



Das Bayerische Klimaprojektionsensemble

Audit und Ensemblebildung



klima



Das Bayerische Klimaprojektionsensemble

Audit und Ensemblebildung

Impressum

Das Bayerische Klimaprojektionsensemble - Audit und Ensemblebildung

Herausgeber:

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

Bearbeitung/Text/Konzept:

Fakultät für Geowissenschaften, Department für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München, Luisenstraße 37, 80333 München
LfU: Christopher Zier, Christoph Müller, Holger Komischke, Alana Steinbauer, Dr. Frank Bäse

Redaktion:

LfU: Christopher Zier

Bildnachweis:

Abb. 2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25 Bayerisches Landesamt für Umwelt
Abb. 1 Bayerisches Landesamt für Umwelt, Fachdaten basierend auf: Einzugsgebiete des DLM1000W, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Umweltbundesamt, 2012 (Daten verändert). Geodaten basierend auf: EuroGlobalMap (EGM), © EuroGeographics, 2015 (Daten verändert)
Abb. 3 Bayerisches Landesamt für Umwelt basierend auf Geobasisdaten EuroGlobalMap (EGM), © EuroGeographics, 2015 (Daten verändert)

Stand:

April 2020

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	6
2 Untersuchungsgebiete	8
3 Datengrundlage	9
3.1 Klimaprojektionen	9
3.2 Der Bayerische Klimareferenzdatensatz KliRef2014	9
3.2.1 Hintergrund	9
3.2.2 Vorgehen zur Erstellung des Referenzdatensatzes	10
4 Methodik der Auditierung	14
4.1 Plausibilitätsprüfung	15
4.2 Vorprozessierung der Daten	17
4.3 Berechnung der Bias-Indikatoren	17
4.4 Normierung und Ranking der Bias-Indikatoren	18
4.5 Ermittlung der Jahregänge	21
4.6 Klimaänderungssignale – Berechnung und Klassifizierung	22
4.7 Visualisierung im Audit-Steckbrief	23
5 Ergebnisse	25
5.1 Bewertung der Plausibilität	25
5.2 Einordnung der Klimaänderungssignale	31
6 Diskussion	37
7 Schlussfolgerung	41
Abbildungsverzeichnis	44
Tabellenverzeichnis	46
Anhang	47

Zusammenfassung

Zur Abschätzung des zukünftigen Klimawandels ist es wissenschaftlicher Konsens, ein Modellensemble aus mehreren Klimaprojektionsläufen heranzuziehen. Dieses Vorgehen ermöglicht die Beurteilung der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Unsicherheiten. Allerdings unterscheidet sich die Wiedergabekraft der regionalen Eigenschaften des Klimas (z. B. Saisonalität des Niederschlags, räumliche Niederschlagsverteilung) deutlich zwischen den einzelnen Klimaprojektionen und zwischen verschiedenen Naturräumen. Um eine einheitliche Grundlage für Aussagen zum Klimawandel sowie darauf aufbauende Wirkungsmodellierungen und Anpassungsmaßnahmen in Bayern zu schaffen, wird am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) eine, zusammen mit der Ludwig-Maximilians-Universität München (Fakultät für Geowissenschaften) entwickelte, Plausibilitätsprüfung der regionalen Klimaprojektionen durchgeführt. Diese Veröffentlichung beschreibt die Methodik und Ergebnisse des Bayerischen Klimaprojektionsaudits als wissenschaftsbasierte Entscheidung hin zu einem plausiblen Bayerischen Klimaprojektionsensemble (Bayern-Ensemble).

1 Einleitung

Um die verschiedensten künftigen Folgen des Klimawandels auf die Menschen und ihre Umwelt abzuschätzen, ist es von entscheidender Bedeutung, die stattfindenden Veränderungen aufgrund des Klimawandels sowie die zukünftige Entwicklung des Klimas zu ermitteln. Darauf aufbauend können sinnvolle Handlungsmaßnahmen zur Klimaanpassung entwickelt und umgesetzt werden. Das zentrale Ziel der bayerischen Maßnahmen zur Klimaanpassung ist es, die Verwundbarkeit natürlicher, gesellschaftlicher und ökonomischer Systeme zu mindern und deren Anpassungsfähigkeit an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels zu erhöhen und damit die unterschiedlichen Regionen und Bereiche Bayerns zukunftsfähig zu gestalten sowie klimasicher zu machen.

Zur Koordinierung von Klimaanpassungsaktivitäten ist es notwendig, eine einheitliche, geprüfte Datengrundlage für die Abschätzung der zukünftigen Klimaveränderungen zu verwenden. Dadurch wird gewährleistet, dass die Anpassungen in verschiedenen Handlungsfeldern, wie zum Beispiel Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie Tourismus und Bauwesen auf die gleichen Auswirkungen des Klimawandels stattfinden, Klimawirkungsmodelle vergleichbare Eingangsdatensätze verwenden und bayerische Forschungsprojekte die gleichen klimatischen Grundlagen für ihre Fragestellungen und Untersuchungen nutzen. Ergebnisse und Aussagen zum Klimawandel in Bayern werden somit leichter vergleichbar und können ggf. zusammengeführt werden. Veröffentlichungen der Staatsregierung wie zum Beispiel die Bayerische Klimaanpassungsstrategie von 2016 oder das Handbuch zur Umsetzung von Klimaanpassung in Bayern (Veröffentlichung voraussichtlich 2020) legen hierbei erste wichtige Grundlagen, die in Zukunft durch weitere Projekte wie beispielsweise die Entwicklung des Bayerischen Klimainformationssystems (BayKIS) fortgeführt werden. Daher ist ein Kernziel des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) die Zusammenstellung einer bayernweit gültigen Datengrundlage an geeigneten Klimaprojektionen.

Das LfU führt hierzu Plausibilitätsuntersuchungen der verfügbaren Klimaprojektionen durch, mit dem Ziel für die Betrachtung des Klimawandels in Bayern ein einheitliches Modellensemble zu definieren. Die Datenbasis wird dabei vom Projekt EURO-CORDEX (EURO-CORDEX 2019) zur Verfügung gestellt.

Die Klimaprojektionen weisen aufgrund verschiedener Rahmenbedingungen und Modellansätze Unterschiede in ihren Ergebnissen auf, da noch nicht alle klimarelevanten Prozesse sowie die natürliche Variabilität vollständig erforscht und in den Modellen abgebildet sind. Um diesen Unsicherheiten wissenschaftlich gerecht zu werden, werden mehrere Projektionen in einem Ensemble gemeinsam verarbeitet und ausgewertet. Jedoch ist nicht jede Projektion für jede Region und jede Fragestellung gleichermaßen gut geeignet. Beispielsweise bildet nicht jede zur Verfügung gestellte Klimaprojektion die Eigenschaften des Klimas in Bayern (z. B. die Saisonalität des Niederschlags oder die Niederschlagsverteilung) realitätsnah ab. Teilweise sind zudem Auffälligkeiten in den Datensätzen vorhanden, die eine weitere Verwendung ausschließen. Daher ist es nicht sinnvoll, alle für Bayern verfügbaren Klimaprojektionen im weiteren Vorgehen auszuwerten und für die Klimafolgenbetrachtung zu nutzen. Das Ziel des LfU ist vielmehr eine einheitliche Datengrundlage in Form eines geprüften Bayerischen Klimaprojektionsensembles (Bayern-Ensemble) zu schaffen. Als ein wesentliches Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung, welche Klimaprojektionen Bestandteil des Klimaprojektionsensembles für Bayern werden, wurde das bayerische Klimaprojektionsaudit von dem Lehrstuhl Prof. Ludwig der Ludwig-Maximilians-Universität München im Rahmen von gemeinsamen Projekten entwickelt. Dieses soll eine objektive und transparente Hilfe zur Auswahl der Klimaprojektionen zum Ensemble anhand nachvollziehbarer Kriterien und gewählter Fragestellungen darstellen.

Ein zusätzlicher Grund die Klimaprojektionen zu beschränken liegt in der Anwendung der Klimaprojektionen in der Wirkmodellierung. Jede Klimaprojektion eines dynamischen, regionalen Klimamodells

kann regional oder auch generell Abweichungen (Bias) in der Abbildung des Klimas in seinen verschiedenen, modellierten Klimavariablen aufweisen. Werden in weiteren Schritten Wirkungsmodelle mit diesen Klimavariablen angetrieben, kann dieser Bias diese Wirkungsmodellierung so stark beeinflussen, dass diese Modellierung nicht mehr nutzbar ist. Daher ist es notwendig, neben dem Bias der Klimaprojektionen auch die Sensitivitäten der Wirkungsmodelle auf die verwendeten Klimavariablen zu kennen. Ergebnisse des im Rahmen der Kooperation Klimawandel und Wasserhaushalt (KLIWA) in Bayern verwendeten Wasserhaushaltsmodells zeigen, dass die Wasserhaushaltsgrößen stark auf Veränderungen des Niederschlags und der relativen Feuchte reagieren, wohingegen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit einen geringeren Einfluss besitzen. Die Sensitivität auf Veränderungen der Temperatur hängt dabei auch vom betrachteten Einzugsgebiet ab. Den stärksten Einfluss besitzen Veränderungen der Eingangparameter auf die Abflüsse und das Hochwasserquantil. Nicht plausible Klimaprojektionsdaten würden somit einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung besitzen, sodass im Sinne einer höheren Belastbarkeit der Ergebnisse eine Beschränkung des Modellensembles stattfinden sollte. Theoretisch ist solch ein Bias mit einer Bias-Adjustierung reduzierbar. Es sollten aber aus Sicht des LfU nicht Klimaprojektionen angepasst werden, die offensichtliche Defizite in der Abbildung grundlegender, klimatischer Zusammenhänge aufweisen.

Wie solch ein für Bayern plausibles Klimaprojektionsensemble (Bayern-Ensemble) mit Hilfe des am LfU benutzten Klimaprojektionsaudits ermittelt werden kann und welche methodischen Vorarbeiten für eine wissenschaftsbasierte Entscheidung zur Einbindung oder Ausschluss einzelner Klimaprojektionen notwendig sind, ist Kerninhalt dieser Publikation.

2 Untersuchungsgebiete

Im räumlichen Fokus der Beurteilung von Klimaprojektionen stand aufgrund von umfassenden Wasserhaushaltsbetrachtungen nicht das politische Bayern, sondern das etwas größere hydrologische Bayern. Als hydrologisches Bayern wird das Gebiet angesehen, aus dem alle in Bayern fließenden Gewässer gespeist werden, auch wenn das Gebiet über die Landesgrenzen Bayerns hinausreicht (Abb. 11, rote Linie). Dies ist notwendig, um den Wasserhaushalt für Bayern komplett betrachten zu können. Da das Relief einen starken Einfluss auf das regionale Klima hat, werden die Klimaprojektionen für die Anwendung auf die in Bayern anzutreffenden Naturräume analysiert. Diese Naturräume decken nach ihrer ursprünglichen Definition (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2014a) größere Gebiete als in Abbildung 1 dargestellt ab. Jedoch beziehen sich die hier verwendeten Bezeichnungen auf die innerhalb des hydrologischen Bayern liegenden Anteile: Alpen (20.500 km²), Alpenvorland (30.500 km²), Mittelgebirgsschwelle (10.400 km²) und Südwestdeutsches (Schicht-) Stufenland (34.300 km²).

