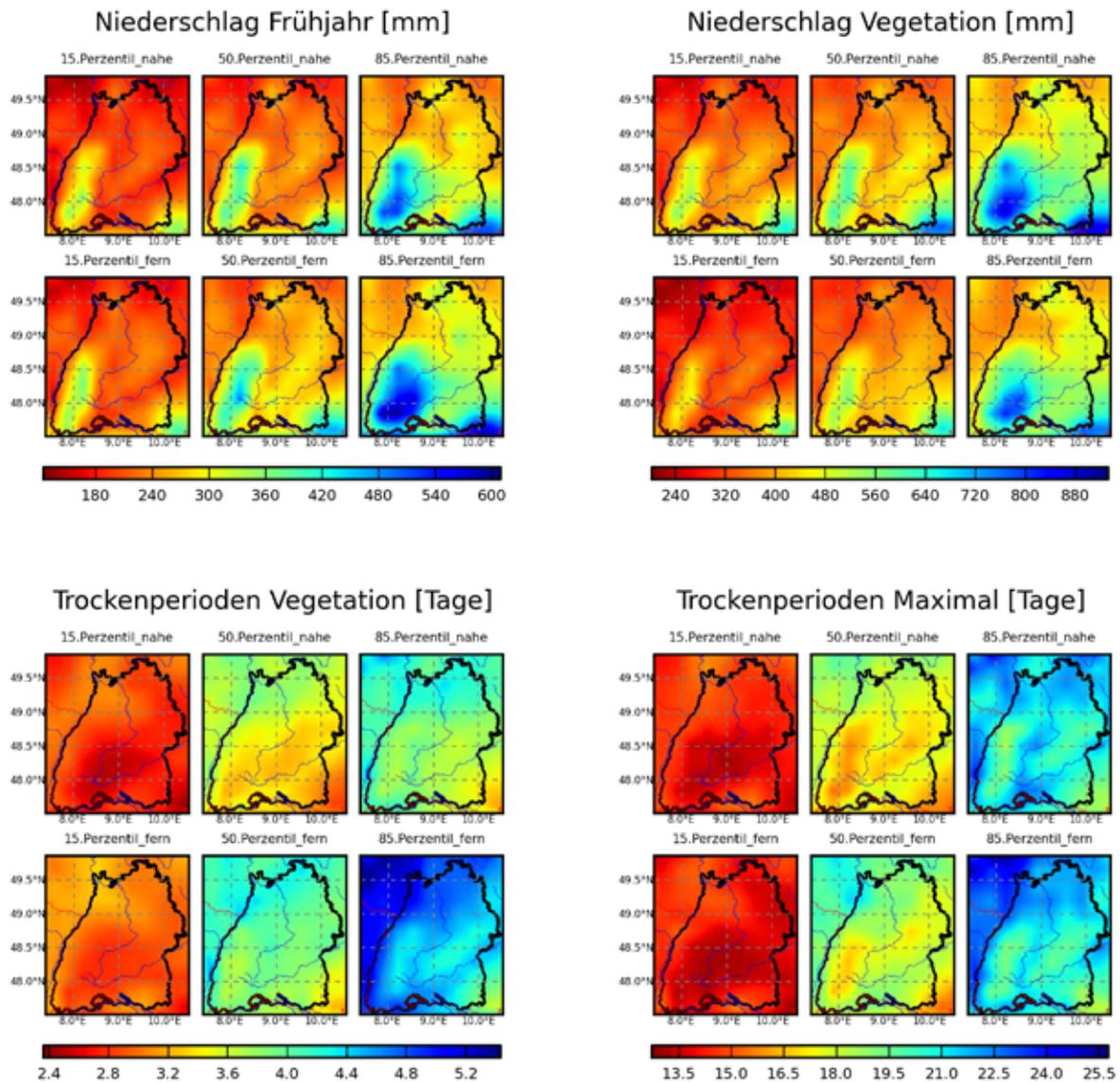
Eistag [Tage]



Anlage I-02: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen des Niederschlags auf Basis von 20 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) und von 14 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)

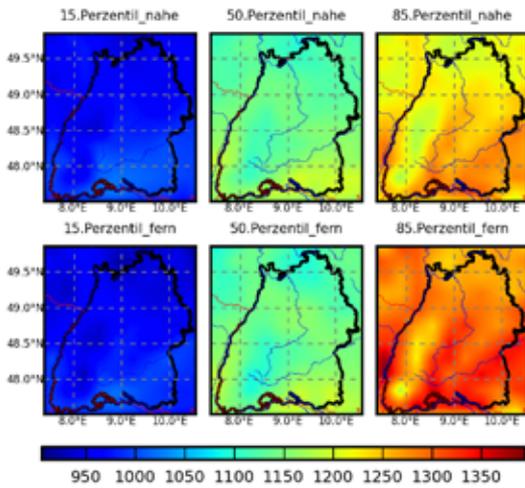


Anlage I-02: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen des Niederschlags auf Basis von 20 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) und von 14 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft (2071-2100) (25x25-km-Auflösung)

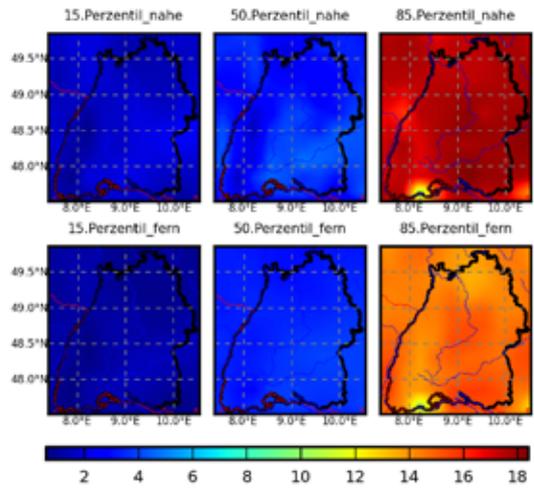


Anlage I-03: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Globalstrahlung auf Basis von 20 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) und von 13 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft (2071-2100) (25x25-km-Auflösung)

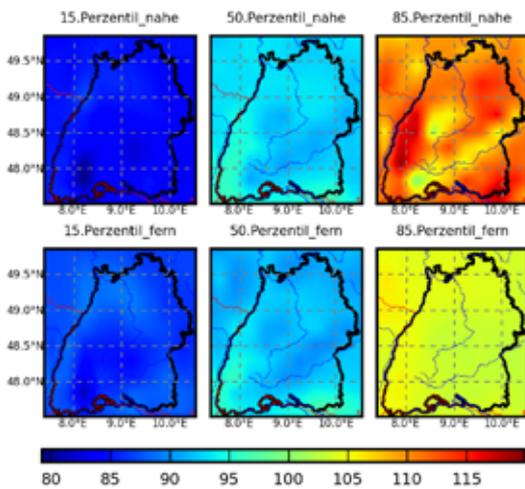
Jahressumme Globalstrahlung [kWh/m²]



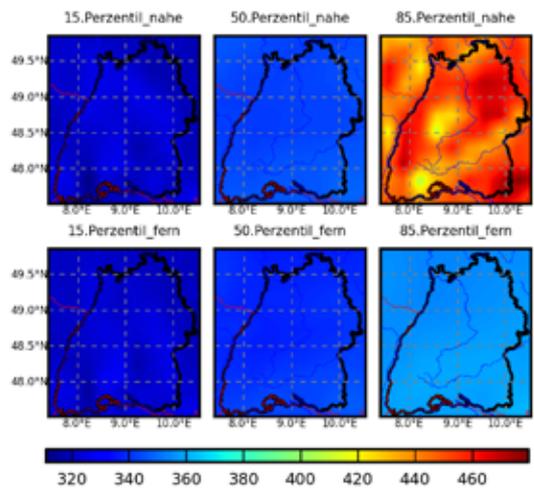
Standardabw. Globalstrahlung [W/m²]



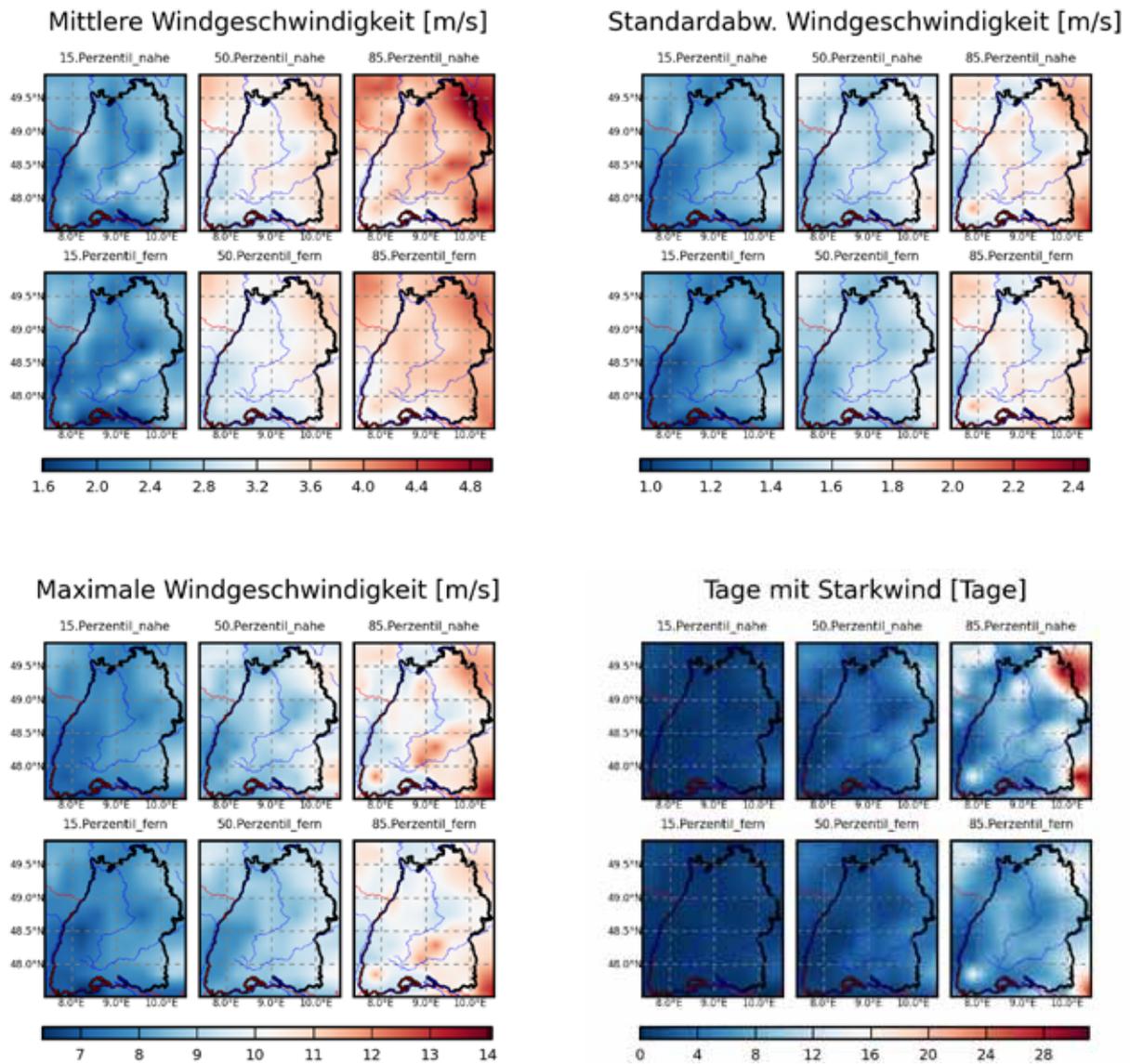
Minimale Globalstrahlung [W/m²]