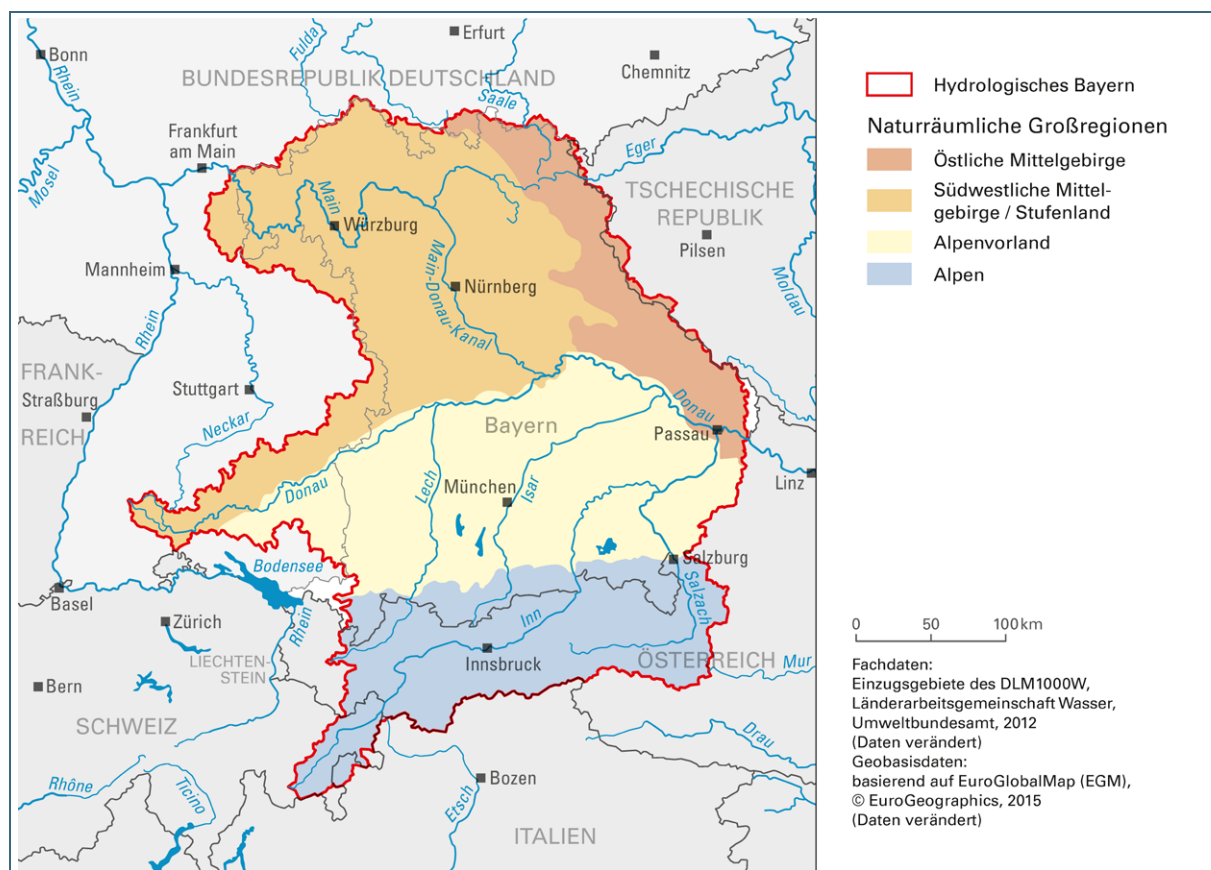


Abb. 1: Das hydrologische Bayern unterteilt in die Naturräume als Grundlage zur Analyse der Klimaprojektionen

3 Datengrundlage

3.1 Klimaprojektionen

Klimamodelle liefern die Datengrundlage für die Untersuchungen am LfU. Diese Klimamodelle beruhen auf Szenarien unterschiedlicher Treibhausgaskonzentrationen in der Erdatmosphäre (RCPs = Representative Concentration Pathways). Basierend auf globalen Zirkulationsmodellen (Global Climate Model = GCM) werden für kleinräumigere Betrachtungen (z. B. für Mitteleuropa) regionale Klimamodelle verwendet. Diese werden in einem dynamischen (KNOCHE & KEULER 2017) oder empirisch-statistischen Skalierungsverfahren (KREIENKAMP ET AL. 2017) in nahezu allen renommierten Klimaforschungsinstituten für verschiedene Teilgebiete der Welt entwickelt. Dabei sind die dynamischen regionalen Klimaprojektionen als prozessgesteuerte Klimamodelle zu verstehen, für die die Globalmodelle die Eingangsdaten liefern.

In dieser Studie liegt der Fokus auf dynamischen, regionalen Klimaprojektionen (RCM) für Bayern, da aufgrund der methodischen Entwicklung von empirisch-statistisch skalierten Klimaprojektionen (ESD) für diese Projektionen geringere Abweichungen zu erwarten sind. Die Ergebnisse der ESD werden im Anhang zur Verfügung gestellt.

3.2 Der Bayerische Klimareferenzdatensatz KliRef2014

3.2.1 Hintergrund

Für das Klimaprojektionsaudit bedarf es eines qualitativ hochwertigen, flächenhaften Klimareferenzdatensatzes. Als Referenzzeitraum dient der Zeitraum von 1971 bis 2000, da für diesen kohärente Datensätze zur Verfügung standen. In diesem Zeitraum werden die Klimaprojektionsdaten mit den Messdaten verglichen. Für Bayern wurde dafür ein eigener Referenzdatensatz erstellt, der Bayerische **Klimareferenzdatensatz 2014 (KliRef2014)**.

Die Notwendigkeit zur Erstellung eines Referenzdatensatzes beruht auf Untersuchungen des Datensatzes HYRAS-2006, den der Deutsche Wetterdienst (DWD) für Deutschland als interpolierten Rasterdatensatz zur allgemeinen Verfügung stellt. Dieser für die Klimavariablen Temperatur, Niederschlag und relative Luftfeuchte erstellte Datensatz des DWD in täglicher Auflösung (FRICK ET AL. 2014; RAUTHE ET AL. 2013) basiert auf Stationsdaten, welche mit dem REGNIE-Verfahren interpoliert wurden (RAUTHE ET AL. 2013). Das REGNIE-Verfahren ist eine Kombination aus multipler Regression unter Berücksichtigung der Orographie und inverser Distanzgewichtung. Allerdings bedarf es bei diesem Verfahren einer hohen Stationsdichte, weshalb die geringe Stationsdichte im alpinen Raum und die Unsicherheiten der Interpolationsmethoden in stark vom Relief geprägten Gebieten zu mitunter starken Abweichungen führt (RAUTHE ET AL. 2013). Daher wurde der HYRAS-2006-Datensatz im Rahmen dieser Studie insbesondere im Alpenraum auf Plausibilität geprüft. Wie in Abbildung 2 dargestellt, fällt der HYRAS-2006-Jahresniederschlag im Inntal unverhältnismäßig gering aus, auch Untersuchungen im Projekt „AdaptAlp“ bestätigten dies bereits. Es zeigte sich, dass verschiedene rasterbasierte Messdatensätze durchaus unterschiedliche Niederschlagsniveaus haben können.

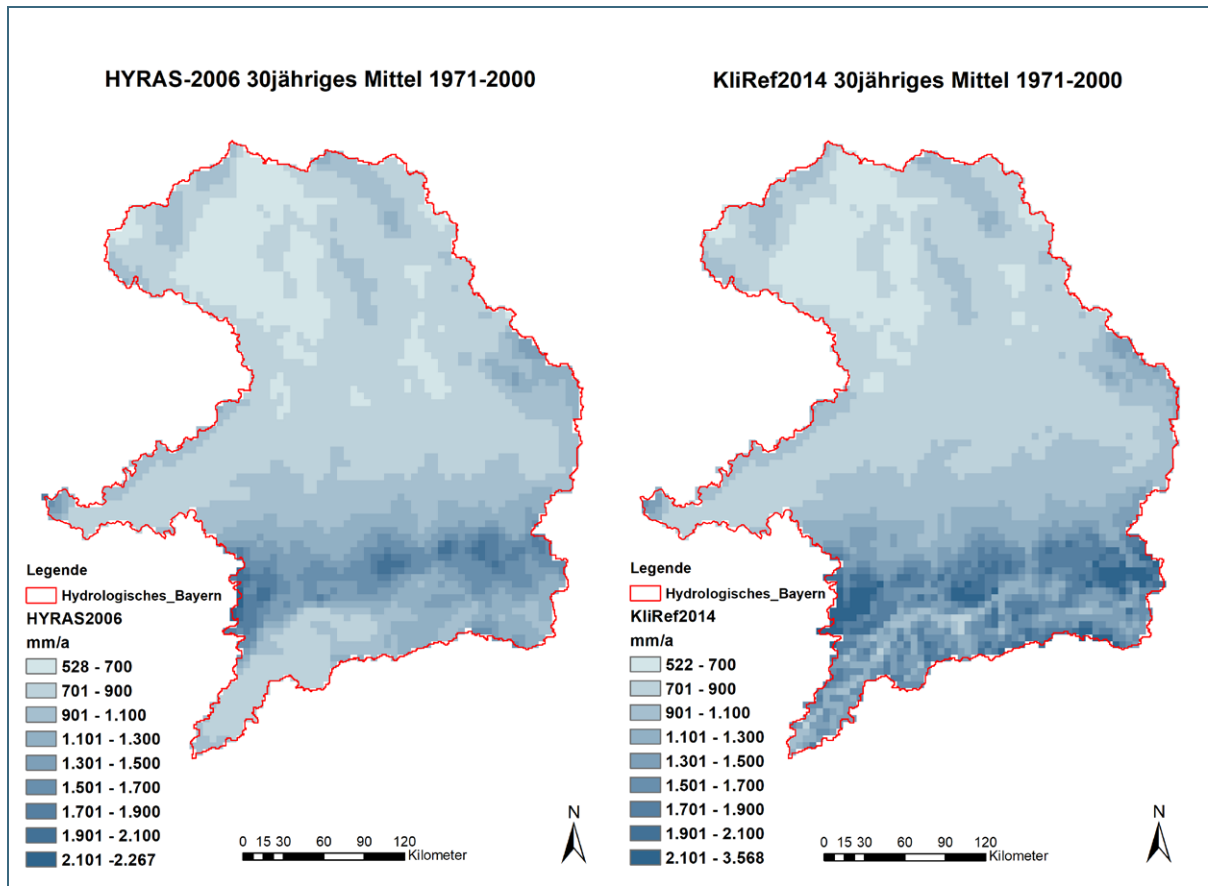


Abb. 2: Vergleich des mittleren jährlichen Niederschlags zwischen den Datensätzen HYRAS-2006 (links) und KLiRef-2014 (rechts) für das hydrologische Bayern 1971-2000

Auch für die Schweiz ermittelten FREUDINGER ET AL. (2016) eine Unterschätzung des Niederschlags im Hochgebirge. Hingegen wird die Temperatur dank ihrer starken Höhenabhängigkeit mit dem HYRAS-2006-Datensatz gut wiedergegeben. Sowohl in der Studie von FREUDINGER ET AL. (2016) als auch in der vorliegenden Studie lassen sich die Niederschlagsabweichungen durch Unterschiede der zur Interpolation verwendeten digitalen Geländemodelle erklären. Vor allem im Hochgebirgsbereich der Alpen liegen Höhenunterschiede zwischen den beiden DGMS vom DWD und LfU mit einer Spannweite von -600 m bis +900 m vor. Mit einer LfU-eigenen Interpolation der Niederschlagsdaten für den alpinen Bereich unter Verwendung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM (SCHULLA 2012) ist der alpine Bereich im bayerischen **Klimareferenzdatensatz 2014** (KLiRef2014) deutlich feuchter (Abb. 2). Ein weiterer Grund für die Erstellung eines eigenen Datensatzes ist die Nutzung der Klimaprojektionen für die Wasserhaushaltsmodellierung mit WaSiM. Aufgrund der für diese Modellierung notwendigen Klimavariablen Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung, die nicht in HYRAS2006 zur Verfügung standen, sowie der starken HYRAS-Niederschlagsunterschätzungen im Alpenraum (FREUDINGER ET AL. 2016), sah das LfU 2013 die Notwendigkeit für die Erstellung eines eigenen, neuen Klimareferenzdatensatzes für Bayern.

3.2.2 Vorgehen zur Erstellung des Referenzdatensatzes

Der neue Klimareferenzdatensatz, der Bayerische **Klimareferenzdatensatz 2014** (KLiRef2014) wurde aus verschiedenen Datensätzen gemessener Klimavariablen im Rahmen eines Projekts mit der Ludwig-Maximilians - Universität München (Fakultät für Geowissenschaften / Lehrstuhl Prof. Ludwig zusammengestellt. Im Kern besteht er aus dem HYRAS-2006-Datensatz (FRICK ET AL. 2014; RAUTHE ET

AL. 2013), welcher vor allem im Randbereich der Bayerndomäne durch andere Datensätze ergänzt wurde.

Da die Datenverfügbarkeit und Qualität der einzelnen Klimavariablen unterschiedlich sind, wurde auch das Vorgehen zur Erstellung des Referenzdatensatzes entsprechend angepasst. Für die Klimavariablen Temperatur, Niederschlag und relative Luftfeuchte wurde für die Gebiete nördlich der Donau und den Baden-Württembergischen Teil des Donaeinzugsgebiets der HYRAS-Datensatz zur Erstellung des Referenzdatensatzes verwendet. Hingegen wurden für die südlichen Einzugsgebiete der Donau Stationsdaten interpoliert. Außerhalb des hydrologischen Bayerns wurden die europäischen Beobachtungsdaten von ENSEMBLES Observation Data (E-OBS; CORNES ET AL. 2018), Monitoring Agricultural ResourceS - Meteorological dataset (MARS; JRC 2015) und European Center for Medium Range Forecasting 40-year re-analysis dataset (ERA-40; EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS 2005) verwendet (Tab. 1).

Um eine in sich konsistente Referenz zu erhalten, wurden alle zur Verfügung stehenden Daten zu den jeweiligen meteorologischen Variablen zusammengeführt. Dazu wurde in KLIWA in Bayern das hydrologische Modell WaSiM verwendet, welches aufgrund des implementierten Moduls „Regional Superposition“ (SCHULLA 2012) auch für die Wasserhaushaltmodellierung zum Einsatz kam. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass der mit der Wasserhaushaltsmodellierung identische Referenzdatensatz die Anforderungen an die Klimavariablen für die Wirkungsmodellierung im Klimaprojektionsaudit optimal wiedergibt.

In WaSiM ist es möglich mehrere Interpolationsmethoden zugleich für eine meteorologische Variable (z. B. Inverse Distanzgewichtung (IDW) und höhenabhängige Regression) aber auch bereits bestehende Rasterdatensätze zu verwenden. Um große Wertesprünge zwischen den Bereichen (Zonen) mit unterschiedlichen Datenquellen und Interpolationsmethoden zu vermeiden, wurden die Parameterwerte modellintern in einem vorher definierten Bereich (Übergangszone – *Transition Zone*) entlang der Zonengrenzen distanzgewichtet gemittelt (SCHULLA 2012). Dieser Übergangsbereich umfasst eine Breite von fünf Kilometern zu beiden Seiten der Zonengrenzen.

Tab. 1: Die zur Erstellung des KliRef2014 Datensatzes verwendeten Daten

Datensatz	Format	Verwendeter Zeitraum	Verwendete Variable	Quelle
Messwerte	Stationsdaten	01.01.1970 - 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag Relative Luftfeuchte Sonnenscheindauer Windgeschwindigkeit	CDC 2013
HYRAS 2006	Raster 5x5 km ² (interpoliert aus Stationsdaten)	01.01.1970 – 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag Relative Luftfeuchte	FRICK ET AL. 2014; RAUTHE ET AL. 2013
E-OBS	Raster 0,25°	01.01.1970 – 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag	ENSEMBLES DATA ARCHIVE 2014
MARS	Raster 25x25 km ² (interpoliert aus Stationsdaten)	01.01.1975 - 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag Relative Luftfeuchte Globalstrahlung Windgeschwindigkeit	JRC 2015
ERA-40 (ECMWF RE-ANALYSIS)	Raster 1,125°x1,125°	01.01.1970 - 31.12.1974	Relative Luftfeuchte Globalstrahlung Windgeschwindigkeit	EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS 2005

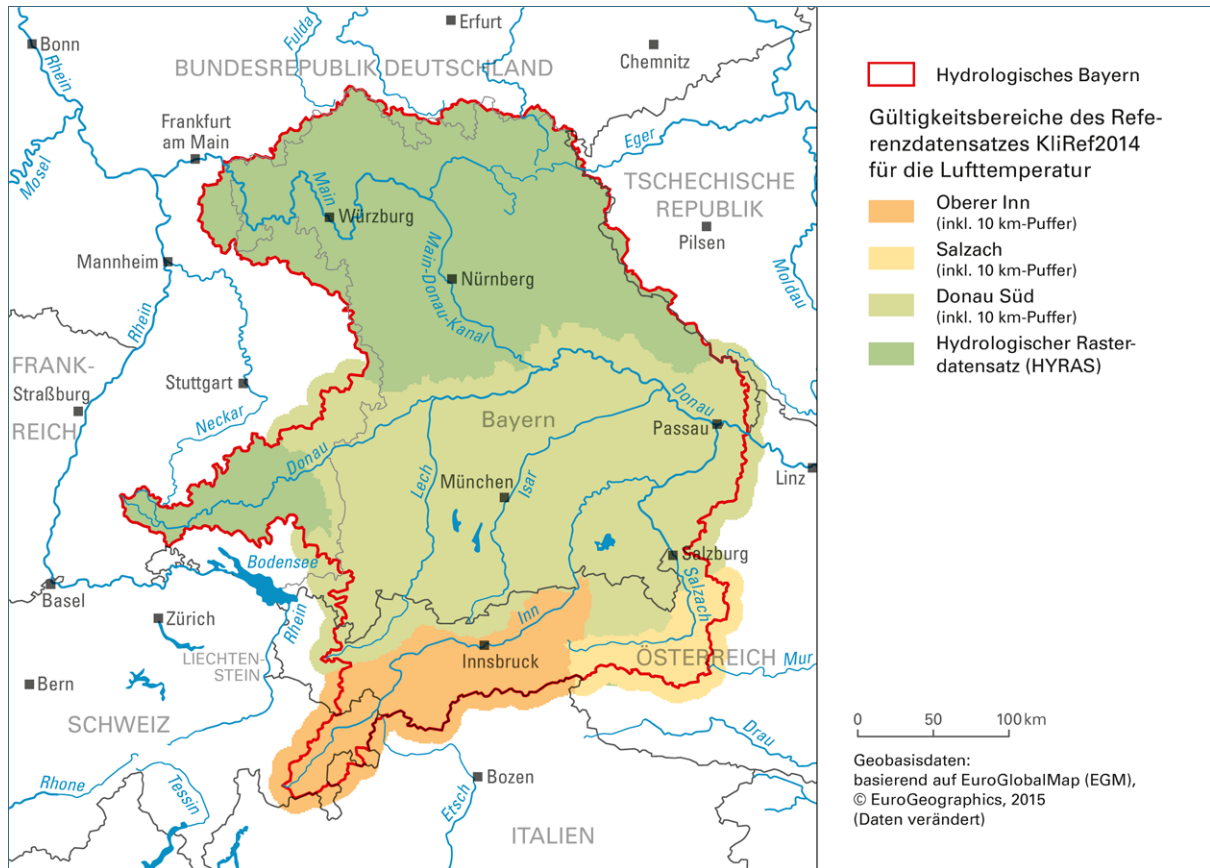


Abb. 3: Darstellung der Zonierung für die WaSiM-interne Interpolation der Lufttemperatur. Anhand dieses Rasters werden die Daten aus unterschiedlichen Quellen durch das hydrologische Modell WaSiM zusammengeführt.

Für den Datensatz der **Lufttemperatur** wurde Bayern in fünf Zonen unterteilt (siehe Abb. 3). Der Bereich der südlichen Donauzuflüsse wurde aufgrund leicht unterschiedlicher Interpolationsmethoden in drei Zonen untergliedert. Die Zonen im Südosten und Nordwesten des hydrologischen Bayerns bilden den Bereich der rasterbasierten Modelldaten mit jeweils E-OBS und HYRAS-Daten. Für die südlichen Donauzuflüsse wurde zusätzlich ein Pufferbereich von 10 km entlang der äußeren Grenzen eingerichtet. Dadurch wird für diese Zonen ein möglichst großer Bereich mit interpolierten Messdaten abgedeckt und eine Werteglättung aufgrund der Übergangzone vermieden.

Das gleiche Vorgehen wurde für die Erstellung der Daten zur **relativen Luftfeuchte** gewählt. Da Außerhalb des hydrologischen Bayerns nur eingeschränkt Stationsdaten vorhanden sind, wurden je nach Verfügbarkeit MARS oder ERA-40-Daten verwendet (Tab. 2).

Die **Niederschlags**daten wurden zunächst WaSiM-intern, unter Verwendung des LfU-DGM, für das gesamte Gebiet der südlichen Donauzuflüsse mittels IDW interpoliert. Anschließend folgte die Interpolation durch höhenabhängige Regression. Auch hier wurde ein Puffer von zehn Kilometern um das Gebiet hinzugefügt.

Für den **Wind**datensatz wurden innerhalb des hydrologischen Bayerns Stationsdaten interpoliert, während die Gebiete außerhalb aus dem MARS- und ERA-40-Datensatz abgeleitet wurden.

Innerhalb des hydrologischen Bayerns wurden unter Verwendung des Wasserhaushaltsmodells die Stationsdaten der Sonnenscheindauer interpoliert und in die **Globalstrahlung** umgerechnet. Außerhalb wurde der Datensatz mit den Daten aus E-OBS- und MARS-Daten ergänzt.

Tab. 2: Datengrundlage für die verschiedenen meteorologischen Parameter und WHM-Regionen

Bereiche (Zonen)	Temperatur	Nieder-schlag	Global-strahlung	rel. Luft-feuchte	Windge-schwindigkeit
Südliche Donau	M	M	M*	M	M
Donauzufluss aus Baden-Württemberg	HYRAS	HYRAS	M*	HYRAS	M
Nördliche Donau	HYRAS	HYRAS	M*	HYRAS	M
Randbereiche	HYRAS & E-OBS	HYRAS & E-OBS	MARS & ERA-40	MARS & ERA-40	MARS & ERA-40
	* aus Stationsdaten der Sonnenscheindauer mit WaSiM interpoliert und berechnet M = gemessene Stationsdaten.				

Bei dem obengenannten Vorgehen wurde sichergestellt, dass die selben Datengrundlagen wie in der Wasserhaushaltsmodellierung verwendet wurden. Somit ist eine Validierung über die Wasserhaushaltsmodellierung möglich. Die Validierung des KliRef2014 erfolgte anhand eines Vergleichs der hydrologischen Modellergebnisse ausgewählter Pegel der südlichen Donauzuflüsse. Dabei wurden nur die mit den gemessenen Daten und mit KliRef2014 modellierten Regime betrachtet und eine gute Übereinstimmung erzielt. Somit konnte eine erfolgreiche Überführung des auf Stationsdaten basierenden Datenbestandes in einen flächenhaften Rasterdatensatz belegt werden.

4 Methodik der Auditierung

Das in Zusammenarbeit mit der Ludwig-Maximilians-Universität München (Fakultät für Geowissenschaften / Lehrstuhl Prof. Ludwig) erstellte Audit als methodische Hilfe zur Beurteilung und Auswahl von Klimaprojektionen für bestimmte Fragestellungen beruht auf quantitativen und visuellen Bewertungskriterien, welche im folgenden Ablaufschema dargestellt sind (Abb. 4).

Das Klimaprojektionsaudit beruht einerseits auf vier Bias-Indikatoren zur Einschätzung der Abweichung der zu betrachtenden Klimaprojektion vom Referenzdatensatz. Andererseits betrachtet es die Stärke und die Richtung des Änderungssignals für die Zeiträume der nahen Zukunft (2021-2050), der mittleren Zukunft (2041-2070) und fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971-2000). Dazu wurden jeweils die täglichen Zeitreihen der Temperatur und des Niederschlags auf die vier Naturräume Bayerns (vgl. Abb. 2) räumlich aggregiert. Es wurden ausschließlich 30-jährige Mittel der Zeitreihen miteinander verglichen (zeitliche Aggregation).

Als Ergebnis des Audits erhält der Anwender verschiedene Darstellungen und Indikatoren. Diese dienen dann als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen. Das Audit gibt somit keine Empfehlung, sondern nur Anhaltspunkte für den Ausschluss von nicht plausiblen Klimaprojektionen. Es ist somit auch abhängig von der gewählten Fragestellung oder Anforderung an die Klimaprojektionen. Dies entscheidet auch darüber, welche Klimavariablen oder Kennwerte der Klimaprojektionen betrachtet werden sollten. Ebenso relevant sind auch die tolerierbaren Abweichungen oder Unzulänglichkeiten im Hinblick auf die Fragestellung für eine zu treffende Auswahl von Klimaprojektionen. Sollen nur grobe Tendenzen von klimatischen Veränderungen ermittelt werden, kann es ausreichen, dass die Saisonalität zum Beispiel des Niederschlags einigermaßen gut getroffen ist. Sollen Wirkmodelle verwendet werden, sind ansonsten höhere Anforderungen in Abhängigkeit von deren Sensitivität bei den klimatischen Eingangsdaten zu stellen.