Maximale Globalstrahlung [W/m²]

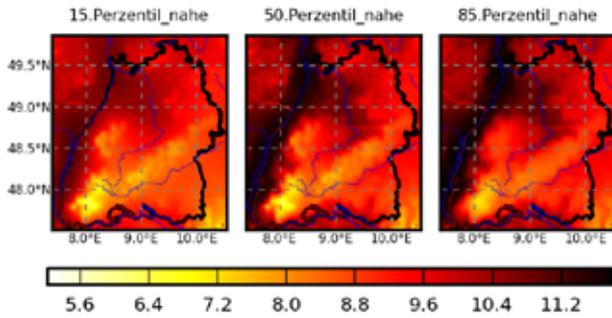


Anlage I-04: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit auf Basis von 20 Klima-projektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) und von 15 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft (2071-2100) (25x25-km²-Auflösung)

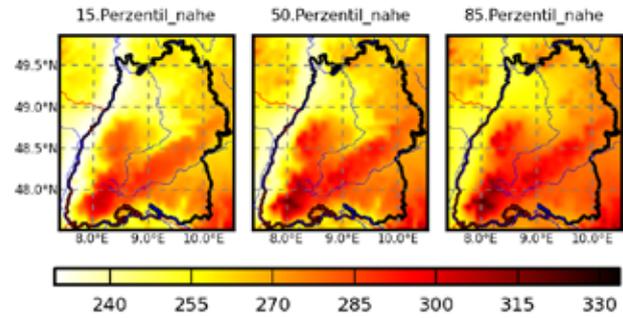


Anlage I-05: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Temperatur auf Basis der 4 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)

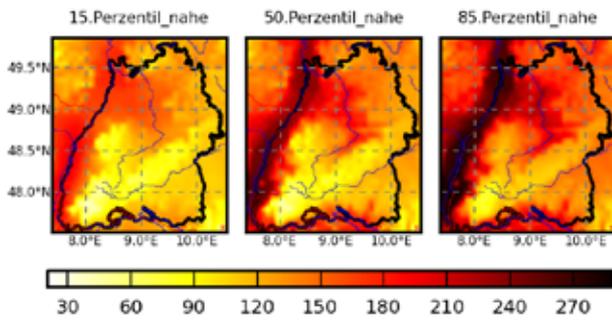
Jahresmitteltemperatur [°C]



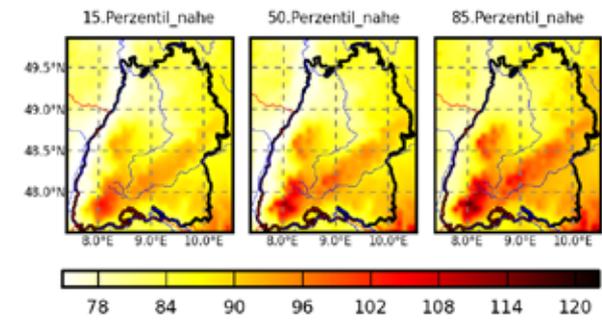
Heiztag [Tage]



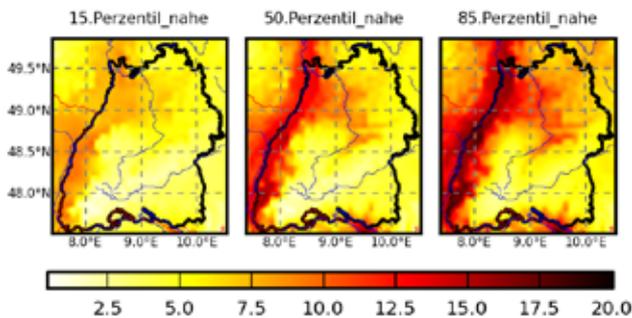
Kühlgradtage [Kelvin*Tage]



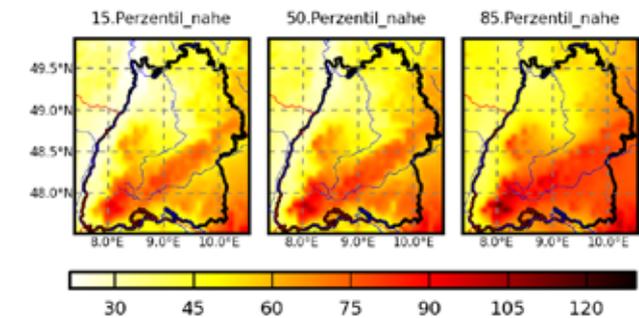
Vegetationsbeginn [Tage seit Jahresbeginn]



Tropennacht [Tage]

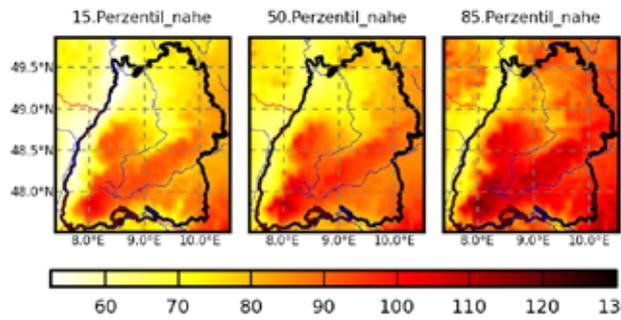


Frosttag [Tage]

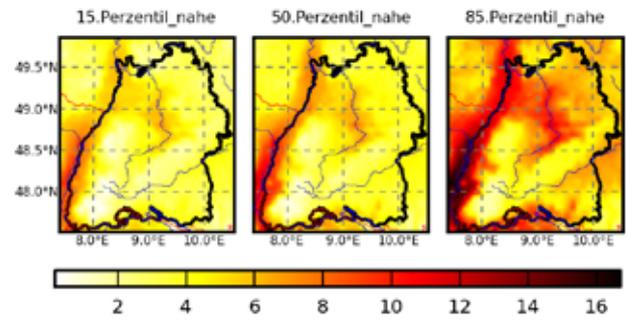


Anlage I-05: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Temperatur auf Basis der 4 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)

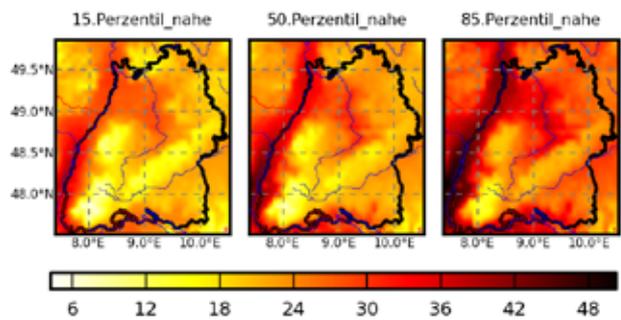
Datum letzter Frost [Tage seit Jahresbeg



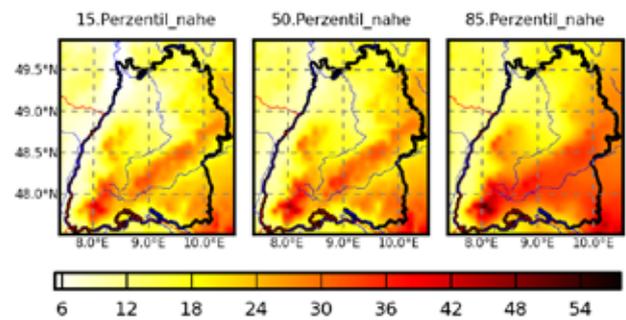
Tropentag [Tage]



Sommertag [Tage]

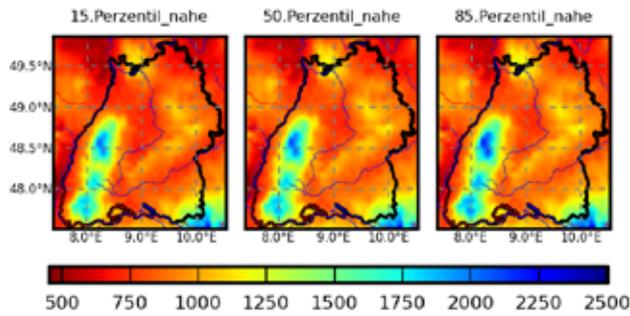


Eistag [Tage]

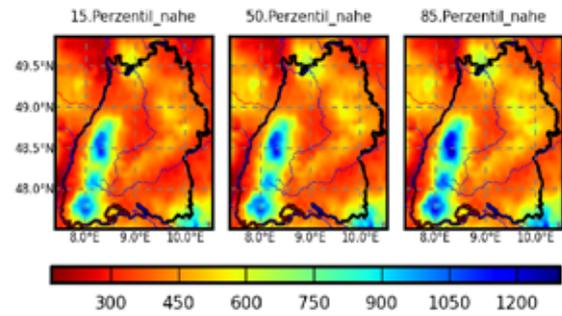


Anlage I-06: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen des Niederschlags auf Basis der 4 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)

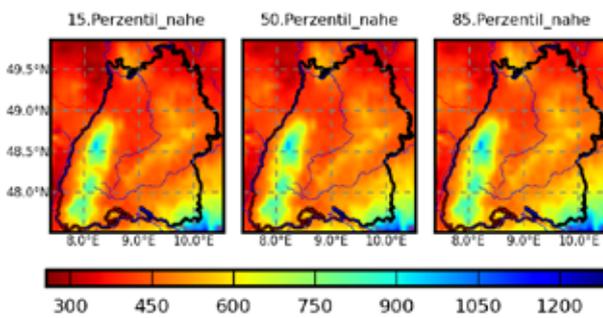
Niederschlag Jahr [mm]



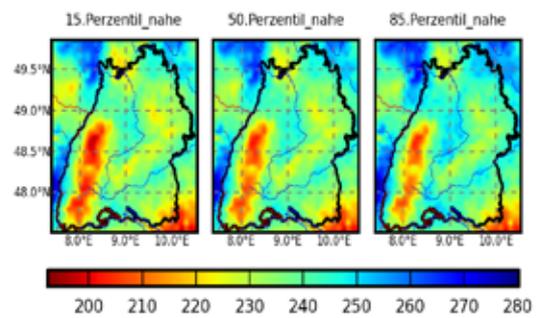
Niederschlag hydrol. Winterhalbjahr [mm]



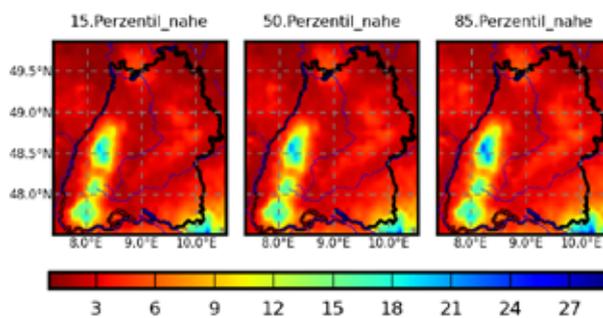
Niederschlag hydrol. Sommerhalbjahr [mm]