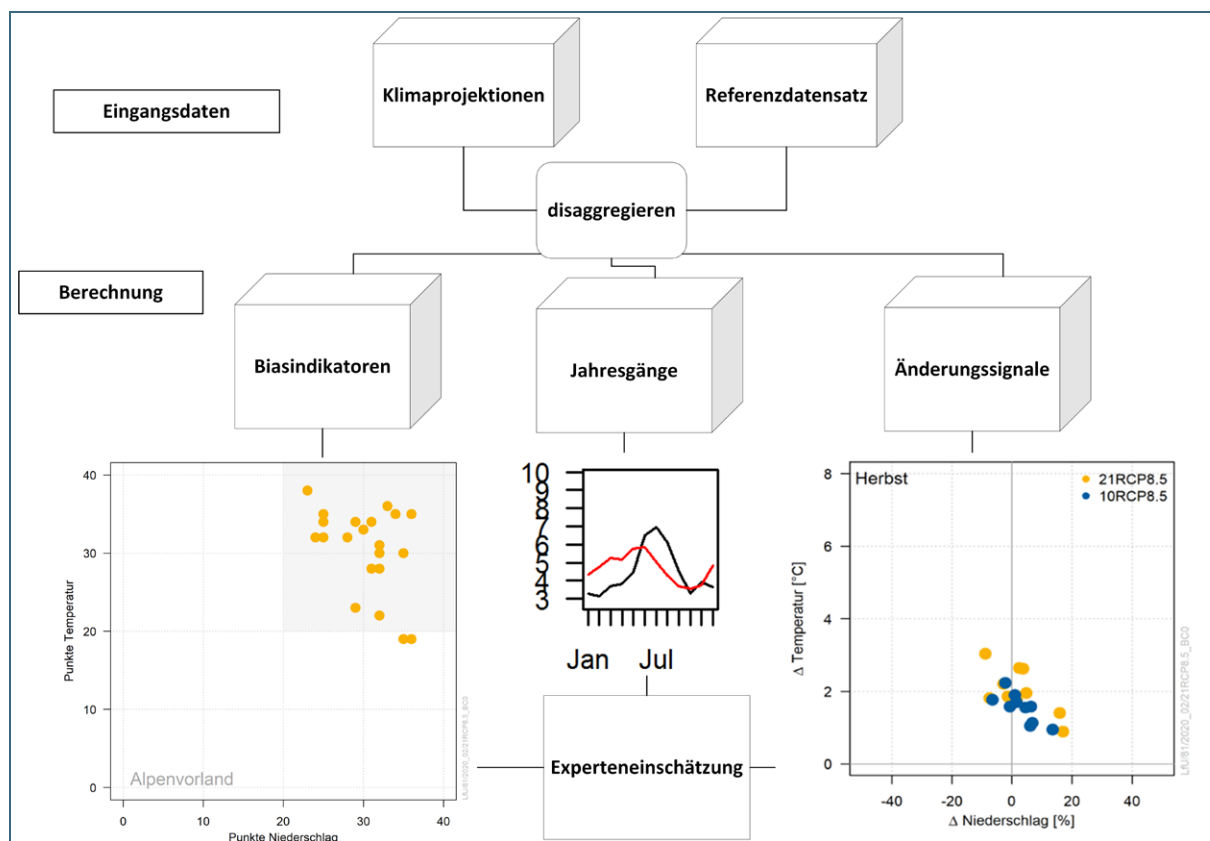


Abb. 4: Prozess der Auditierung

4.1 Plausibilitätsprüfung

Vor der Auditierung werden am LfU die Klimaprojektionen einer zweistufigen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Eine erste Prüfung der zur Verfügung stehenden Klimaprojektionen erfolgt auf Basis der Auswertung wissenschaftlicher Publikationen und den Beurteilungen dritter Fachinstitutionen, wie dem Deutschen Wetterdienst (DWD) mit dem DWD-Referenz Ensemble 2018 (DWD 2018), dem ReKlies-Projekt sowie weiterer Fachpublikationen (z. B. DALELANE ET AL. 2018, SMIAITEK ET AL. 2016). Von diesen Institutionen als nicht plausible identifizierte Projektionen werden von vornherein von dem zu prüfenden Ensemble ausgeschlossen. Als nicht plausibel gelten zum Beispiel Projektionen, deren zugrundeliegenden Globalmodelle nicht in der Lage sind, die regionalen Zirkulationsmuster und klimatischen Prozesse abzubilden (MCSWEENEY ET AL. 2015). Weiterhin gelten Projektionen als nicht plausibel, wenn die physikalische Konsistenz des Datensatzes eines GCM für den Antrieb eines RCMs nicht gegeben ist, oder andere physikalische Prozesse, wie die Treibhausgasentwicklung, nicht ausreichend abgebildet wurden (JEREZ ET AL. 2018).

Die Ausdifferenzierung verschiedener Emissionsszenarien mit einem unterschiedlichen Strahlungsantrieb erfolgt in den RCPs ab dem Jahr 2006. Demzufolge basieren alle Szenarien auf den gleichen historischen Daten und die Ergebnisse des Audits einer Projektion treffen für alle RCP Szenarien zu.

In der zweiten Stufe der Plausibilitätsprüfung werden die Modelldaten der Klimaprojektionen auf fehlerhafte oder extreme Werte untersucht. Dieser Datenqualitätscheck umfasst die Darstellung der Tageswerte jeder Klimavariablen. Durch die visuelle Analyse können bereits systematische Fehler, wie das Überschreiten von plausiblen Grenzwerten (z. B. mittlere Tagestemperaturen in Bayern unter -50 °C , siehe Abb. 5) leicht identifiziert werden. Wird eine Projektion erkannt, die nicht diesen Kriterien entspricht, wird die Verfügbarkeit aktuellerer Daten geprüft sowie diese Information den Entwicklern zurückgemeldet und die Projektion vorerst aus der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen.

Nach der ersten Prüfstufe verbleiben von den 29 gegenwärtig verfügbaren RCMs noch 21 (siehe Tab. 3, Stand DWD-Referenz-Ensemble 2018) zur weiteren Prüfung. Aus der Menge der ESD-Projektionen stehen in gleichem Zuge nur noch 60 ESD-Realisationen mit dem Modell WETTREG2013 (Wet13) zur Auditierung bereit (Tab. 3).

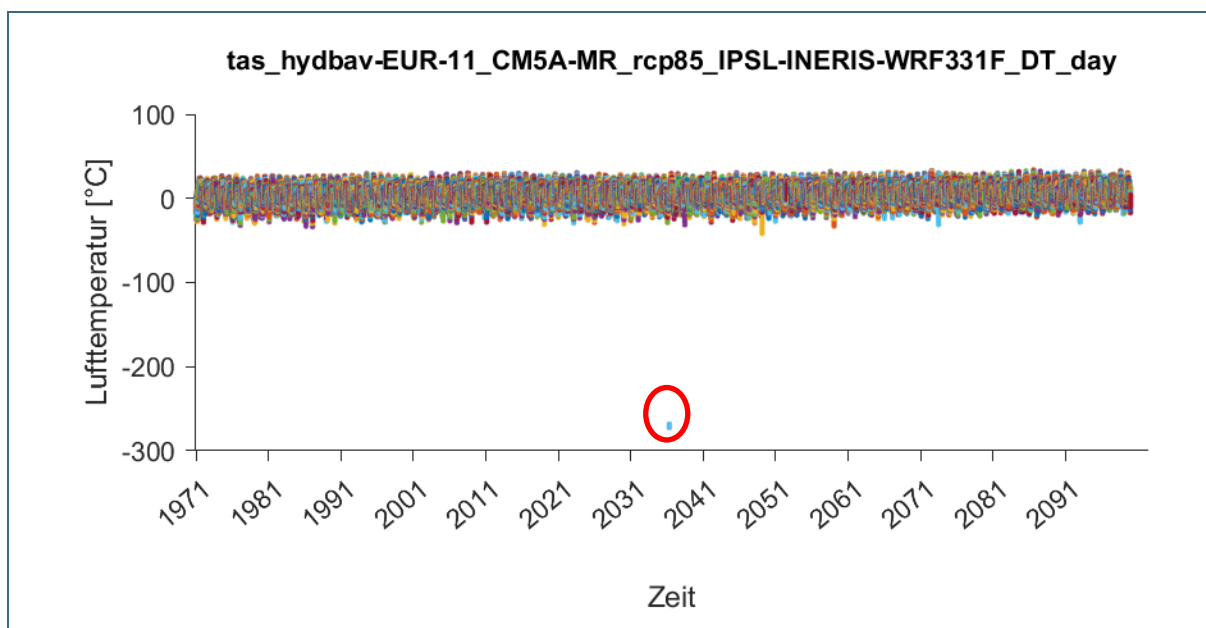


Abb. 5: Visuelle Qualitätskontrolle der unbearbeiteten Klimaprojektionsdaten. Nicht plausible mittlere Tagestemperaturen sind rot umrandet.

Tab. 3: Für die Auditierung verwendetes DWD-Referenz-Ensemble 2018 (DWD 2018) mit 21 RCP8.5 (grau) sowie sechs ESD-Projektionen (hell hinterlegt)

GCM	RCM	ALADIN53	CCLM4-8-17	HIRHAM5-v1	HIRHAM5-v2	RACMO22Ev1	RACMO22Ev2	RCA4v.1	RCAv.1a	REMO2009	REMO2015	WRF334F	WRF361H	STARS3	WET13	
CanESM2_r1																
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5		X	X					X			X			X		10
ICHEC-EC-EARTH_r1																
ICHEC-EC-EARTH_r3					X											
ICHEC-EC-EARTH_r12														X		10
IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1												X				
MIROC5_r1														X		10
MOHC-HadGEM2-ES_r1				X										X		10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1														X		10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r2																
NorESM1-M_r1					X											
Datenquelle							CORDEX		ReKliEs-DE							
Vom Ensemble ausgeschlossen									X							

4.2 Vorprozessierung der Daten

Regionale Klimaprojektionen liegen teilweise in unterschiedlichen Geometrien (verschiedene Rastergitter und Auflösung) vor (z. B. REMO und ALADIN, siehe Abb. 6). Ein direkter Vergleich zwischen den Projektionen ist daher nicht möglich und führt zu nicht vernachlässigbaren Fehlern. Auch der Referenzdatensatz KliRef2014 liegt in einem anderen Gitterformat (5 km Rasterdatensatz) vor. Über ein Aggregierungs- und Disaggregierungsverfahren werden daher für die weiteren Arbeiten alle Projektionen und der Referenzdatensatz auf ein einheitliches Gitter gleicher Geometrien und Ausdehnung prozessiert. Mit der überwiegenden Nutzung einer einheitlichen Geometrie durch Euro-CORDEX oder ReKlies-DE hat sich diese Problematik deutlich reduziert.

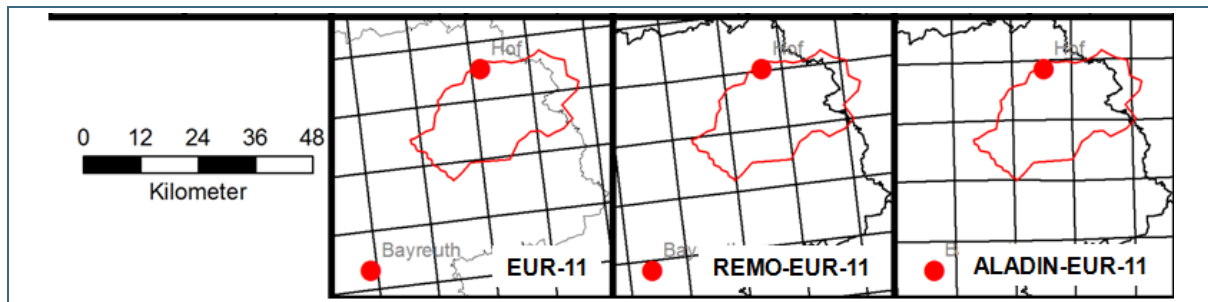


Abb. 6: Geometrien der verfügbaren Klimaprojektionen

4.3 Berechnung der Bias-Indikatoren

Im nächsten Schritt werden vier Bias-Indikatoren berechnet, die nach verschiedenen Tests ausgewählt wurden. Diese dienen zur Quantifizierung der Abweichungen der Projektionen vom Referenzdatensatz KliRef2014 in der Referenzperiode 1971-2000. Sie bewerten bestimmte Eigenschaften (z. B. die Wiedergabe des räumlichen Musters) der Klimaprojektionen möglichst unabhängig voneinander und ermöglichen eine Vergleichbarkeit der Modelldaten. Die Ausprägungen nachfolgender vier Bias-Indikatoren werden im Rahmen des hier vorgestellten Audits quantifiziert:

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

Für die vier Naturräume des hydrologischen Bayerns (Abb. 1) wurden die Gebietsmittel der Bias-Indikatoren wie folgt berechnet:

- **Indikator I (Quantitätsindikator):** Für die täglichen Referenzdaten und die Klimaprojektionsdaten des Referenzzeitraumes wird jeweils der Mittelwert berechnet. Diese beiden Mittelwerte werden voneinander subtrahiert. Der Betrag dieser Differenz entspricht dem Quantitätsindikator.

$$\text{Quantitätsindikator 1} = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n BCO_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{KliRef2014}_i \right| \quad (\text{Gleichung 1})$$

mit n = Tage der Zeitreihe der Referenzperiode 1971-2000, BCO = Klimaprojektionsdaten, KliRef2014 = Referenzdatensatz

- **Indikator II (Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug):** Für die täglichen Referenzdaten und die Klimaprojektionsdaten des Referenzzeitraumes werden jeweils die Monatsmittelwerte für alle zwölf Monate berechnet. Diese Monatsmittelwerte werden jeweils voneinander subtrahiert. Danach wird aus dem Betrag dieser zwölf Differenzen der Mittelwert berechnet. Dies ist dann der Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug.

$$Quantitätsindikator\ 2 = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} |\overline{BCO}_m - \overline{KliRef2014}_m| \quad (Gleichung\ 2)$$

mit m = durchschnittliche Monatswerte der Zeitreihe der Referenzperiode 1971-2000

- **Indikator III (Saisonalitätsindikator):** Der Saisonalitätsindikator ist die um den Bias normalisierte Kling-Cupta-Effizienz der durchschnittlichen monatlichen Werte. Diese Effizienz ist ein Gütemaß aus Korrelationskoeffizient und Standardabweichung und gibt die Abweichung des Jahresganges der monatlichen Durchschnittswerte zwischen Klimaprojektionsdaten und Referenzdatensatz in der Referenzperiode 1971-2000 an.

Saisonalitätsindikator =

$$1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{12} (BCO_m - \overline{BCO})^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^{12} (KliRef2014_m - \overline{KliRef2014})^2}} - 1 \right)^2} \quad (Gleichung\ 3)$$

- **Indikator IV (Musterindikator):** Der Musterindikator ist der Pearson'sche Korrelationskoeffizient zwischen mittleren Jahreswerten aller Rasterzellen innerhalb des jeweiligen Untersuchungsgebietes des Referenzdatensatzes und der Klimaprojektionsdaten der Referenzperiode 1971-2000 (vgl. Beispiel in Abb. 10).

$$Musterindikator = \frac{\sum_{i=1}^p (KliRef2014_i - \overline{KliRef2014})(BCO_i - \overline{BCO})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^p (KliRef2014_i - \overline{KliRef2014})^2) (\sum_{i=1}^p (BCO_i - \overline{BCO})^2)}}$$

(Gleichung 4)

mit p = Rasterzellen innerhalb des Untersuchungsgebietes.

4.4 Normierung und Ranking der Bias-Indikatoren

Die vier Bias-Indikatoren werden für sämtliche Projektionen für die vier Naturräume berechnet. Mit dem Ziel einer vergleichbaren Bewertung zwischen verschiedenen Gebieten, werden die Indikatoren zunächst normiert durch Bildung von einheitlichen Klassen auf Basis definierter Schrittgrößen (Tab. 4).

Tab. 4: Schrittgröße des Bewertungsschlüssels zur Normierung der Bias-Indikatoren

Klimavariablen	Indikator I	Indikator II	Indikator III	Indikator IV
Temperatur	0,25 °C	0,25 °C	0,01	0,1
Niederschlag	Hälfte des mittleren täglichen Niederschlags/11	Hälfte des mittleren täglichen Niederschlags/11	0,1	0,1
rel. Luftfeuchte	0,025	0,025	0,01	0,1
Globalstrahlung	5 W/m²	5 W/m²	0,1	0,1
Wind	0,5 m/s	0,5 m/s	0,1	0,1

Die Vergabe der Punkte basiert auf einem eigens definierten Bewertungsschlüssel (Tab. 5). Bei diesem Bewertungsschlüssel werden den Indikatoren Punkte zwischen 0 und 10 in elf gleich großen Klassen zugewiesen. Je geringer die Abweichung vom Referenzdatensatz ist, desto mehr Punkte werden der Projektion zugewiesen. Die Festlegung des Bewertungsschlüssels erfolgt auf Basis des fachspezifischen Wissens. Dadurch ist diese Festlegung natürlich zu einem gewissen Grad subjektiv. Die Anpassung des Bewertungsschlüssels ist somit abhängig von der Fragestellung und den definierten Anforderungen und ohne großen Aufwand möglich.

Beim hier vorliegenden Bewertungsschlüssel wird für die Bewertung der Temperaturabweichung als fester Grenzwert 2,5 °C für die Quantitätsindikatoren I und II definiert. Eine Temperaturabweichung größer als 2,5 °C liegt bereits im unteren Bereich der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft und ist daher als Bias nicht akzeptabel. Demnach erhalten Projektionen mit einem Temperaturbias größer als 2,5 °C keinen Punkt. Somit ergeben sich für die Quantitätsindikatoren der Temperatur feste Teilschritte von 0,25 °C (Tab. 4).

Durch die stärkere räumliche Variabilität des Niederschlags und der damit verbundenen unterschiedlichen mittleren Gebietsniederschläge ist es im Gegensatz zur Temperatur problematischer einen einheitlichen Grenzwert der Abweichung festzulegen. Daher wird dieser Wert für den Niederschlag für die Quantitätsindikatoren I und II auf 50 % des täglichen Durchschnittswertes der Referenz zwischen 1971 und 2000 im jeweiligen Naturraum festgelegt. Somit ist durch die Berechnung der relativen Abweichung zum jeweiligen absoluten Gebietsmittel die Vergleichbarkeit zwischen den Gebieten gegeben. Demnach wird für die Quantitätsindikatoren des Niederschlags eine Klimaprojektion mit einem Bias größer als 50 % des Referenzwertes keine Punkte erhalten. Der Referenzniederschlag liegt im vorliegenden Beispiel der Naturraums Mittelgebirge bei 2,4 mm/Tag. Demzufolge liegt der Grenzwert für Niederschlag bei rund 1,2 mm/Tag.

Tab. 5: Schlüssel zur Vergabe von Bewertungspunkten für die Bias-Indikatoren

Punkte	Niederschlag		Temperatur		
	Quantitätsindikator I und Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug II % Abweichung	Saisonalitätsindikator III und Musterindikator IV	Quantitätsindikator I und Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug II °C Abweichung	Saisonalitätsindikator III	Musterindikator IV
10	5	0,92	0,25	0,96	0,92
9	10	0,84	0,50	0,92	0,84
8	15	0,76	0,75	0,88	0,76
7	20	0,68	1,00	0,84	0,68
6	25	0,60	1,25	0,80	0,60
5	30	0,52	1,5	0,76	0,52
4	35	0,44	1,75	0,72	0,44
3	40	0,36	2,00	0,68	0,36
2	45	0,28	2,25	0,64	0,28
1	50	0,20	2,5	0,60	0,20
0	>50	<0,20	>2.5	<0,60	<0,20

Auf Grundlage der Erfahrungen über die Dimension des Bias der relativen Luftfeuchte, Wind und Solarstrahlung werden jeweils feste Teilschritte von 0,025, 0,5 m/s und 5 W/m² gewählt.

Die angewandten Bewertungsschlüssel für die Saisonalitäts- und Musterindikatoren (Indikatoren III und IV) unterliegen weniger subjektiven Rahmenbedingungen. Beispielsweise, bedeutet eine Kling-Cupta-Effizienz von eins eine vollkommene Übereinstimmung der Jahresgänge von Referenz und

Projektion. Als untere Grenze beim Saisonalitätsindikator wurden daher 0,20 beim Niederschlag und 0,60 bei der Temperatur festgelegt. Für den Saisonalitätsindikator des Niederschlags wurden Schrittgrößen von 0,08 und für die Temperatur von 0,04 definiert. Der Jahresgang der Temperatur wird in der Regel relativ gut von den Klimamodellen abgebildet, daher die höhere Untergrenze. Um dennoch Unterschiede zwischen den Projektionen abbilden zu können, wurde hier eine kleine Schrittgröße gewählt (vgl. Tab. 5).

Als Musterindikator wird der Korrelationskoeffizient zwischen der Referenz und der Klimaprojektion verwendet. Auch hier wäre eine Punktevergabe bei Werten kleiner gleich Null nicht gerechtfertigt, da das Muster der Referenz und der Projektion einen positiv linearen Zusammenhang aufweisen sollten. Die Grenze für diese Musterindikatoren wurde hier auf 0,2 und die Teilschritte daher auf 0,08 (Tab. 5) festgelegt. Größere Teilschritte würden eine Differenzierung der einzelnen Klimaprojektionen hinsichtlich des Bias erschweren.

Die Differenzierung der Klimaprojektionen in solche, die das Referenzklima gut reproduzieren und in solche, die es nur ungenügend wiedergeben, unterliegt einer gewissen Subjektivität. Denn die zugrundeliegenden Bias-Indikatoren werden zwar objektiv berechnet, die Festlegung des Bewertungsschlüssels, nachdem eine erste Zuordnung zu guten und ungenügenden Projektionen erfolgt, ist aber subjektiv auf der Basis von Erfahrung und Plausibilitätsabwägungen. Für eine höhere Transparenz der Gesamtbewertung wird jeder der vier Bias-Indikatoren zuerst unabhängig voneinander mit Punkten bewertet. Durch die Addition der Punkte der Einzelindikatoren wird ein Gesamtbias der betrachteten Klimavariablen für jede Projektion berechnet. Somit können Projektionen für jede Klimavariablen pro betrachteter Region maximal 40 Punkte erreichen und miteinander verglichen werden. Die jeweilige Addition der erreichten Punkte der vier Bias-Indikatoren erfolgt einfach gewichtet und dient der Bewertung des Gesamtbias.

Die Zusammenfassung der vier Bias-Indikatoren einer Projektion zu einer Bewertungskennzahl pro Klimavariablen soll die Einordnung einzelner Projektionen in das zur Verfügung stehende Ensemble erleichtern. Bleibt die Bewertung gleich, können so auch nachträglich weitere Klimaprojektionen für den Vergleich hinzugefügt werden. Die Bewertungskennzahl gibt einen generellen Hinweis auf eine auffällige Abweichung, die dann mit den einzelnen Indikatoren oder auch mit weiteren Methoden näher analysiert werden kann. Zu diesem Zweck werden in der weiteren Verarbeitung der normierten Bias-Indikatoren Thermopluiogramme auf Basis der Bewertungskennzahl erstellt (Abb. 7).

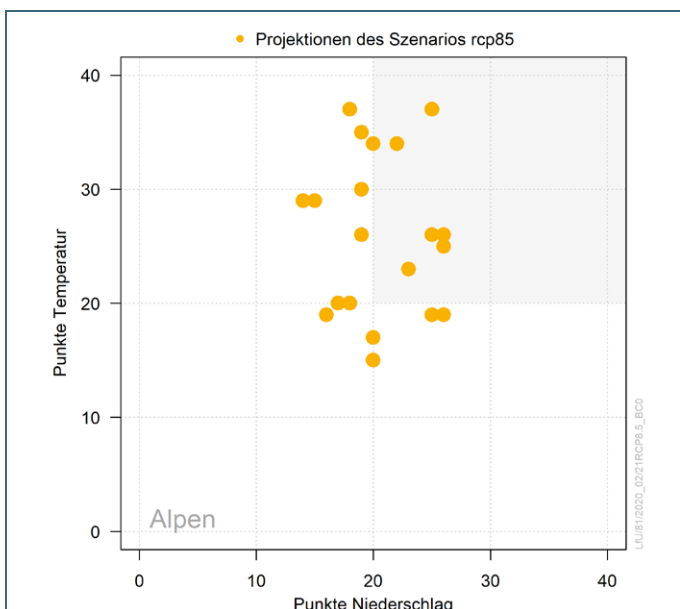


Abb. 7:
Beispiel für ein Thermopluiogramm der normierten Bias-Indikatoren für den Naturraum der Alpen

Aus den bisherigen Analysen hat sich gezeigt, dass Projektionen mit einer höheren Bewertungskennzahl als die Hälfte der möglichen Summe (= 20 Punkte pro Projektion, Variable und Gebiet) für die Fragestellungen des LfU eine ausreichend gute Übereinstimmung mit dem Referenzdatensatz aufweisen. Da es sich beim Audit nicht um einen Automatismus mit harten Kriterien handelt, sondern um Indikatoren für Auffälligkeiten erfolgt auch der Ausschluss nicht automatisch. Zuvor erfolgt immer eine weitere visuelle Prüfung der verschiedenen betroffenen Indikatoren (z. B. Jahresgang oder Korrelation bei Indikator IV) und weitere Betrachtungen der Klimaprojektion. Soweit möglich wird versucht, die Gründe für die geringe Bewertungszahl zu ermitteln. Damit erfolgt auch gleichzeitig eine weitere Prüfung der Auditergebnisse unabhängig von dem Indikator selbst.

4.5 Ermittlung der Jahresgänge

Eine visuelle Einschätzung der Übereinstimmung zwischen nicht Bias-korrigierter Klimaprojektion und Referenzdatensatz liefern die Jahresgänge der einzelnen Klimavariablen pro Naturraum. Der Abgleich der Jahresgänge mit den Ergebnissen der Bias-Indikatoren hilft bei der Beurteilung der Projektionen anhand der Bewertungskennzahlen. Daher werden im Rahmen der Auditierung die Jahresgänge der einzelnen Klimavariablen pro Naturraum dargestellt. Aus der Matrix von Globalmodellen (Zeilen, Abb. 8) und Regionalmodellen (Spalten, Abb. 8) können modellspezifische Charakteristika abgelesen werden. Auf einzelne auffällige Jahresgänge, beispielsweise den Verlauf des Modelles MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 wird im Ergebniskapitel 5.1 eingegangen.

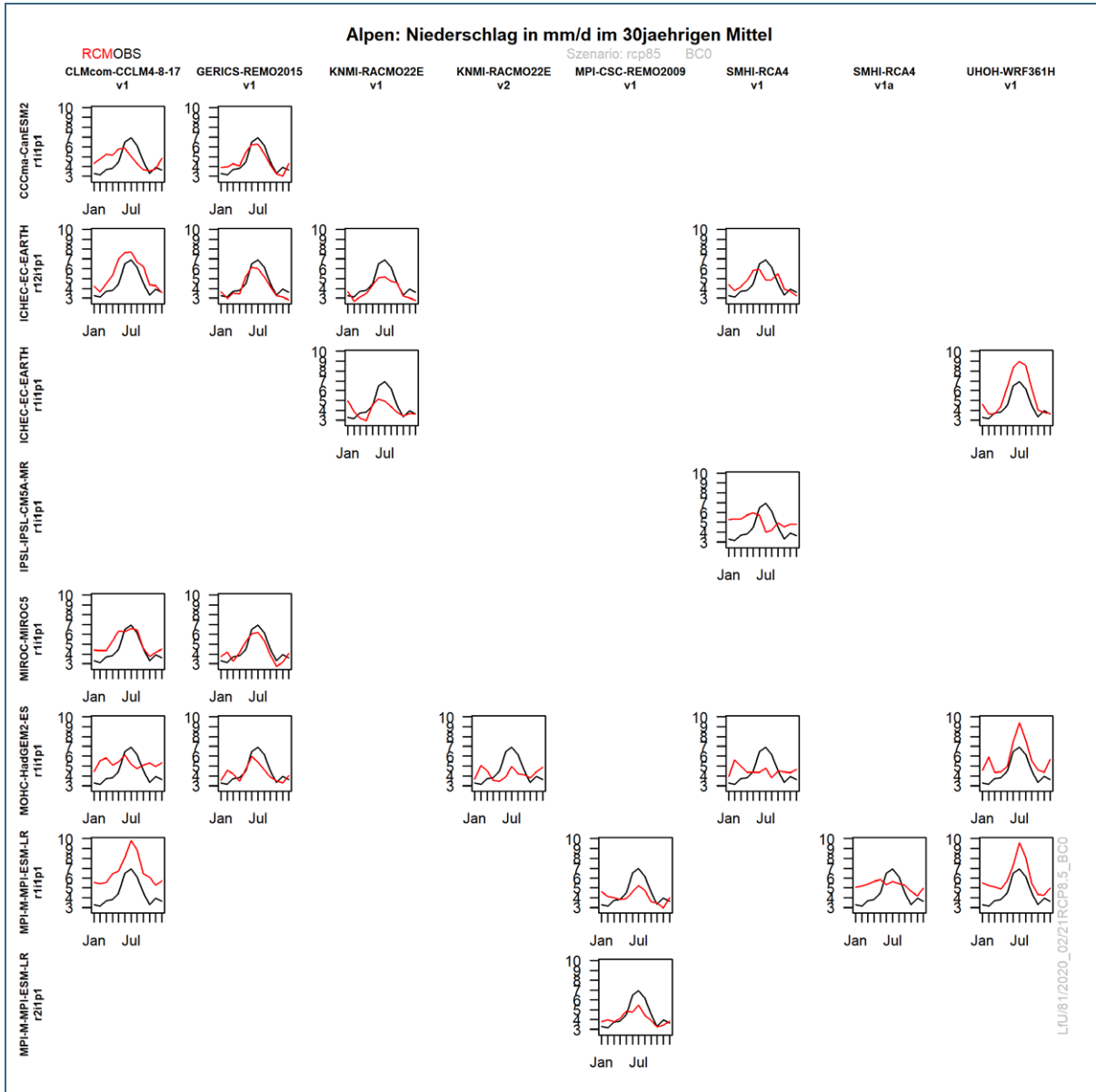


Abb. 8: Beispiel für die Darstellung der modellierten (rote Kurven) und beobachteten (schwarze Kurven) Jahresgänge des Niederschlages für den Naturraum der Alpen