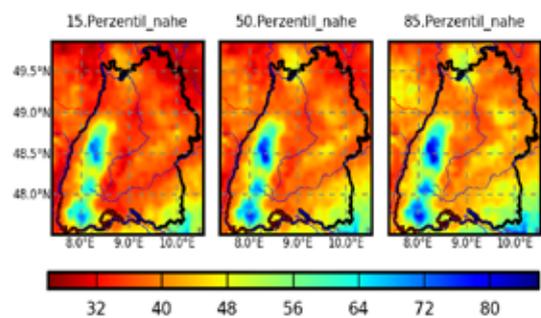
Tage ohne Niederschlag [Tage]

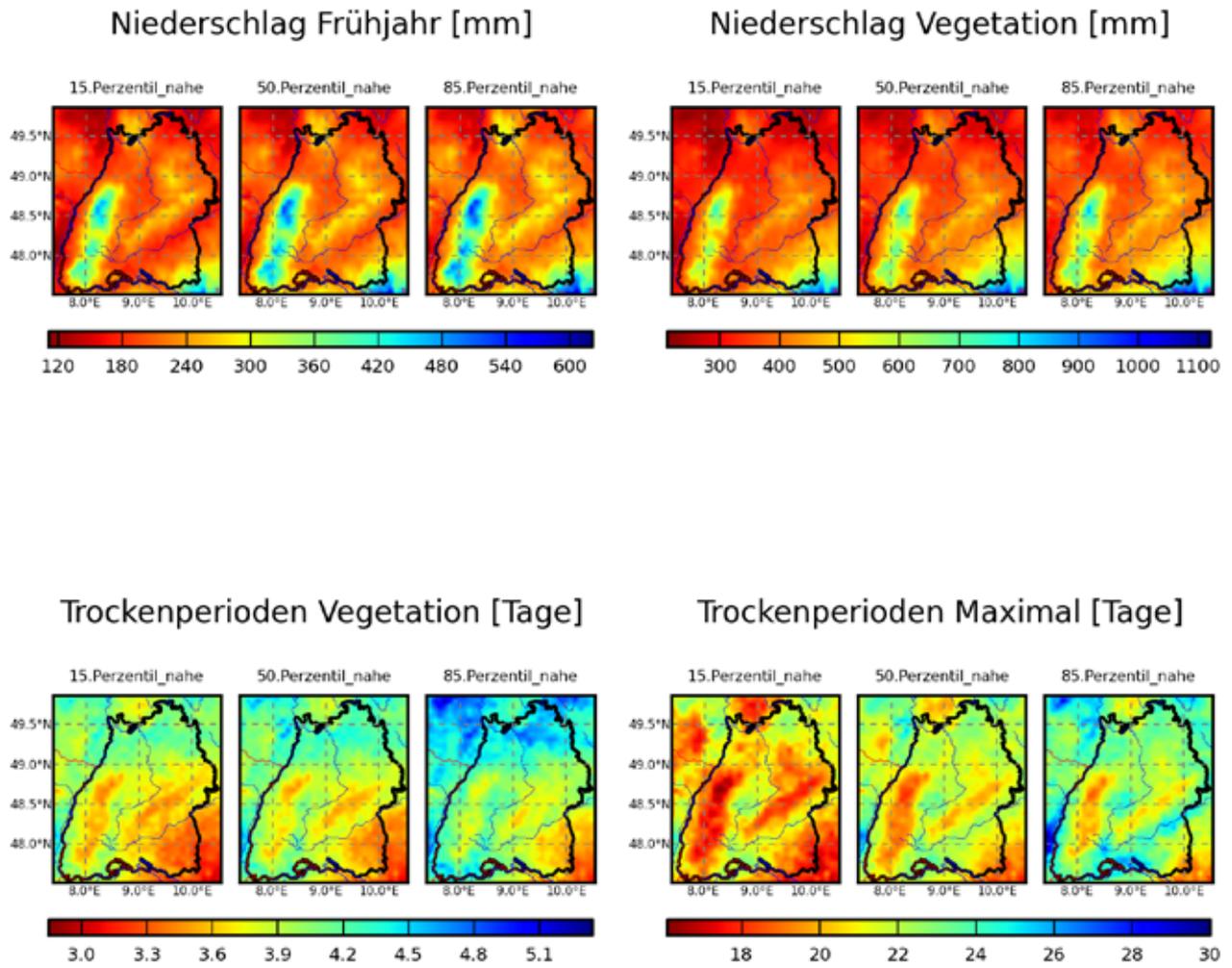


Starkniederschlag Tage [Tage]



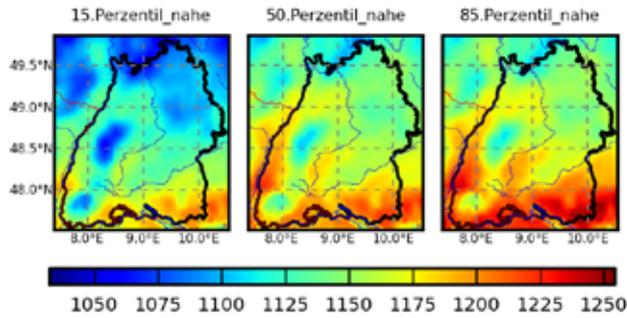
Starkniederschlag Höhe [mm]



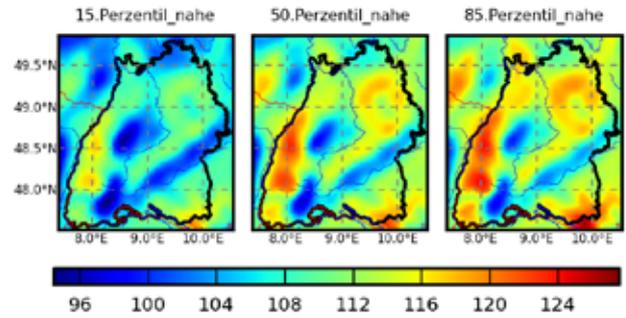


Anlage I-07: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Globalstrahlung auf Basis der 4 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)

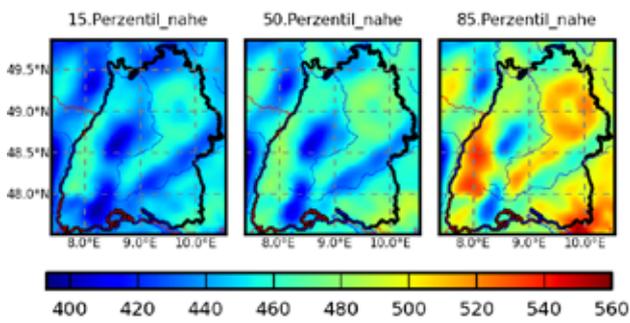
Jahressumme Globalstrahlung [kWh/m²]



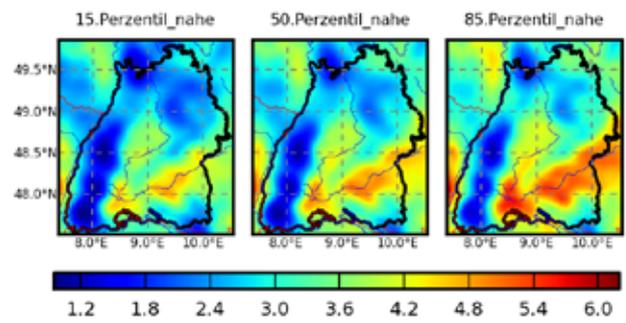
Standardabw. Globalstrahlung [W/m²]



Maximale Globalstrahlung [W/m²]

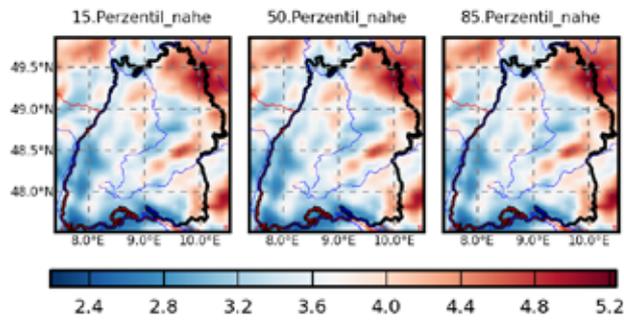


Minimale Globalstrahlung [W/m²]

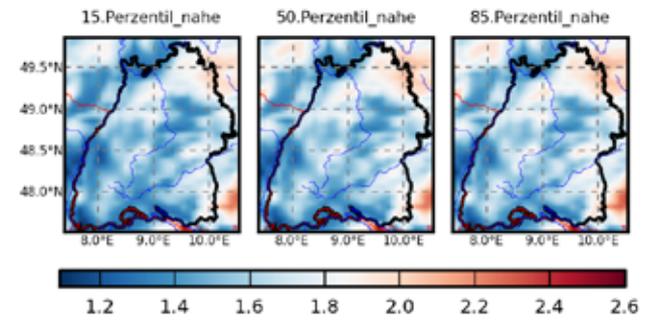


Anlage I-08: Flächenhafte Darstellungen der Perzentile für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit aus Basis der 4 Klima-projektionen für die nahe Zukunft (2021-2050) (7x7-km²-Auflösung)

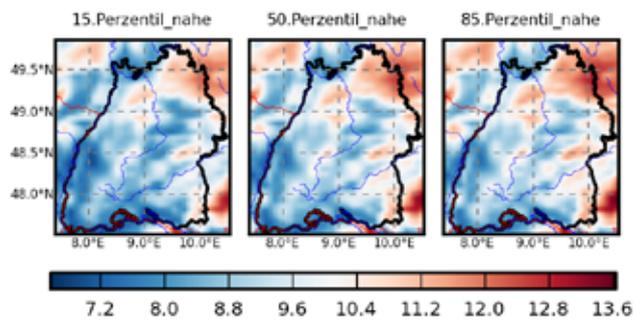
Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]



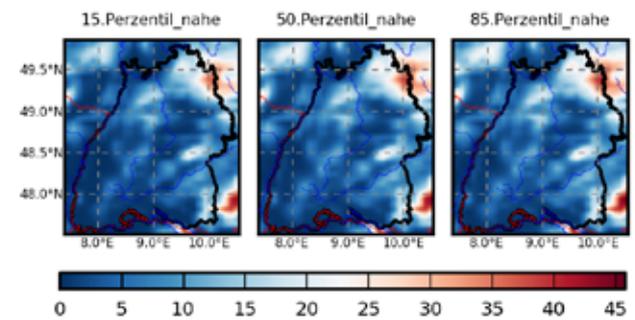
Standardabw. Windgeschwindigkeit [m/s]



Maximale Windgeschwindigkeit [m/s]



Starkwind Tage [Tage]



Erläuterung zu den Abkürzungen in den Tabellen der ANLAGE J:

„min“, „med“, „max“:

Werte für das Minimum, den Median und das Maximum aller Klimaprojektionen.