4.6 Klimaänderungssignale – Berechnung und Klassifizierung

Zusätzlich zur Bewertung der Klimaprojektionen werden Klimaänderungssignale zur Beurteilung der Bandbreite der betrachteten Projektionen berechnet. Diese werden separat für Winter (Dezember, Januar, Februar), Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August) und Herbst (September, Oktober, November) berechnet. Hierbei werden die Quartalsmittel der jeweiligen Zukunftsperiode von der Referenzperiode subtrahiert. Als Zukunftsperioden werden die nahe (2021-2050), mittlere (2041-2070) und ferne Zukunft (2071-2100) betrachtet. Da einige Projektionen nur bis 2099 zur Verfügung stehen, wird der Zeitraum der fernen Zukunft zu Auswertungszwecken für alle Projektionen um ein Jahr verkürzt. Nachfolgende Auswertungen der fernen Zukunft beziehen sich also auf den Zeitraum 2071-2099.

Die Änderungssignale für Niederschlag, Globalstrahlung und Wind werden relativ zum Referenzzeitraum in Prozent angegeben. Die Temperatur wird in absoluten Werten in Grad Celsius und die relative Luftfeuchte in Teilschritten der Relativwerte angegeben.

Die Änderungssignale von Temperatur und Niederschlag werden als Thermopluviogramme getrennt nach betrachtetem Gebiet und Jahreszeit erstellt. Dadurch können beispielsweise die Konsequenzen einer Ensemblereduktion auf die Spannweite der Änderungssignale, wie in Abbildung 9 dargestellt, verdeutlicht werden. Auch wenn es vielleicht aufgrund des Audits nicht möglich ist, die Spannweite des ursprünglichen Ensembles zu erhalten, so liegt zumindest das Wissen um das Ausmaß der Reduktion der Spannweite der Änderungssignale aus dem Ensemble vor und kann bei der weiteren Verwendung berücksichtigt werden.

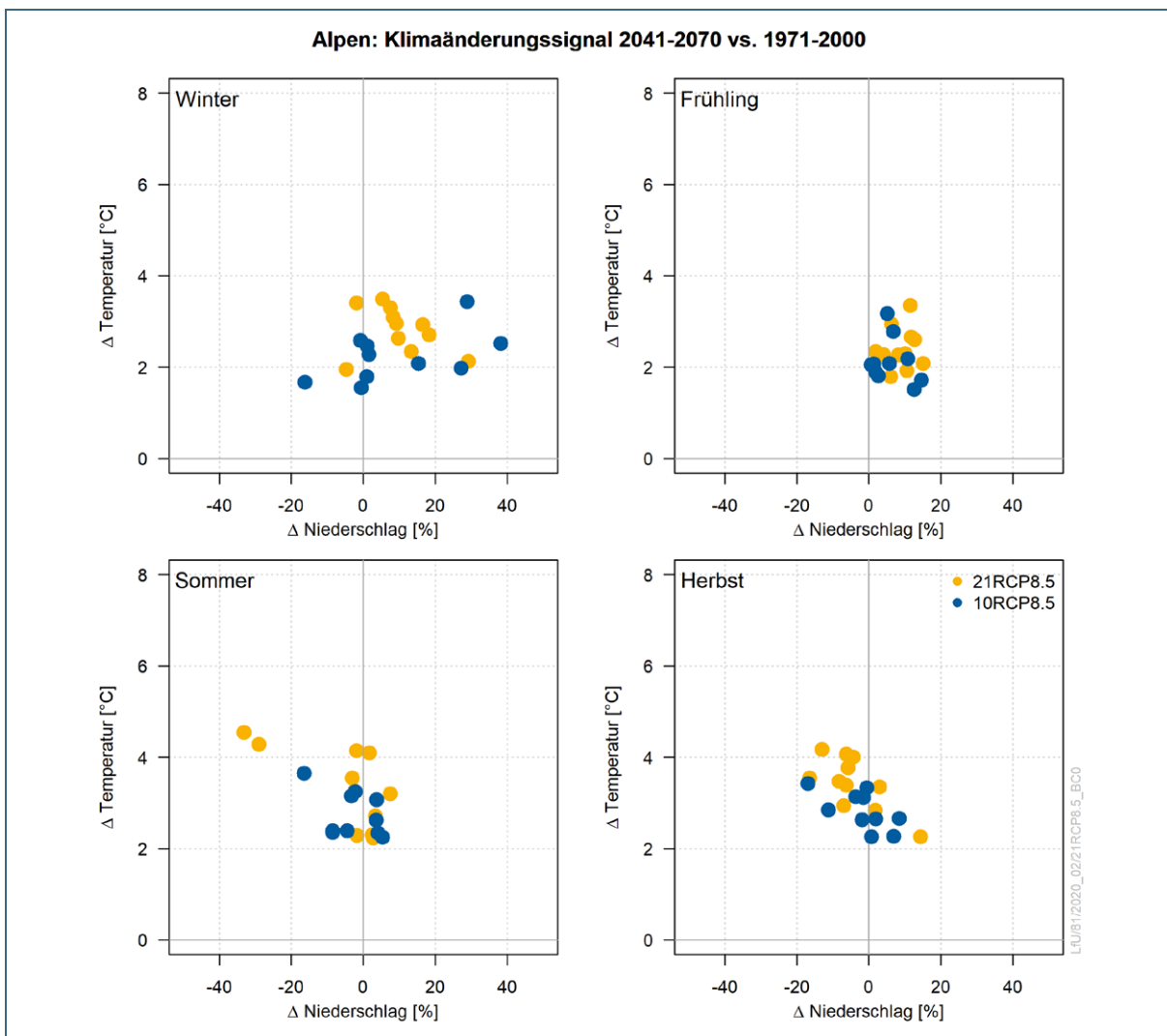


Abb. 9: Beispiel für ein Thermopluviogramm der Änderungssignale für den Naturraum der Alpen in der mittleren Zukunft. Die Auswirkung einer Reduktion um 11 Projektionen wird anhand der Farbunterscheidung visualisiert.

4.7 Visualisierung im Audit-Steckbrief

Neben den bereits vorgestellten Darstellungen bietet das LfU-Klimaprojektionsaudit die Möglichkeit, alle vier Bias-Indikatoren pro Betrachtungsgebiet in einem Steckbrief zu visualisieren (Abb. 10). Hier können vom Anwender auf einem Blick die saisonalen und räumlichen Abweichungen erfasst werden.

Am Beispiel der Projektion MPI-M-MPI-ESM-LR_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009 ist sehr deutlich die Niederschlagsverdriftung an den Mittelgebirgen zu erkennen. Dies äußert sich in einer Überschätzung (blaue Rasterzellen) des Niederschlags auf der Luvseite und eine Unterschätzung (orangene Rasterzellen) auf der Leeseite der Mittelgebirge (Abb. 10, mittlerer Teil). In der rasterzellenweisen Gegenüberstellung der Niederschlagswerte von Referenz und Projektion (Abb. 10, unterer Teil) wird deutlich, dass die räumlichen Ungenauigkeiten besonders für Zellen mit größeren Niederschlägen zum Tragen kommen. Zu beachten ist auch, dass hier die Indikatoren mit ihren absoluten Werten und nicht normiert mit den zugeteilten Punkten angegeben werden.

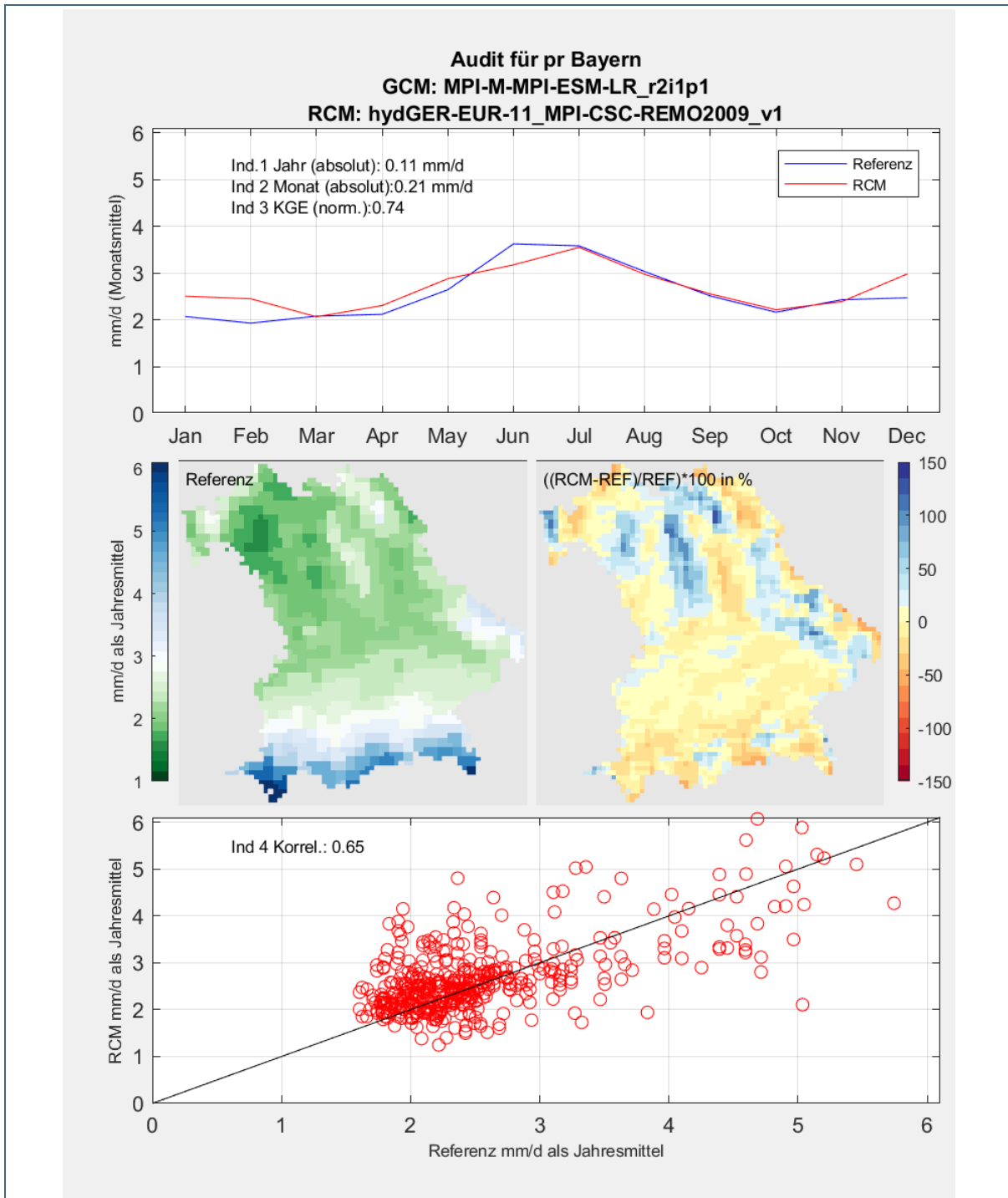


Abb. 10: Beispiel für einen Steckbrief der Bias-Indikatoren (Ind) für die Projektion MPI-M-MPI-ESM-LR_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1 für das Bundesland Bayern

5 Ergebnisse

5.1 Bewertung der Plausibilität

Für die vier Naturräume im Gebietsumriss des hydrologischen Bayerns wurden 21 RCM und 60 ESD auf Basis der historischen-Simulationsdatensätze (1971-2000) analysiert. Im Zentrum des Klimaprojektions-Audits stand dabei die Analyse des Niederschlages und der Temperatur. Im Folgenden sollen beispielhaft einige Ergebnisse präsentiert werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden lediglich die Ergebnisse der RCM näher erläutert. Alle Indikatorwerte und Abbildungen zu den ESD von WETTREG2013 befinden sich im Anhang. Zusätzlich wurden auch die relative Luftfeuchte, die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit als weitere Eingangsgrößen in die Wasserhaushaltsmodellierung mit WaSiM betrachtet, dies wird aber hier nicht dargestellt.