„abw-min“, „abw-med“, „abw-max“:

Abweichungen der Modelldaten von den Beobachtungsdaten (Ist-Zustand) bzw. Abweichungen der Modelldaten des Zukunftsszenarios vom Ist-Zustand, je nach Kennzahl absolut oder prozentual berechnet. Angegeben werden das Minimum, der Median und das Maximum der Abweichung.

„p15“, „p50“, „p85“:

Ergebnisse für das 15., 50. bzw. 85. Perzentil jeder Kennzahl aus den Klimaprojektionen. Die Perzentile werden zweimal aufgeführt:

- „p15.0“, „p50.0“, „p85.0“: Perzentile aus der Auswertung aller verfügbaren Klimaprojektionen (24 Klimaprojektionen in der nahen Zukunft, 15 Klimaprojektionen in der fernen Zukunft).
- „p15.0 (25km)“, „p50.0 (25km)“, „p85.0 (25km)“: Perzentile aus der Auswertung der 20 Klimaprojektionen mit 25x25 km²-Auflösung. Hier ergeben sich Unterschiede zwischen den Werten des Medians („med“) und dem 50. Perzentil („p50.0 (25km)“) bei der nahen Zukunft, da die vier CCLM-Modelle in der 7x7 km²-Auflösung bei der Perzentilberechnung „p15 (25km)“, „p50 (25km)“ und „p85 (25km)“ nicht berücksichtigt werden.

Die Erläuterung der Kürzel zur Bezeichnung der Kennzahlen sowie die Definition der Kennzahlen sind im Bericht im Abschnitt 3.3 dargelegt.

Anlage J-01: Übersicht über die Kennzahlen der Temperatur für die Beobachtungsdaten und für die Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen

SRES-Szenario	T Mittel	Heiztag	Kühlgradtage	Veg-Beginn	Tropennacht	Frosttag	Letzter Frost	Tropentag	Sommertag	Eistag
C_CCLM-7	8,4	283,9	63,1	89,8	1,6	69,6	89,2	0,8	10,8	26,0
E1_CCLM-7	8,4	288,6	96,3	91,0	4,0	77,8	95,6	3,4	18,0	29,7
E2_CCLM-7	8,4	287,4	92,5	91,8	3,2	75,2	91,4	2,5	17,9	30,8
E3_CCLM-7	8,5	287,4	92,1	91,9	3,3	77,4	92,0	2,2	18,1	29,4
A_RM5.1	8,3	282,6	121,8	95,3	0,8	121,4	131,2	10,5	39,4	8,7
B_RCA	9,1	280,6	59,8	88,0	0,4	63,1	94,3	1,0	12,5	19,1
C_CCLM-25	8,5	282,8	64,6	89,5	1,6	69,0	88,9	0,8	11,0	25,7
E_WETTREG03	8,5	283,0	87,9	91,5	0,1	96,7	113,8	5,0	31,8	26,7
E1_CCLM-25	8,5	287,7	97,9	90,8	4,1	77,0	94,9	3,5	18,3	29,2
E1_CLM	8,2	298,8	93,0	91,9	0,6	81,7	96,7	13,3	36,1	26,8
E1_REMO	9,4	273,3	105,0	84,3	1,1	45,9	70,1	5,8	32,5	15,8
E1_WETTREG06	8,3	286,0	78,9	92,0	0,1	99,0	113,7	4,4	30,1	25,4
E1_WETTREG10	8,4	286,3	65,8	90,9	0,1	94,9	107,7	3,5	28,0	21,8
E2_CCLM-25	8,5	286,5	94,1	91,5	3,2	74,5	91,1	2,6	18,2	30,4
E2_CLM	7,9	300,4	84,0	97,8	0,3	85,1	100,3	12,1	34,7	27,6
E3_CCLM-25	8,5	287,3	92,0	91,8	3,3	77,1	91,8	2,2	18,1	29,1
E3_RACMO2	8,8	291,1	74,9	90,2	0,4	77,3	101,2	3,1	23,1	16,4
E3_REGCM3	7,8	312,3	35,8	98,0	0,0	84,7	108,9	2,3	19,3	19,1
E3_REMO	9,0	285,9	75,8	91,1	0,3	48,9	79,4	4,0	26,6	13,5
E3_RCA	8,8	303,8	31,8	86,4	0,0	57,8	88,6	0,3	7,9	12,6
H3Q0_CLM	8,2	279,0	148,2	101,5	2,0	98,5	115,9	19,6	45,4	29,6
H3Q0_H3Q0	8,8	270,2	184,3	96,6	4,7	108,9	115,5	13,2	38,7	24,2
H3Q3_H3Q3	8,5	279,0	273,3	99,6	8,6	114,0	118,2	25,3	48,7	32,9
H3Q3_RCA	7,4	305,4	29,9	98,8	0,1	92,7	96,1	0,4	7,1	37,7
Beobachtung	8,4	286,6	77,0	90,9	0,1	97,0	113,7	4,0	30,2	23,4
min (25 km)	7,4	270,2	29,9	84,3	0,0	45,9	70,1	0,3	7,1	8,7
med (25 km)	8,5	286,1	85,9	91,6	0,5	83,2	98,5	3,7	27,3	25,5
max (25 km)	9,4	312,3	273,3	101,5	8,6	121,4	131,2	25,3	48,7	37,7
abw-min (25 km)	-1,0	-16,4	-47,1	-6,6	-0,1	-51,1	-43,6	-3,7	-23,1	-14,7
abw-med (25 km)	0,1	-0,5	8,9	0,7	0,4	-13,8	-15,1	-0,3	-2,9	2,1
abw-max (25 km)	1,1	25,7	196,3	10,6	8,5	24,3	17,5	21,3	18,5	14,2
p15.0	8,2	279,2	60,2	89,5	0,1	63,7	88,9	0,8	11,2	15,8
p50.0	8,5	286,4	89,9	91,6	0,8	77,6	95,9	3,4	21,2	26,4
p85.0	8,8	300,3	120,1	98,0	4,0	98,9	115,3	13,1	38,5	30,3
p15.0 (25 km)	8,0	279,0	47,8	88,7	0,1	60,5	88,7	0,9	11,8	14,6
p50.0 (25 km)	8,5	286,1	85,9	91,6	0,5	83,2	98,5	3,7	27,3	25,5
p85.0 (25 km)	8,9	302,1	135,0	98,4	3,7	103,9	115,7	13,3	39,1	30,0

Anlage J-02: Übersicht über die Kennzahlen der Temperatur für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (oben) und für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)

SRES-Szenario	T Mittel	Heiztag	Kühlgradtage	Veg-Beginn	Tropennacht	Frosttag	Letzter Frost	Tropentag	Sommertag	Eistag
C_CCLM-7	9,6	264,7	140,4	86,2	6,3	54,0	83,2	3,8	22,3	20,4
E1_CCLM-7	9,5	271,4	164,3	88,4	7,8	58,0	93,4	6,6	28,7	20,6
E2_CCLM-7	9,7	271,3	133,3	86,5	6,2	52,0	79,0	4,1	22,9	18,5
E3_CCLM-7	9,3	273,2	131,3	87,8	5,7	63,1	82,9	4,4	23,2	24,0
A_RM5.1	9,5	267,4	219,6	91,2	4,3	101,9	124,4	18,4	54,8	3,0
B_RCA	9,8	278,0	74,7	82,5	1,1	44,5	87,3	1,8	14,1	10,3
C_CCLM-25	9,6	263,8	142,9	86,0	6,5	53,5	82,7	3,9	22,8	20,2
E_WETTREG03	10,2	260,4	157,2	82,8	0,3	65,4	103,2	9,6	49,6	9,2
E1_CCLM-25	9,5	270,6	166,7	88,1	8,0	57,1	92,5	6,7	29,1	20,2
E1_CLM	9,2	282,7	150,7	89,1	1,6	61,8	92,4	19,6	46,5	17,7
E1_REMO	10,4	257,3	157,4	80,0	2,7	30,9	64,7	9,5	42,4	10,3
E1_WETTREG06	9,2	272,4	110,3	89,5	0,2	82,3	112,0	6,7	40,3	17,8
E1_WETTREG10	9,9	263,1	139,6	84,0	0,5	72,1	102,5	9,9	48,7	11,4
E2_CCLM-25	9,7	270,4	135,5	86,2	6,3	51,4	78,4	4,2	23,3	18,2
E2_CLM	9,1	286,4	113,9	91,7	1,3	59,8	91,4	14,2	39,2	14,2
E3_CCLM-25	9,3	273,1	131,2	87,6	5,6	62,7	82,7	4,4	23,3	23,7
E3_RACMO2	9,7	273,7	103,3	86,5	0,8	62,0	94,8	4,7	27,9	11,8
E3_REGCM3	8,7	300,7	48,0	91,5	0,0	67,6	102,8	3,6	21,6	14,4
E3_REMO	9,9	270,2	101,8	86,0	0,8	34,5	68,1	5,8	32,0	8,8
E3_RCA	9,6	288,0	52,7	83,5	0,3	42,5	75,9	0,6	11,5	8,5
H3Q0_CLM	10,0	257,0	267,8	94,7	8,3	69,7	106,2	31,3	63,2	16,0
H3Q0_H3Q0	10,8	244,2	352,2	88,4	13,7	80,0	103,7	27,0	60,9	11,4
H3Q3_H3Q3	10,2	260,0	400,6	90,9	15,6	91,0	111,4	34,7	61,4	16,6
H3Q3_RCA	8,8	276,9	73,6	91,4	1,0	74,3	91,4	1,2	14,9	23,9
min (25 km)	8,7	244,2	48,0	80,0	0,0	30,9	64,7	0,6	11,5	3,0
med (25 km)	9,7	270,5	137,5	87,9	1,5	62,4	92,5	6,7	35,6	14,3
max (25 km)	10,8	300,7	400,6	94,7	15,6	101,9	124,4	34,7	63,2	23,9
abw-min (25 km)	0,7	-28,5	12,2	-8,7	0,0	-31,3	-12,7	0,4	1,6	-17,5
abw-med (25 km)	1,1	-16,1	48,1	-5,2	1,0	-19,1	-6,8	2,7	10,1	-8,9
abw-max (25 km)	2,1	-2,6	167,8	-2,5	9,0	-14,3	-1,7	13,8	22,2	-4,1
p15.0	9,2	260,1	77,4	83,5	0,3	45,2	78,4	3,6	21,6	9,3
p50.0	9,6	270,9	137,5	87,7	3,3	61,9	91,9	6,2	28,9	16,3
p85.0	10,2	282,3	214,3	91,4	8,0	79,5	106,0	19,5	54,3	20,5
p15.0 (25 km)	9,1	258,7	74,2	83,1	0,3	43,5	77,1	2,7	18,2	9,0
p50.0 (25 km)	9,7	270,5	137,5	87,9	1,5	62,4	92,5	6,7	35,6	14,3
p85.0 (25 km)	10,2	284,6	243,7	91,5	8,2	81,2	108,8	23,3	57,9	20,2

Anlage J-02: Übersicht über die Kennzahlen der Temperatur für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (oben) und für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)