Differenziert nach den Naturräumen zeigt Tabelle 6 die Auswertung der normalisierten Indikatorwerte des Niederschlages. Projektionen mit Indikatorwerten von Null sind „auffällig“ und werden besonders hervorgehoben.

Tab. 6: Normierte Indikatoren der 21 RCM für den Niederschlag in den vier Naturräumen. Projektionen, die für mindestens einen Indikator nur null Punkte erhalten haben, sind hervorgehoben und farblich markiert.

GCM	RCM	Alpen				Alpenvorland				Schichtstufenland				Mittelgebirgsschwelle			
		Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	9	5	1	3	10	5	0	10	10	4	0	8	10	4	0	9
CCCma-CanESM2_r1i1p1	GERICS-REMO2015_v1	10	8	7	0	9	8	8	6	8	7	5	0	8	7	5	1
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	6	6	8	3	8	8	9	10	7	7	7	8	7	7	8	9
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	GERICS-REMO2015_v1	9	8	9	0	10	9	10	7	10	8	4	0	10	8	5	0
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	KNMI-RACMO22E_v1	8	7	6	5	8	8	10	10	10	8	5	7	10	8	7	9
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	SMHI-RCA4_v1	10	6	4	5	8	8	8	8	7	6	2	9	7	7	4	7
ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	KNMI-RACMO22E_v1	9	7	3	6	9	8	8	10	10	8	2	7	10	8	3	9
ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	UHOH-WRF361H_v1	6	6	3	3	10	8	6	8	7	6	0	4	8	7	3	6
IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	SMHI-RCA4_v1	8	4	0	5	10	7	3	8	3	3	3	9	3	3	2	7
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	8	7	7	3	9	7	6	10	8	7	1	8	9	7	2	9
MIROC-MIROC5_r1i1p1	GERICS-REMO2015_v1	10	8	8	0	9	8	8	7	9	7	3	0	10	8	5	0
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	7	4	0	4	10	5	0	10	9	4	0	8	9	4	0	9
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	GERICS-REMO2015_v1	10	7	5	0	10	8	6	6	10	8	6	0	10	8	5	1
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	KNMI-RACMO22E_v2	9	5	0	6	10	7	2	10	9	8	1	7	10	7	0	9
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	SMHI-RCA4_v1	10	5	0	5	7	6	1	9	9	8	3	9	9	7	2	7
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	UHOH-WRF361H_v1	5	5	7	2	10	8	7	9	8	7	4	5	8	7	3	7
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	0	1	9	4	3	3	8	10	1	1	6	8	1	1	5	9
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	MPI-CSC-REMO2009_v1	9	7	3	0	10	7	3	5	8	8	7	0	9	8	6	1
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	SMHI-RCA4_v1a	7	5	0	4	10	8	7	8	3	3	5	9	4	4	7	7
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	UHOH-WRF361H_v1	4	4	8	3	8	7	8	8	4	4	1	4	5	5	3	7
MPI-M-MPI-ESM-LR_r2i1p1	MPI-CSC-REMO2009_v1	9	7	4	0	10	8	5	6	9	8	6	0	10	9	8	1

In den Alpen und im Schichtstufenland fällt in diesem Beispiel auf, dass die REMO-Projektionen für den Indikator IV (Musterindikator der räumlichen Übereinstimmung zwischen Referenz und Projektion) null Punkte erhalten. Das bestätigt auch der Audit-Steckbrief (Abb. 10) der zur Verifizierung dieser Zuordnung herangezogen wurde. Denn dieser bietet die Möglichkeit mit dem Musterindikator (IV) die räumlichen Abweichungen darzustellen. Dabei wird deutlich, dass in den REMO-Projektionen (in diesem Beispiel MPI-ESM-LR_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1) im Schichtstufenland verstärkt Niederschlag vor dem Mittelgebirge (Fränkische Schweiz) fällt während die Mittelgebirge selbst zu trocken ausfallen. Dieser Luv-Lee-Effekt ist ein bekanntes Problem der REMO2009-Projektionen (GÖTTEL 2009) und wurde auch für die REMO2015-Projektionen nicht behoben. Im unteren Teil der Abbildung 10 wird deutlich, dass vor allem die hohen Niederschläge stark von der Referenz abweichen. Die REMO-Projektionen wurden aufgrund dieser Niederschlagsverdriftung und der daraus folgenden schlechten Bewertung beim Musterindikator (IV) vom Ensemble ausgeschlossen, da gerade bei der einzugsgebietsbasierten Wasserhaushaltsmodellierung dieser Effekt besonders zum Tragen kommt. Auch eine Bias-Adjustierung, wie sie in der weiteren Nutzung der Klimaprojektionen zum Tragen kommt und auch am LfU verwendet wird, kann aus Sicht des LfU das Problem nicht zufriedenstellend beheben, da der korrigierende Eingriff sehr groß ist. Für andere Betrachtungen und Auswertungen auf größerer räumlicher Skala, z. B. im Bayernmittel spielt diese Charakteristik in der Niederschlagsmodellierung zum Beispiel keine Rolle, so dass für diese Maßstabsebene eine weitere Verwendung der REMO-Projektionen möglich wäre. Dies widerspricht allerdings dem Anspruch des LfU's und dieser Studie eines einheitlichen Projektionsensembles für möglichst alle klimarelevanten Fragestellungen Bayerns.

Weiterhin ist in Tabelle 6 auffallend, dass mehrere Projektionen den Jahrgang des Niederschlags nicht korrekt abbilden (Indikator III). Bei der Beurteilung von Indikator III hilft eine visuelle Einschätzung der Übereinstimmung zwischen Projektion und Referenzdatensatz anhand der Jahrgänge der einzelnen Klimavariablen pro Naturraum. Der Abgleich der Jahrgänge mit den Ergebnissen der Bias-Indikatoren ist somit bei der Beurteilung der Projektionen anhand der Bewertungskennzahlen unerlässlich. Insbesondere bei der Projektion MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 werden in fast keinem Naturraum Punkte für die Übereinstimmung der Jahrgänge zugewiesen. Die genauere Betrachtung anhand der Visualisierung der Jahrgänge (Abb. 11) zeigt, dass der mittlere Niederschlag sehr deutlich vom Referenzdatensatz abweicht und zum Teil inverse Dynamiken aufweist. Somit erscheint auch hier eine Bias-Korrektur nicht sinnvoll, wenn der eigentlich mittlere Jahresgang im Untersuchungsgebiet nicht nachgebildet werden kann.

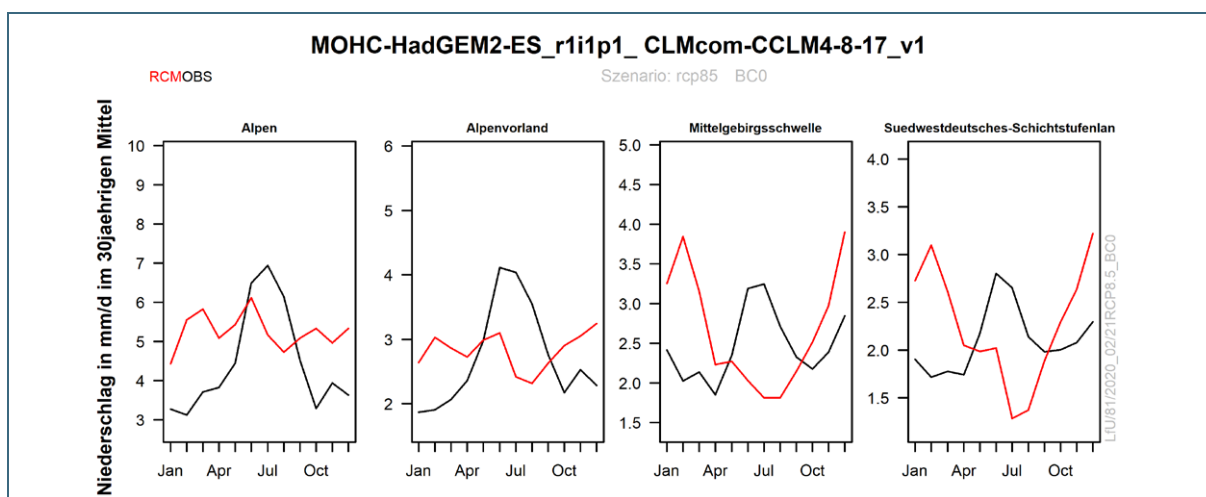


Abb. 11: Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahrgangs der Projektion HadGEM2-ES_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen

In der weiteren Analyse werden die Jahrgänge aller „auffälligen“ Projektionen betrachtet. Dabei wird deutlich, dass auch CCCma-CanESM2_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 in allen Naturräumen einen inversen oder zumindest deutlich verschobenen Jahrgang aufweist (Abb. 12).

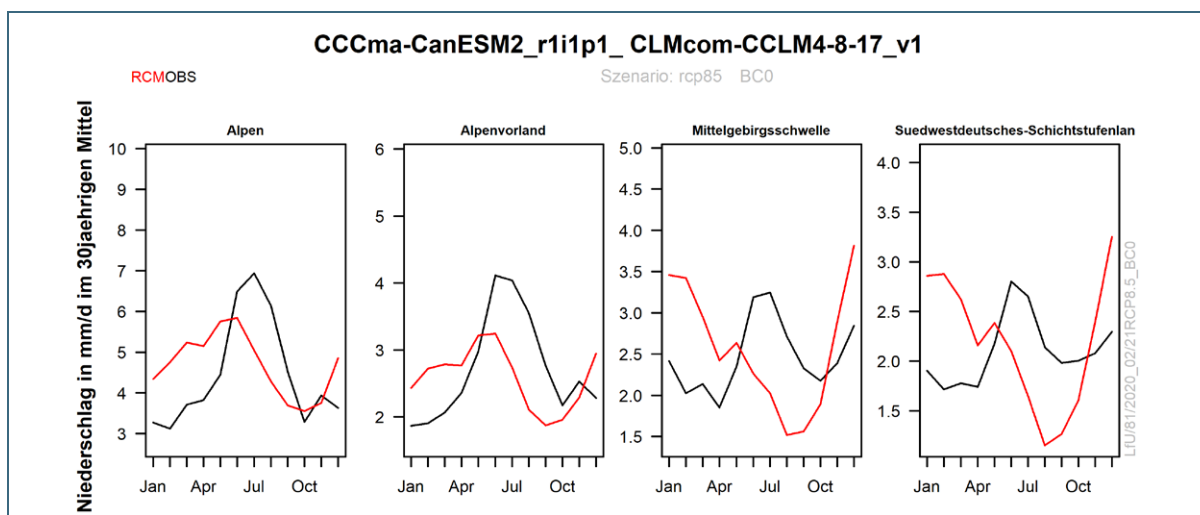


Abb. 12: Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahrgangs der Projektion CCCma-CanESM2_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen

Weiterhin weisen die Projektionen MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2 (Abb. 13), MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 (Abb. 14) und IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 (Abb. 15) deutliche Abweichungen in der Jahresdynamik des Niederschlags auf. Die verbliebenen „auffälligen“ Projektionen zeigen zum Teil zwar auch größere Abweichungen in den mittleren, monatlichen Tagesniederschlägen, folgen aber im Wesentlichen der Jahresdynamik.