SRES-Szenario	T Mittel	Heiztag	Kühlgradtage	Veg-Beginn	Tropennacht	Frosttag	Letzter Frost	Tropentag	Sommertag	Eistag
A_RM5.1	11,3	244,8	486,0	82,0	17,7	82,6	116,0	46,1	83,7	2,6
B_RCA	11,1	241,9	141,8	75,4	3,8	30,5	73,1	3,6	23,8	4,2
E1_CLM	11,5	247,7	344,0	82,1	11,1	30,7	73,9	38,1	72,5	4,6
E1_REMO	12,9	218,2	373,1	75,7	15,1	10,3	44,2	26,6	74,3	2,1
E1_WETTREG06	10,7	253,8	171,3	82,1	0,8	54,0	105,6	11,2	55,5	7,5
E1_WETTREG10	12,0	232,9	296,8	75,4	1,9	43,1	90,0	27,7	82,0	3,2
E2_CLM	11,5	249,4	350,0	82,0	10,1	32,9	80,0	39,5	71,9	5,6
E3_RACMO2	11,7	244,1	277,1	79,8	7,9	35,4	81,3	17,9	54,0	5,2
E3_REGCM3	10,6	266,2	154,0	82,6	1,0	37,5	91,6	13,6	44,7	5,9
E3_REMO	11,9	236,7	266,5	78,9	7,8	15,4	54,7	18,3	58,9	3,5
E3_RCA	11,4	253,9	160,1	78,1	4,2	20,0	59,9	6,6	30,4	2,7
H3Q0_CLM	11,8	226,0	433,4	81,1	20,9	47,1	93,9	45,0	78,9	8,9
H3Q0_H3Q0	12,9	208,7	567,2	75,9	27,1	53,7	93,7	41,9	83,0	6,4
H3Q3_H3Q3	12,2	229,8	599,1	81,0	26,7	62,7	100,6	51,5	77,7	6,5
H3Q3_RCA	10,3	247,9	107,2	78,6	2,1	43,8	76,1	1,9	19,9	10,3
min (25 km)	10,3	208,7	107,2	75,4	0,8	10,3	44,2	1,9	19,9	2,1
med (25 km)	11,5	244,1	296,8	79,8	7,9	37,5	81,3	26,6	71,9	5,2
max (25 km)	12,9	266,2	599,1	82,6	27,1	82,6	116,0	51,5	83,7	10,3
abw-min (25 km)	1,9	-61,5	77,2	-20,7	0,7	-55,2	-28,6	1,5	11,3	-27,4
abw-med (25 km)	3,1	-49,9	231,0	-13,3	7,5	-47,2	-20,3	20,8	32,3	-17,8
abw-max (25 km)	4,2	-32,2	382,9	-8,3	22,4	-32,7	-8,1	35,6	54,1	-6,1
p15.0	10,7	224,1	150,9	75,6	1,7	18,9	58,6	5,9	28,7	2,7
p50.0	11,5	244,1	296,8	79,8	7,9	37,5	81,3	26,6	71,9	5,2
p85.0	12,3	253,8	506,3	82,1	22,3	56,1	101,8	45,3	82,3	7,9

Anlage J-03: Übersicht über die Kennzahlen des Niederschlags für die Beobachtungsdaten und für die Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen

SRES-Szenario	N Jahr	N Hyd. Winter	N Hyd. Sommer	N Tage-Trocken	N Tage-StarkN	StarkN	N Frühj	N Veg-Per	Trockenper-Veg	Trockenper-Max
C_CCLM-7	957,5	441,7	519,4	231,3	3,7	38,5	227,1	442,1	3,3	18,0
E1_CCLM-7	957,5	436,3	519,4	232,9	3,7	39,8	227,1	442,1	3,5	20,6
E2_CCLM-7	957,5	439,0	519,4	233,4	3,8	40,6	227,1	442,1	3,6	19,7
E3_CCLM-7	957,5	438,1	519,4	233,0	3,7	40,4	227,1	442,1	3,6	20,2
A_RM5.1	1234,2	622,8	618,8	160,9	3,4	36,4	358,7	528,0	3,1	17,3
B_RCA	1251,1	623,1	624,8	168,4	3,8	38,3	286,2	522,6	2,9	14,2
C_CCLM-25	948,4	437,1	514,9	230,6	3,5	37,8	224,8	438,4	3,3	17,9
E_WETTREG03	964,8	444,2	525,2	213,3	3,1	38,3	232,1	443,3	3,4	18,3
E1_CCLM-25	948,4	431,8	514,9	232,5	3,6	38,9	224,8	438,4	3,5	20,7
E1_CLM	1154,1	571,6	581,1	190,3	4,1	40,7	239,5	500,6	3,1	17,3
E1_REMO	1052,6	486,3	564,0	219,3	5,3	52,3	222,0	501,6	3,1	21,2
E1_WETTREG06	953,4	443,6	509,4	222,6	3,6	39,9	228,4	436,3	3,5	19,2
E1_WETTREG10	950,1	442,0	507,4	211,8	2,8	37,1	223,6	430,5	3,3	16,6
E2_CCLM-25	948,4	434,5	514,9	232,9	3,6	39,7	224,8	438,4	3,6	19,5
E2_CLM	1193,4	593,1	598,5	186,7	4,2	40,8	275,2	494,5	3,2	15,4
E3_CCLM-25	948,4	433,5	514,9	232,5	3,6	39,5	224,8	438,4	3,6	20,2
E3_RACMO2	1057,2	530,3	524,2	190,9	2,4	34,2	255,7	432,8	3,4	16,3
E3_REGCM3	1349,2	685,3	662,6	156,0	3,2	37,4	308,4	549,1	2,5	13,5
E3_REMO	1078,7	518,3	558,2	194,1	3,2	34,4	249,8	476,9	2,9	16,8
E3_RCA	1314,6	637,7	677,4	165,3	3,7	38,6	298,7	559,7	2,6	12,9
H3Q0_CLM	1134,1	614,8	517,7	184,3	3,8	42,5	278,4	439,5	3,2	14,5
H3Q0_H3Q0	1214,3	611,1	600,6	184,2	5,2	43,4	318,9	539,4	2,8	14,8
H3Q3_H3Q3	1019,7	512,6	502,7	204,5	3,9	38,3	239,9	427,3	3,6	18,6
H3Q3_RCA	1092,1	496,2	594,7	179,5	2,5	33,1	261,8	508,7	2,9	15,3
Beobachtung	949,5	443,2	512,3	226,9	3,6	40,7	225,2	435,3	3,6	20,7
min (25 km)	948,4	431,8	502,7	156,0	2,4	33,1	222,0	427,3	2,5	12,9
med (25 km)	1068,0	515,5	541,7	192,5	3,6	38,5	244,9	460,1	3,2	17,0
max (25 km)	1349,2	685,3	677,4	232,9	5,3	52,3	358,7	559,7	3,6	21,2
abw-min (25 km)	-0,1	-2,6	-1,9	-70,9	-1,2	-18,7	-1,4	-1,8	-1,1	-7,8
abw-med (25 km)	12,5	16,3	5,8	-34,4	0,0	-5,6	8,7	5,7	-0,5	-3,7
abw-max (25 km)	42,1	54,6	32,2	6,0	1,7	28,3	59,3	28,6	0,0	0,5
p15.0	948,6	436,4	514,9	165,6	3,1	36,5	224,8	436,5	2,9	14,5
p50.0	1036,2	491,2	521,8	199,3	3,6	38,8	235,8	442,1	3,3	17,6
p85.0	1232,2	622,0	617,0	232,9	4,1	40,8	297,5	527,4	3,6	20,2
p15.0 (25 km)	948,4	435,8	512,1	163,1	2,9	35,4	224,8	434,5	2,8	14,3
p50.0 (25 km)	1068,0	515,5	541,7	190,6	3,6	38,5	244,9	460,1	3,2	17,0
p85.0 (25 km)	1242,6	622,9	621,8	231,6	4,2	41,6	303,6	533,7	3,6	19,8

Anlage J-04: Übersicht über die Kennzahlen des Niederschlags für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (oben) und für die 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)

SRES-Szenario	N Jahr	N Hyd. Winter	N Hyd. Sommer	N Tage-Trocken	N Tage-StarkN	StarkN	N Frühj	N Veg-Per	Trockenper-Veg	Trockenper-Max
C_CCLM-7	949,3	459,0	492,8	238,3	4,3	41,9	253,9	403,3	3,9	20,1
E1_CCLM-7	1004,1	484,6	517,2	234,2	4,5	42,8	250,7	430,8	4,1	22,3
E2_CCLM-7	1012,7	511,4	503,7	232,0	4,6	42,8	262,1	439,6	3,9	21,4
E3_CCLM-7	995,6	475,1	520,5	234,1	4,4	43,6	231,3	446,6	3,8	21,4
A_RM5.1	1219,6	613,0	602,9	169,0	4,0	38,2	354,8	503,4	3,3	18,3
B_RCA	1326,7	675,7	647,7	160,1	4,1	38,6	313,2	549,0	2,8	13,0
C_CCLM-25	939,8	454,3	488,0	237,7	4,1	41,1	251,2	399,6	3,9	20,1
E_WETTREG03	1053,1	551,3	503,5	211,1	4,3	42,9	257,4	418,0	3,6	16,0
E1_CCLM-25	993,7	479,3	512,1	233,7	4,3	42,0	247,6	426,8	4,1	22,4
E1_CLM	1177,6	614,9	559,1	192,2	4,4	42,6	266,1	462,8	3,6	18,1
E1_REMO	1117,1	537,9	575,4	218,5	6,4	57,9	247,5	497,0	3,3	20,5
E1_WETTREG06	942,6	465,7	476,5	222,0	3,3	38,9	240,1	406,4	3,8	19,1
E1_WETTREG10	906,1	434,0	472,1	214,9	2,5	36,8	228,0	399,2	3,4	16,8
E2_CCLM-25	1003,1	506,3	499,3	231,6	4,4	41,9	259,2	435,7	3,8	21,4
E2_CLM	1247,4	655,5	593,4	185,0	4,8	43,8	294,3	501,3	3,3	17,3
E3_CCLM-25	986,7	470,1	516,6	233,7	4,3	42,9	229,3	443,5	3,8	21,4
E3_RACMO2	1101,7	565,0	534,7	191,1	3,4	37,7	253,0	449,0	3,3	16,2
E3_REGCM3	1395,4	700,1	696,5	154,8	3,9	39,0	309,6	576,6	2,5	13,9
E3_REMO	1103,0	530,9	570,2	195,9	3,8	39,1	232,7	480,4	3,0	17,7
E3_RCA	1389,8	673,5	716,5	160,5	4,6	39,2	313,2	595,1	2,6	13,4
H3Q0_CLM	1106,8	609,9	495,6	194,8	4,0	44,2	254,7	401,4	3,7	16,7
H3Q0_H3Q0	1161,6	603,7	560,4	195,3	5,2	42,7	303,3	463,9	3,2	17,1
H3Q3_H3Q3	1090,9	579,5	511,9	205,0	5,1	42,9	273,8	423,4	3,8	20,1
H3Q3_RCA	1199,2	584,7	613,8	173,6	3,5	38,2	277,9	520,2	2,9	14,7
min (25 km)	906,1	434,0	472,1	154,8	2,5	36,8	228,0	399,2	2,5	13,0
med (25 km)	1104,9	572,2	546,9	195,6	4,2	41,5	258,3	455,9	3,4	17,5
max (25 km)	1395,4	700,1	716,5	237,7	6,4	57,9	354,8	595,1	4,1	22,4
abw-min (25 km)	-4,6	-1,8	-7,0	-8,3	-0,3	-2,6	-8,5	-14,0	-0,1	-2,3
abw-med (25 km)	4,1	7,1	-0,7	0,3	0,7	6,5	5,6	-0,9	0,2	0,8
abw-max (25 km)	9,8	24,1	5,8	11,0	1,2	15,4	15,3	6,3	0,6	2,4
p15.0	953,1	466,2	493,1	161,4	3,5	38,2	231,4	403,6	2,9	14,8
p50.0	1096,3	544,6	518,8	200,4	4,3	42,0	256,0	445,0	3,6	18,2
p85.0	1244,6	651,5	612,7	234,1	4,8	43,5	308,9	518,5	3,9	21,4
p15.0 (25 km)	964,7	467,9	491,8	160,3	3,5	38,2	231,0	403,9	2,8	14,3
p50.0 (25 km)	1104,9	572,2	546,9	195,1	4,2	41,5	258,3	455,9	3,4	17,5
p85.0 (25 km)	1287,1	664,5	630,8	232,7	5,0	43,4	311,4	534,6	3,8	20,9

Anlage J-04: Übersicht über die Kennzahlen des Niederschlags für die 24 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (oben) und für die 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (unten)

SRES-Szenario	N Jahr	N Hyd. Winter	N Hyd. Sommer	N Tage-Trocken	N Tage-StarkN	StarkN	N Frühj	N Veg-Per	Trockenper-Veg	Trockenper-Max
A_RM5.1	1106,0	599,6	504,1	191,3	4,1	40,7	354,8	423,0	4,6	24,1
B_RCA	1391,3	721,1	651,5	157,1	4,9	43,6	339,0	544,0	2,9	13,2
E1_CLM	1144,5	669,5	475,5	202,6	4,9	45,3	280,9	393,9	4,6	18,2
E1_WETTREG06	931,0	514,9	416,7	225,5	3,3	41,0	218,8	348,7	4,1	19,1
E1_WETTREG10	856,3	423,5	433,7	208,6	2,0	34,4	229,4	367,4	3,3	16,6
E2_CLM	1139,4	677,5	471,2	201,1	4,5	43,3	286,0	380,5	4,4	19,9
E3_RACMO2	1190,7	668,6	521,3	193,5	4,6	44,2	297,8	418,7	4,4	18,5
E3_REGCM3	1444,8	805,2	640,6	159,9	5,2	45,5	347,0	522,5	2,9	13,3
E3_REMO	1133,2	627,5	506,7	202,6	5,0	47,5	270,5	422,5	3,8	17,9
E3_RCA	1423,3	788,7	636,4	166,2	5,7	45,9	353,7	515,8	3,3	14,3
H3Q0_CLM	1038,7	599,5	424,0	199,4	3,9	45,3	259,0	360,9	4,2	19,9
H3Q0_H3Q0	1186,2	626,4	545,3	197,8	6,7	51,2	312,3	477,6	3,6	19,1
H3Q3_H3Q3	1055,2	590,3	454,2	203,6	4,7	41,0	305,8	350,0	4,4	21,7
H3Q3_RCA	1203,4	601,9	588,0	170,1	3,8	38,0	319,0	477,8	3,0	14,7
min (25 km)	856,3	423,5	416,7	157,1	2,0	34,4	218,8	348,7	2,9	13,2
med (25 km)	1142,0	627,0	505,4	198,6	4,7	43,9	301,8	420,6	4,0	18,4
max (25 km)	1444,8	805,2	651,5	225,5	6,7	51,2	354,8	544,0	4,6	24,1
abw-min (25 km)	-10,4	-4,2	-21,3	-11,3	-0,7	-7,2	-7,0	-23,1	0,0	-1,0
abw-med (25 km)	1,3	15,9	-9,4	3,4	0,9	12,8	10,4	-13,1	0,8	1,2
abw-max (25 km)	12,6	26,1	4,3	30,4	2,2	37,9	27,4	4,1	1,6	6,9
p15.0	995,6	560,1	429,8	163,7	3,6	39,6	247,2	356,5	3,0	13,9
p50.0	1142,0	627,0	505,4	198,6	4,7	43,9	301,8	420,6	4,0	18,4
p85.0	1404,1	748,2	638,1	205,6	5,4	46,5	349,7	518,5	4,5	20,6

Anlage J-05: Übersicht über die Kennzahlen der Globalstrahlung für die 24 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (links) und der nahen Zukunft (rechts) sowie für die 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (nächste Seite)

SRES-Szenario Ist-Zustand	Glob Jahr	Glob Stabw	Glob Min	Glob Max
------------------------------	-----------	------------	----------	----------

SRES-Szenario nahe Zukunft	Glob Jahr	Glob Stabw	Glob Min	Glob Max
-------------------------------	-----------	------------	----------	----------

C_CCLM-7	1165,9	108,0	4,0	490,8
E1_CCLM-7	1165,9	109,6	4,0	459,4
E2_CCLM-7	1165,9	108,6	3,7	445,5
E3_CCLM-7	1165,9	109,2	3,2	455,0
A_RM5.1	1305,5	94,2	3,9	345,1
B_RCA	1212,4	88,8	7,3	347,0
C_CCLM-25	1165,3	107,7	4,1	490,2
E_WETTREG03	1074,2	81,1	20,2	323,2
E1_CCLM-25	1165,3	109,3	4,1	458,1
E1_REMO	1152,9	99,1	1,1	331,0
E1_WETTREG06	1058,4	79,5	20,5	318,4
E1_WETTREG10	1046,8	77,2	20,8	316,3
E2_CCLM-25	1165,3	108,3	3,8	445,0
E3_CCLM-25	1165,3	109,0	3,3	454,4
E3_RACMO2	970,8	84,0	1,7	319,8
E3_REGCM3	864,5	88,6	3,8	367,2
E3_REMO	1013,0	96,8	0,8	329,9
E3_RCA	1179,0	87,7	6,1	343,9
H3Q0_CLM	940,2	88,5	2,8	331,1
H3Q0_H3Q0	1267,0	103,3	2,3	357,1
H3Q3_H3Q3	1245,6	106,5	2,4	360,5
H3Q3_RCA	1200,9	88,0	6,7	345,0
Beobachtung	1038,2	80,4	20,1	314,7
min (25 km)	864,5	77,2	0,8	316,3
med (25 km)	1165,3	91,5	3,9	345,0
max (25 km)	1305,5	109,3	20,8	490,2
abw-min (25 km)	-173,8	-3,1	-19,3	1,6
abw-med (25 km)	127,1	11,1	-16,2	30,3
abw-max (25 km)	267,3	29,0	0,7	175,5
p15.0	1004,6	83,4	2,2	322,5
p50.0	1165,3	98,0	3,9	352,1
p85.0	1219,1	109,0	9,9	458,4
p15.0 (25 km)	979,2	81,6	1,8	320,5
p50.0 (25 km)	1165,3	91,5	3,9	345,0
p85.0 (25 km)	1239,0	108,2	17,6	452,5

C_CCLM-7	1173,0	111,5	3,4	492,6
E1_CCLM-7	1162,1	112,9	3,2	459,2
E2_CCLM-7	1126,0	107,2	2,9	442,8
E3_CCLM-7	1165,1	112,4	3,0	453,5
A_RM5.1	1312,9	95,5	3,6	346,9
B_RCA	1173,0	87,7	6,0	343,9
C_CCLM-25	1172,3	111,2	3,5	492,0
E_WETTREG03	1120,1	84,3	20,5	321,7
E1_CCLM-25	1161,3	112,6	3,3	457,8
E1_REMO	1133,3	99,0	1,2	329,3
E1_WETTREG06	1093,8	81,6	20,9	318,3
E1_WETTREG10	1092,3	81,3	21,1	323,4
E2_CCLM-25	1125,6	107,0	2,9	442,4
E3_CCLM-25	1164,5	112,1	3,1	452,9
E3_RACMO2	965,5	85,2	1,5	319,8
E3_REGCM3	862,9	89,3	3,8	367,6
E3_REMO	997,3	96,5	0,7	328,4
E3_RCA	1152,9	87,9	5,9	342,3
H3Q0_CLM	953,2	91,0	2,3	327,6
H3Q0_H3Q0	1310,9	106,8	2,2	355,6
H3Q3_H3Q3	1250,3	109,3	2,1	361,8
H3Q3_RCA	1168,9	88,7	5,5	343,2
min (25 km)	862,9	81,3	0,7	318,3
med (25 km)	1143,1	93,3	3,4	343,5
max (25 km)	1312,9	112,6	21,1	492,0
abw-min (25 km)	-39,8	-1,4	-1,3	-3,5
abw-med (25 km)	-1,2	1,7	-0,2	-1,5
abw-max (25 km)	45,9	4,1	0,4	7,1
p15.0	990,9	85,0	2,0	323,1
p50.0	1157,1	97,8	3,3	351,3
p85.0	1188,5	112,2	8,9	458,1
p15.0 (25 km)	971,9	84,5	1,6	322,0
p50.0 (25 km)	1143,1	93,3	3,4	343,5
p85.0 (25 km)	1234,9	110,8	17,6	450,8

Anlage J-05: Übersicht über die Kennzahlen der Globalstrahlung für die 24 Klimaprojektionen des Ist-Zustands und der nahen Zukunft sowie für die 13 Klimaprojektionen der fernen Zukunft

SRES-Szenario ferne Zukunft	Glob Jahr	Glob Stabw	Glob Min	Glob Max
A_RM5.1	1361,7	99,4	4,4	347,6
B_RCA	1159,9	88,0	5,6	340,2
E1_REMO	1135,0	99,6	1,0	327,3
E1_WETTREG06	1148,0	85,2	22,5	325,0
E1_WETTREG10	1166,7	85,7	22,0	321,5
E3_RACMO2	978,7	90,0	1,2	318,7
E3_REGCM3	904,9	96,0	3,5	370,2
E3_REMO	993,4	97,3	0,6	326,4
E3_RCA	1143,0	91,1	4,9	341,7
H3Q0_CLM	965,1	92,2	2,1	327,8
H3Q0_H3Q0	1320,4	107,0	1,9	353,2
H3Q3_H3Q3	1264,6	111,3	2,1	361,2
H3Q3_RCA	1134,1	88,0	5,0	343,2
min (25 km)	904,9	85,2	0,6	318,7
med (25 km)	1143,0	92,2	3,5	340,2
max (25 km)	1361,7	111,3	22,5	370,2
abw-min (25 km)	-66,8	-0,8	-1,7	-6,8
abw-med (25 km)	18,9	3,7	-0,3	-1,8
abw-max (25 km)	119,9	8,5	1,9	6,7
p15.0	971,2	86,7	1,1	323,1
p50.0	1143,0	92,2	3,5	340,2
p85.0	1295,3	103,7	14,6	357,6

Anlage J-06: Übersicht über die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit für die 24 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (links) und der nahen Zukunft (rechts) sowie für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (nächste Seite)

SRES-Szenario Ist-Zustand	Glob Jahr	Glob Stabw	Glob Min	Glob Max
------------------------------	-----------	------------	----------	----------

SRES-Szenario nahe Zukunft	Glob Jahr	Glob Stabw	Glob Min	Glob Max
-------------------------------	-----------	------------	----------	----------

C_CCLM-7	3,7	1,6	9,3	6,5
E1_CCLM-7	3,6	1,6	9,1	5,9
E2_CCLM-7	3,6	1,6	9,1	5,6
E3_CCLM-7	3,6	1,6	9,4	5,8
A_RM5.1	2,3	1,3	7,2	0,5
B_RCA	2,8	1,3	7,3	0,3
C_CCLM-25	3,7	1,6	9,3	6,7
E_WETTREG03	2,7	1,5	10,5	6,1
E1_CCLM-25	3,6	1,6	9,2	6,1
E1_CLM	3,7	1,6	9,3	5,5
E1_REMO	3,1	1,7	8,8	3,4
E1_WETTREG06	2,0	1,2	8,9	2,3
E1_WETTREG10	2,0	1,3	9,3	2,5
E2_CCLM-25	3,6	1,6	9,1	5,7
E2_CLM	3,6	1,6	9,3	4,9
E3_CCLM-25	3,6	1,6	9,4	6,0
E3_RACMO2	3,3	1,5	8,6	3,6
E3_REGCM3	4,6	2,4	12,9	35,8
E3_REMO	3,3	1,5	8,7	2,4
E3_RCA	3,2	1,4	8,2	1,4
H3Q0_CLM	3,4	1,5	8,7	2,4
H3Q0_H3Q0	3,2	1,4	8,4	2,0
H3Q3_H3Q3	3,4	1,4	8,7	2,4
H3Q3_RCA	3,0	1,4	8,2	1,1
Beobachtung	2,0	1,2	8,7	1,7
min (25 km)	2,0	1,2	7,2	0,3
med (25 km)	3,3	1,5	8,9	2,9
max (25 km)	4,6	2,4	12,9	35,8
abw-min (25 km)	0,0	0,0	-1,6	-1,5
abw-med (25 km)	1,3	0,3	0,1	1,2
abw-max (25 km)	2,6	1,2	4,1	34,0
p15.0	2,7	1,3	8,2	1,4
p50.0	3,4	1,6	9,1	4,3
p85.0	3,7	1,6	9,4	6,1
p15.0 (25 km)	2,5	1,3	8,2	1,3
p50.0 (25 km)	3,3	1,5	8,9	2,8
p85.0 (25 km)	3,7	1,6	9,4	6,1

C_CCLM-7	3,6	1,6	9,0	5,6
E1_CCLM-7	3,6	1,6	9,6	6,8
E2_CCLM-7	3,6	1,6	9,5	7,1
E3_CCLM-7	3,6	1,6	9,4	6,7
A_RM5.1	2,2	1,2	7,2	0,5
B_RCA	2,9	1,4	7,7	0,5
C_CCLM-25	3,6	1,6	9,0	5,7
E_WETTREG03	2,7	1,6	11,3	7,6
E1_CCLM-25	3,6	1,6	9,6	7,0
E1_CLM	3,7	1,6	9,9	6,4
E1_REMO	3,2	1,7	9,1	4,0
E1_WETTREG06	1,9	1,3	8,9	2,2
E1_WETTREG10	2,0	1,3	9,5	2,7
E2_CCLM-25	3,6	1,6	9,6	7,2
E2_CLM	3,7	1,7	9,7	7,1
E3_CCLM-25	3,6	1,6	9,4	6,9
E3_RACMO2	3,3	1,6	8,9	4,7
E3_REGCM3	4,6	2,4	12,8	35,8
E3_REMO	3,4	1,5	8,7	3,0
E3_RCA	3,3	1,5	8,3	1,8
H3Q0_CLM	3,3	1,5	8,9	3,0
H3Q0_H3Q0	3,2	1,4	8,4	2,1
H3Q3_H3Q3	3,4	1,4	8,6	2,7
H3Q3_RCA	3,0	1,3	7,8	0,7
min (25 km)	1,9	1,2	7,2	0,5
med (25 km)	3,3	1,5	9,0	3,5
max (25 km)	4,6	2,4	12,8	35,8
abw-min (25 km)	-0,1	0,0	-0,4	-0,9
abw-med (25 km)	0,0	0,0	0,1	0,5
abw-max (25 km)	0,1	0,1	0,9	2,1
p15.0	2,7	1,3	8,3	1,8
p50.0	3,4	1,6	9,1	5,2
p85.0	3,6	1,6	9,7	7,1
p15.0 (25 km)	2,4	1,3	8,1	1,2
p50.0 (25 km)	3,3	1,5	9,0	3,4
p85.0 (25 km)	3,7	1,7	9,8	7,1

Anlage J-06: Übersicht über die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit für die 24 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (links) und der nahen Zukunft (rechts) sowie für die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft

SRES-Szenario ferne Zukunft	Glob Jahr	Glob Stabw	Glob Min	Glob Max
A_RM5.1	2,2	1,2	7,3	0,5
B_RCA	2,9	1,4	7,9	0,6
E1_CLM	3,6	1,6	9,8	6,7
E1_REMO	3,1	1,7	9,0	4,2
E1_WETTREG06	1,8	1,2	8,6	2,0
E1_WETTREG10	2,0	1,4	10,1	3,0
E2_CLM	3,6	1,6	9,7	6,4
E3_RACMO2	3,4	1,6	9,1	5,2
E3_REGCM3	4,5	2,4	12,9	32,6
E3_REMO	3,4	1,5	8,9	3,2
E3_RCA	3,2	1,5	8,5	1,8
H3Q0_CLM	3,3	1,5	8,9	2,7
H3Q0_H3Q0	3,2	1,3	8,2	1,6
H3Q3_H3Q3	3,4	1,4	8,7	2,6
H3Q3_RCA	2,9	1,3	7,9	0,8
min (25 km)	1,8	1,2	7,3	0,5
med (25 km)	3,2	1,5	8,9	2,7
max (25 km)	4,5	2,4	12,9	32,6
abw-min (25 km)	-0,2	-0,1	-0,3	-3,1
abw-med (25 km)	0,0	0,0	0,2	0,4
abw-max (25 km)	0,1	0,1	0,8	1,7
p15.0	2,2	1,3	7,9	0,7
p50.0	3,2	1,5	8,9	2,7
p85.0	3,6	1,7	9,9	6,5

8 Literatur

- Andréasson J., Bergström S., Carlsson B., Graham L.P., Lindström G. (2004): Hydrological Change – Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio* Vol. 33 No. 4-5, Royal Swedish Academy of Sciences
- ARL - Akademie für Raumforschung und Landesplanung (2009): Klimawandel als Aufgabe der Regionalplanung. – Positionspapier der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Nr. 81
- Arnold J., Pall P., Bosshard T., Kotlarski S. & Schär C. (2009): Detailed study of heavy precipitation events in the Alpine region using ERA40 driven RCMs. - ENSEMBLES Deliverable, D5.32, 49 pp, ETH Zurich
- BayLfU (2006): Regionenspezifische Auswertung von Klimaszenarien in Deutschland. - Ingenieurbüro Dr. Ludwig im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (unveröffentlicht)
- Becker P., Deuschländer T. & Imbery F. (2012): Klimasimulation- wie hart trifft es Deutschland? - *Spektrum der Wissenschaft* 4/2012
- Berg P., Feldmann H. & Panitz H.-J. (2012): Bias correction of high resolution RCM data. – eingereicht bei J. Hydrol.
- BfG (2008): Das Projekt KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen, Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. – Flyer
- Bildungsserver (2013): Die neuen RCP-Emissionspfade im Vergleich zu den SRES-Emissionspfaden bis 2050. - <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien>
- Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T. & Schär C. (2011): Klimaszenarien für Klimaimpaktstudien in der Schweiz. – IAC, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (interner Bericht)
- Bronstert A., Kolokotronis V., Schwandt D. & Straub H. (2006): Vergleich und hydrologische Wertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland. - *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(6), S. 270-287.
- Bund-Länder-Fachgespräch (2010): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten – Bund-Länder-Fachgespräch „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Stand Mai 2010
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17.12.2008 beschlossen.
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011 - published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp.
- Christensen J.H. & Christensen O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. - *Climatic Change*, 81, S. 7-30.

Christensen J.H., Carter T., Rummukainen M. & Amanatidis G. (2007): Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. - *Climatic Change*, 81, S. 1-6.

Déqué M., Rowell D.P., Luethi D., Giorgi F., Christensen J.H., Rockel B., Jacob D., Kjellstroem E., Castro M. de & van den Hurk B.J.J.M. (2007): An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. - *Climatic Change*, 81, S. 53-70.

Deuschländer T., Imbery F., Plagemann S., Namyslo S., Früh B. & Becker P. (2009): Zum Umgang mit Klimaprojektionen in der Klima- und Klimafolgenforschung. – Homepage des DWD

Deutsch C. V. & Journel A. G. (1998): *GSLIB – Geostatistical Software Library and User's Guide*. 2nd Edition. Applied Geostatistics Series. Oxford University Press, New York, 369 pp.

Enke W., Hense A., Kreienkamp F., Panitz H-J., Schädler G., Schölzel C. & Spekat A. (2010): Probabilistische Abschätzung regionaler Klimaänderungen der kommenden Dekaden und ihrer Unsicherheiten (Verbundprojekt PARk). - http://www.herausforderung-klimawandel-bw.de/downloads/PArK_Schlussbericht_Herausforderung_Klimawandel.pdf

Ekström M., Hingray B., Mezghani A. & Jones P. D. (2007), Regional climate model data used within the SWURVE project - 2: addressing uncertainty in regional climate model data for five European case study areas, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, S. 1085-1096.

European Communities (2009): Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance document No. 24. River basin management in a changing climate. Technical Report - 040. 132 S

Gerlinger K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. - In: AK KLIWA (Hrsg.): 2. KLIWA-Symposium 03.-04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 87-102.

Gerlinger K. (2009): Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet – Literaturlauswertung. Bericht 174 der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.

Gerlinger K. & Meuser A. (2013): Modellierung des Wasserhaushalts – methodisches Vorgehen und Ergebnisse. – In: AK KLIWA (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium 06.-07.12.2012 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte (in Vorbereitung)

Giorgetta M. (2011): Konsortialrechnungen mit dem MPI-M Erdsystemmodell für CMIP5 - http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/Forschung_aktuell/Giorgetta_cmip5_intro.pdf

Giorgi F., Jones D. & Asrar G.R. (2009): Addressing climate information needs at a regional level: the CORDEX framework. – *WMO Bulletin*, 58, S. 175-183

Giorgi F. (2011): The CORDEX program, background, objectives, status. - International Conference on the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – CORDEX, Triest, 21.- 26.03.2011

Gobiet A. & Jacob D. (2011): EURO-CORDEX. - International Conference on the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – CORDEX, Triest, 21.- 26.03.2011

Görgen K., Beersma J., Brahmer G., Buiteveld H., Carambia M., de Keizer O., Krahe P., Nilson E., Lammersen R., Perrin C. & Volken D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. - CHR report, I-23, 229 pp., Lelystad, ISBN 978-90-70980-35-1

Graham L.P., Hagemann S., Jaun S. & Beniston M. (2007): On interpreting hydrological change from regional climate models. - *Climatic Change* 81, 97–122

Hagemann S., Machenhauer B., Jones R., Christensen O.B., Déqué M., Jacob D. & Vidale P.L. (2004): Evaluation of water and energy budgets in regional climate models applied over Europe. - *Climate Dynamics*, 23, 547-567.

Hay L.E., Wilby R.L. & Leavesley G.H. (2000): A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. - *Journal of the American Water Resources Association* 36, 387-398.

Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D. & New M. (2008): A European daily highresolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950-2006. - *J. Geophys. Res.*, 113, D20119.

Hennegriff W. & Kolokotronis V. (2007): Methodik zur Ableitung von Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserkennwerte in BadenWürttemberg. – *Wasserwirtschaft* 9, S. 31-35

Hollweg H.-D., Böhm U., Fast I., Hennemuth B., Keuler K., Keup-Thiel E., Lautenschlager M., Legutke S., Radtke K., Rockel B., Schubert M., Will A., Woldt M. & Wunram C. (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. – Technical Report No 3, Support for Climate- and Earth System Research at the Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg

Imbery F. & Namyslo J. (2011): Verteilungsfunktionen von Änderungssignalen aus einem Klimaprojektionsensemble. – Deutscher Wetterdienst, internes Arbeitspapier

IPCC (2001): Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. - Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.), Cambridge.

IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report.

IKSR (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Bericht Nr. 188

Jacob D., Barring L., Christensen O. B., Christensen J. H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Lenderink G., Rockel B., Sanchez E., Schär C.; Seneviratne S. I., Somot S., Ulden A. van & Hurk B. van den (2007): An intercomparison of regional climate models for Europe: model performance in presentday climate. - *Climatic change*, 81, S. 31-52.

Jacob D., Göttel H., Kotlarski S., Lorenz P. & Sieck K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. – Forschungsbericht 20441138 UBA-FB000969

Jacob D. (2010): CORDEX: A Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment. – In: PIK-Report 115, Conference Proceedings „Continents under Climate Change“.

Jacob D., Bülow K., Kotova L., Moseley C., Petersen J., Rechid D. (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung. – CSC Report Nr 6

KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. - KLIWA-Berichte Heft 9.

KLIWA (2008): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern – KLIWA-Berichte Heft 12

KNMI (2006): KNMI Klimaatscenario's: Samenvatting. - <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/>

Krahe P., Nilson E., Carambia M., Maurer T., Tomassini L., Bülow K., Jacob D. & Moser, H. (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53(5), 316–331

Kreienkamp F., Spekat A. & Enke W. (2010a): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. – Bericht, CEC Potsdam GmbH

Kreienkamp F., Spekat A. & Enke W. (2010b): Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. - Bericht, CEC Potsdam GmbH

LfU (2005): Auswertung und Vergleich der regionalen Klimaszenarien. - Ingenieurbüro Dr. Ludwig im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (unveröffentlicht)

LUBW (2006a): Bereitstellung eines Modells für die Berechnung von Klimaszenarien für den Rhein in Baden-Württemberg. - Ingenieurbüro Dr. Ludwig im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (unveröffentlicht)

LUBW (2006b): Veränderung des Abflussverhaltens in Baden-Württemberg in Folge der Klimaänderung. - Ingenieurbüro Dr. Ludwig im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (unveröffentlicht)

LUBW & LUWG (2007): Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierungen unter Verwendung der WETTREG-Daten im Rhein-Einzugsgebiet von Baden-Württemberg und der Schweiz. – Ingenieurbüro Dr. Ludwig im Auftrag der LUBW und des LUWG (unveröffentlicht)

LUBW & LUWG (2008): Berechnung von Klimaszenarien bis zum Jahr 2065 mit dem Wasserhaushaltsmodell LAR-SIM für das Einzugsgebiet des Rheins in der Schweiz und in Baden-Württemberg – HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW und des LUWG (unveröffentlicht)

LUBW & LUWG (2009a): Analyse möglicher zukünftiger Klimate im Rhein-Einzugsgebiet bis Worms. Teil 1: Erstellung einer Simulation auf der Basis beobachteter Wetterlagenhäufigkeiten sowie deren Extrapolation in die nahe Zukunft. – CEC Potsdam GmbH im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (unveröffentlicht)

LUBW & LUWG (2009b): Datenbereitstellung und Auswertung der Klimasimulationen mit dem Regionalmodell COSMO-CLM. - HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW und des LUWG (unveröffentlicht)

LUBW & LUWG (2012): Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM-Daten Version 4.8 (run1 bis 3, linear skaliert; run1, quantile mapping) für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms – HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW und des LUWG (unveröffentlicht)

LUBW (2009): Auswertung von korrigierten REMO-Daten und Wasserhaushaltssimulationen mit CLM-Daten für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms. – HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht)

LUBW (2010a): Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM-Daten (Version 4.2) und mit WETTREG-Daten für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms. – HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht)

LUBW (2010b): Herausforderung Klimawandel Baden-Württemberg - Abschluss Symposium des Forschungsprogramms. – Tagungsband zur Tagung am 12. Mai 2010

Meehl G.A. et al. (2007): Global Climate Projections. In: *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

Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J., Elgizouli I., Emori S., Erda L., Hibbard K., Jones R., Kainuma M., Kelleher J., Lamarque J.F., Manning M., Matthews B., Meehl J., Meyer L., Mitchell J., Nakicenovic N., O'Neill B., Pichs R., Riahi K., Rose S., Runci P., Stouffer R., van Vuuren D., Weyant J., Wilbanks T., van Ypersele J.P. & Zurek M. (2008): *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. - Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 132 pp.

Moss R., Edmonds J.A., Hibbard K., Manning M., Rose S., van Vuuren D., Carter T., Emori S., Kainuma M. & Kram T (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. - *Nature* 463, S. 747-756

Nobrega M.T., Collischonn W., Tucci C.E.M. & Paz A.R. (2011): Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. - *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 585–595, 2011

Panitz, H.-J., Feldmann, H., Berg, P., Schädler, G. (2010): Bereitstellung von am KIT berechneten COSMO-CLM-Antriebsdaten für Abflussmodelle – Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Institut für Meteorologie und Klimaforschung.

Panitz H.-J., Schädler G. & Feldmann H. (2009): Modelling Regional Climate Change in Southwest Germany. - In *High Performance Computing in Science and Engineering '09*, edited by Nagel, W. E., Kröner, D. B. and Resch, M. M., pp. 429-443, Springer, Berlin, Heidelberg.

PIANC (2008): Waterborne transport, ports and waterways: A review of climate change drivers, impacts, responses and mitigation. EnviCom-Task Group 3 "Climate Change and Navigation". - <http://www.pianc.org/downloads/envicom/envicom-free-tg3.pdf>

Prettenthaler F., Podesser A. & Pilger H. (Hrsg.) (2010): Klimaatlas Steiermark: Periode 1971-2000 - Eine anwenderorientierte Klimatographie. - Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften

Quante M. (2009): Die Rolle der Regionalmodellierung in den Klimaprojektionen. - 5. Workshop des Projektes "Klimawandel und seine Folgen", Bad Malente

Rauthe M., Steiner H., Riediger U., Mazurkiewicz A. & Gratzki A. (2013): A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a highresolution gridded daily data set (HYRAS). *Met. Zeitschrift*. (im Druck)

Rudolf R., Malitz G. & Gratzki A. (2009): Klimamonitoring für KLIWA. - Vorträge zum 4. KLIWA-Symposium Mainz, KLIWA-Berichte Heft 15, S. 97-106

Rudolf R., Becker P. & Heinrich H. (2009): Klimaszenarien für Schifffahrt und Wasserstraßen. - Veranstaltung des BMVBS „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland -1. Statuskonferenz“. Kurzfassungen der Vorträge, 18. – 19. März 2009, Bonn.

Schädler G. (2009): Dynamisches Modell COSMO-CLM. - Vorträge zum 4. KLIWA-Symposium Mainz, KLIWA-Berichte Heft 15, S. 85-96

Schädler G., Berg P., Dühmann D., Feldmann H., Ihringer J., Kunstmann H., Liebert J., Merz B., Ott I. & Wagner S. (2012): Flood Hazards in a Changing Climate. - Project Report. 83 pp. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM), Karlsruhe

SGA/MPI-M (2013): Einbettung regionaler Klimamodelle in Globalmodelle. - Internetseite des Climate Service Center (CSC); http://www.hzg.de/science_and_industrie/klimaberatung/csc_web/011581/index_0011581.html

Spekat A., Enke W. & Kreienkamp F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. - Climate & Environmental Consulting (CEC) Potsdam GmbH Dessau.

Spekat A., Kreienkamp F. & Enke W. (2008): Probabilistische Abschätzung regionaler Klimaänderungen der kommenden Dekaden und ihre Unsicherheiten (PArK): Anwendung von Methoden zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen der kommenden Dekaden, Szenarienrechnungen mit WETTREG. Dritter Zwischenbericht. / Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Umweltministerium (UM), dieses vertreten durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.

Spekat A., Enke W. & Kreienkamp F. (2011): Ein WETTREG-E1 Klimaszenario für die Region Sachsen-Anhalt. http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LAU/Wir_ueber_uns/Veranstaltungen/Archiv/2011/Dateien/2011_02_24_CEC_Halle.pdf

STARDEX (2005): STARDEX – Downscaling climate extremes. – Final report, 24 pp., Norwich

Stock M. (Ed.) (2005): KLARA - Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung. - Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK Report 99, Potsdam 2005

Taylor K.E., Stouffer R.J. & Meehl G.A. (2011): An Overview of CMIP5 and the experiment design. - Bull. Amer. Meteor. Soc.

Tomassini L. & Bülow K. (2009): Vergleichende Analysen regionaler Klimamodelle für das heutige und zukünftige Klima. - Veranstaltung des BMVBS „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland -1. Statuskonferenz“. Kurzfassungen der Vorträge, 18. – 19. März 2009, Bonn.

Treber M. (2008): Neue IPCC-Szenarien für den Fünften Sachstandsbericht. – Germanwatch

UM & LUBW (2012): Klimawandel in Baden-Württemberg – Fakten-Folgen-Perspektiven. ISBN 978-3-88251-368-4

Van der Linden P. & Mitchell J.F.B. (2009): ENSEMBLES: Climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project. – Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, UK

Van Vuuren D.P., Edmonds J., Thomson A., Riahi K., Kainuma M., Matsui T., Hurtt G.C., Lamarque J-F., Meinshausen M., Smith S. et al. (2011): Representative concentration pathways: an overview. - Climatic Change, 109, 5-31

Viner D. (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies. - In Climatic Change. 10. Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management, edited by Beniston M., S. 139-149, Kluwer Academic Publishers.

Walkenhorst O. & Stock M. (2009) Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Eine Leseanleitung. - E-Paper der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Nr. 6

Weber J. (2009): Auswertung/Verwendung regionaler Klimaszenarien im Vorhaben KLIWA. – Vorträge zum 4. KLIWA-Symposium Mainz, KLIWA-Berichte Heft 15, S. 71-84

Zebisch M., Grothmann T., Schröter D., Hasse C, Fritsch U. und Cramer W. (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. - Climate Change Nr. 08/2005, UBA-FBNr: 000844, Umweltbundesamt Dessau