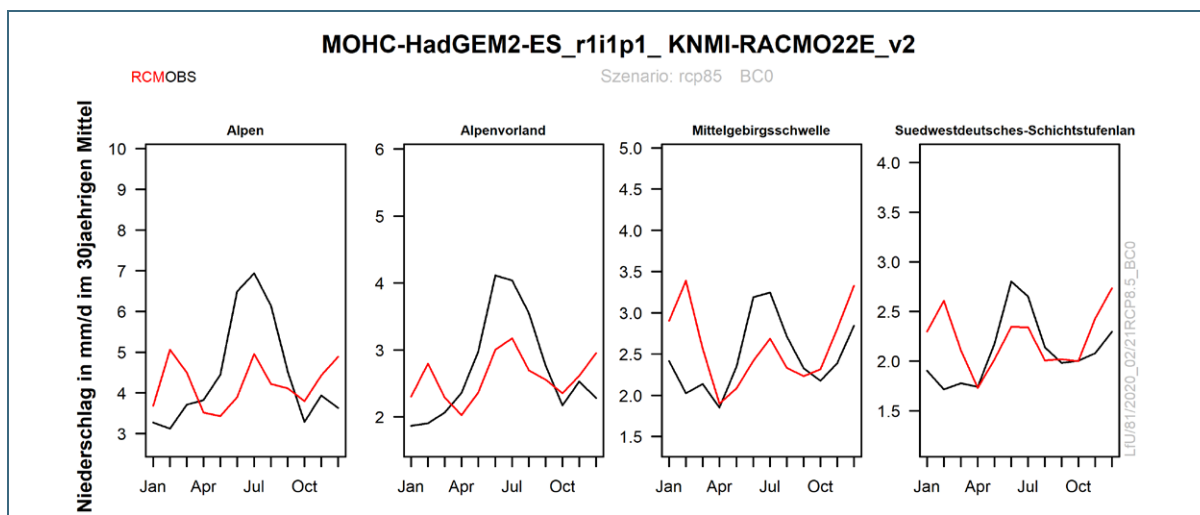


Abb. 13: Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahrgangs der Projektion MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen

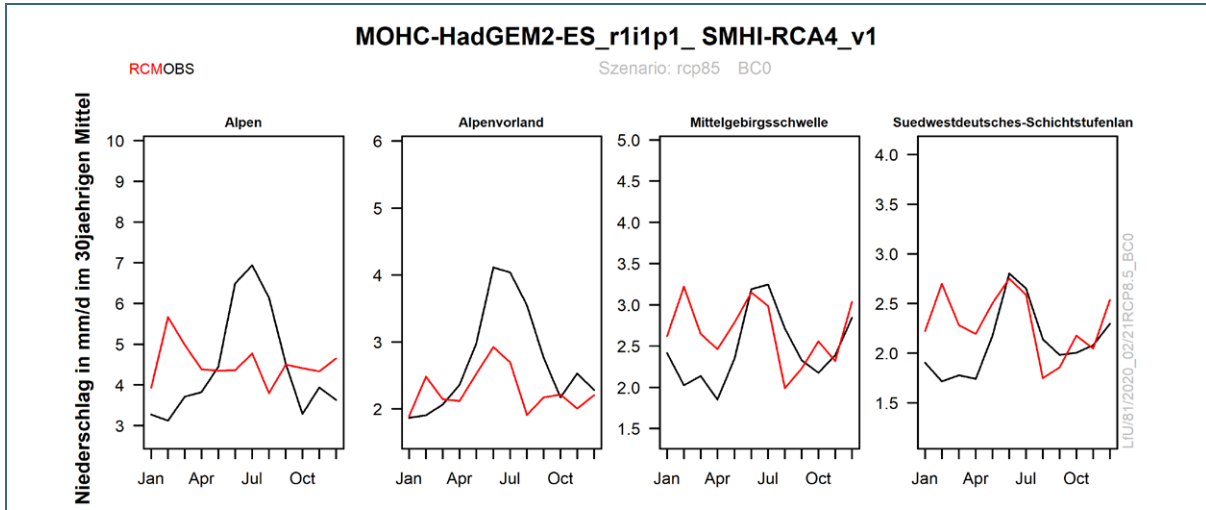


Abb. 14: Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahresgangs der Projektion MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen

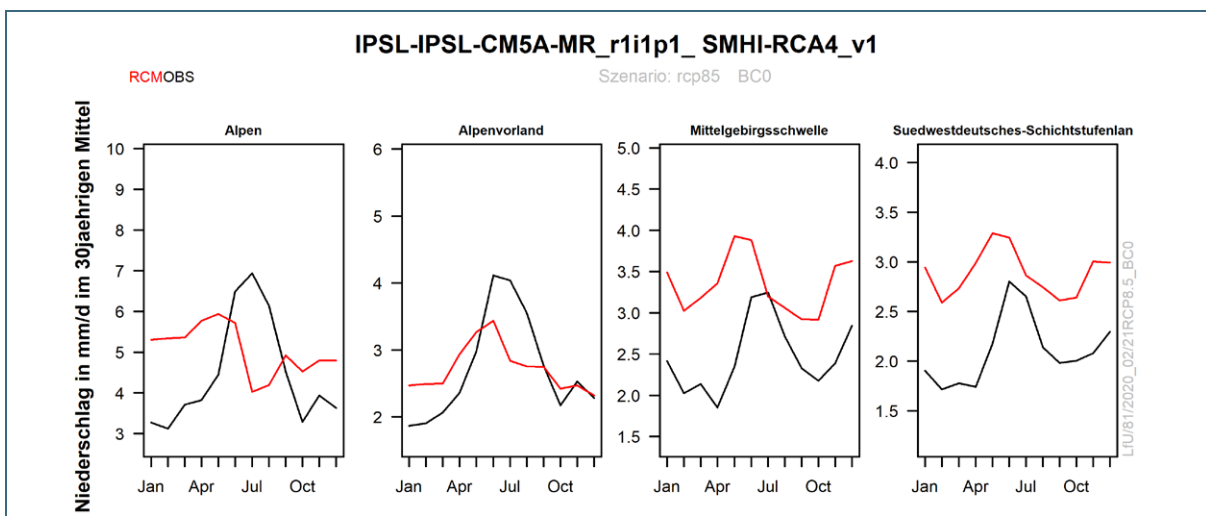


Abb. 15: Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahresgangs der Projektion IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen

In gleicher Weise werden die Indikatoren der Temperatur analysiert. Anhand der Indikatoren (Tab. 7) wird aufgezeigt, dass Projektionen basierend auf dem RCM KNMI-RACMO22E_v1 unabhängig vom antreibenden Globalmodell über einen deutlichen Temperaturbias verfügen. In der Version 2 dieses RCM tritt dieser Bias zumindest im Schichtstufenland nicht so deutlich hervor. Weiterhin zeigen die Projektionen mit dem RCM SMHI-RCA4_v1 und SMHI-RCA4_v1a in den Alpen einen deutlichen Temperatur-Bias, der weiter überprüft wurde. So sind die auffälligen Projektionen in den Alpen nahezu im gesamten Jahresverlauf deutlich kälter als die Referenz (Abb. 16). Es handelt sich dabei meist um einen generellen Bias über das gesamte Jahr, der den Jahresgang insgesamt verschiebt. Dieser ist bei einer Bias-Korrektur der Klimavariablen verhältnismäßig leicht zu korrigieren. Bis auf diese Auffälligkeiten wird der Jahresgang der Temperatur sehr gut wiedergegeben.

Tab. 7: Normierte Indikatoren der 21 RCM für die Temperatur in den vier Naturräumen. Projektionen, die für mindestens einen Indikator nur null Punkte erhalten haben, sind hervorgehoben und farblich markiert.

GCM	RCM	Alpen				Alpenvorland				Schichtstufenland				Mittelgebirgsschwelle			
		Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	9	8	10	10	7	7	10	10	7	7	9	10	8	8	9	8
CCCma-CanESM2_r1i1p1	GERICS-REMO2015_v1	9	9	9	10	7	6	7	8	7	6	8	10	8	7	8	8
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	2	2	9	10	6	6	9	9	6	6	10	10	5	5	10	8
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	GERICS-REMO2015_v1	3	3	10	10	9	8	9	9	9	8	10	10	8	7	10	8
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	KNMI-RACMO22E_v1	0	0	9	10	0	0	10	9	1	1	10	10	0	0	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	SMHI-RCA4_v1	0	0	9	10	5	5	9	9	5	5	8	10	3	3	9	6
ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	KNMI-RACMO22E_v1	0	0	9	10	0	0	10	9	3	3	10	10	1	1	10	5
ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	UHOH-WRF361H_v1	0	0	10	10	3	3	8	8	3	3	9	10	2	2	9	8
IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	SMHI-RCA4_v1	0	0	10	10	9	6	8	9	7	6	8	10	6	5	8	7
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	4	4	8	10	8	6	7	9	8	5	5	10	7	5	6	8
MIROC-MIROC5_r1i1p1	GERICS-REMO2015_v1	6	4	5	10	10	7	6	8	10	6	5	10	9	5	5	9
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	6	5	8	10	10	8	8	9	10	7	6	10	10	7	7	8
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	GERICS-REMO2015_v1	9	7	8	10	7	7	10	9	7	6	9	10	8	7	9	9
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	KNMI-RACMO22E_v2	0	0	5	10	4	4	6	9	7	6	7	10	5	4	7	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	SMHI-RCA4_v1	0	0	7	10	10	8	10	10	10	9	10	10	9	8	10	7
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	UHOH-WRF361H_v1	4	4	8	10	9	8	10	8	9	8	10	10	8	7	9	8
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	5	5	9	10	9	7	7	9	9	8	8	10	8	7	8	8
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	MPI-CSC-REMO2009_v1	9	8	8	10	8	7	10	7	7	7	10	10	8	7	10	8
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	SMHI-RCA4_v1a	0	0	9	10	10	8	8	10	10	8	8	10	9	8	9	7
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	UHOH-WRF361H_v1	5	5	10	10	9	8	9	8	9	8	9	10	8	8	10	8
MPI-M-MPI-ESM-LR_r2i1p1	MPI-CSC-REMO2009_v1	8	7	9	10	9	8	10	7	8	8	10	10	9	8	10	8

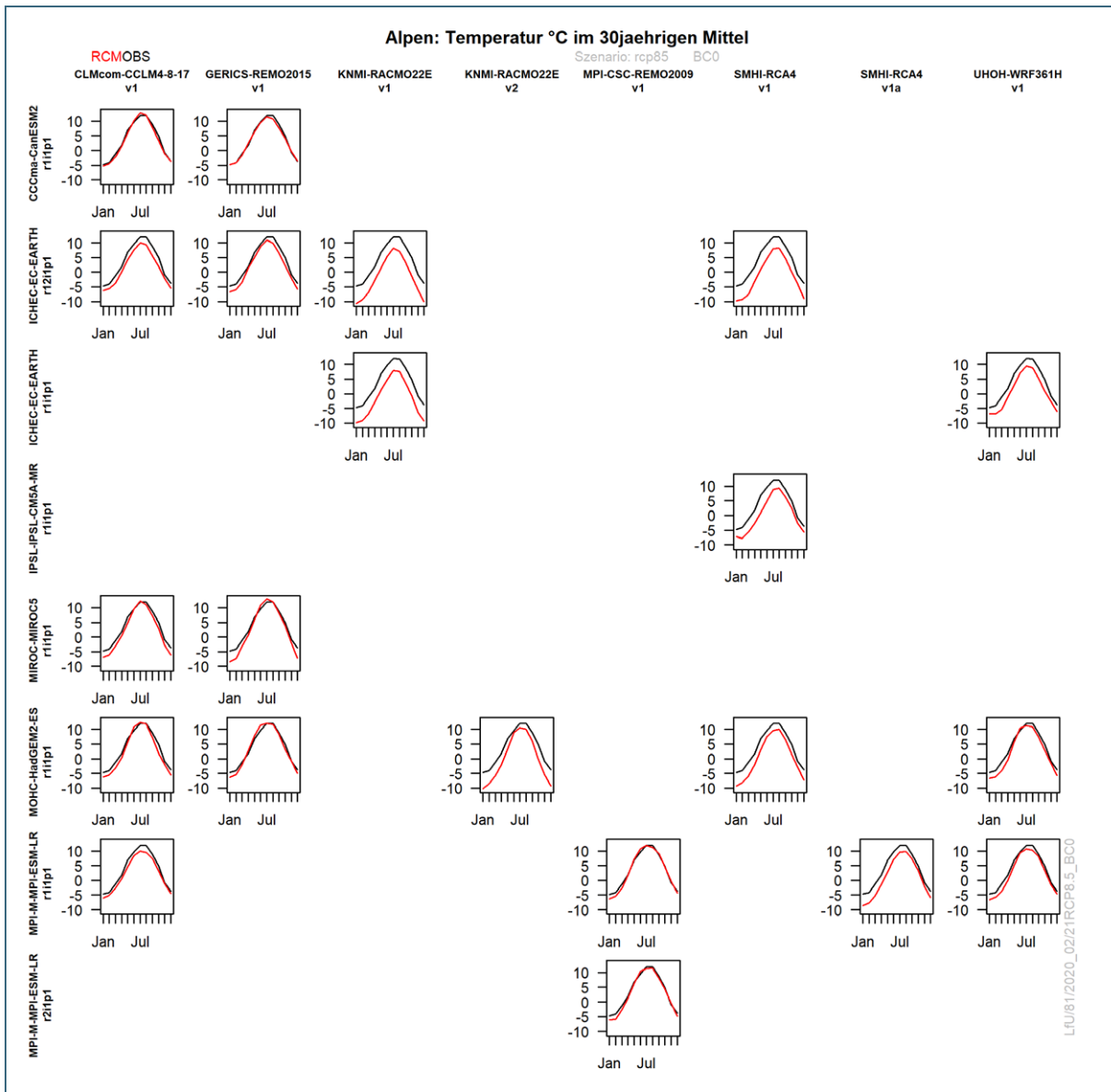


Abb. 16: Gegenüberstellung des Jahresganges der mittleren monatlichen Tagestemperatur der RCM-Projektionen (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) im Naturraum der Alpen

Einen visuellen Gesamtüberblick über die Performanz der einzelnen Projektionen anhand der Punkteverteilung von Temperatur und Niederschlag bietet ein Thermopluviogramm (Abb. 17). Hier sind die Summen der Indikatoren pro Klimavariablen und Naturraum aufgetragen. Als Zielkriterium wurde angenommen, dass plausible Projektionen 50 % der möglichen Punkte für die betrachteten Variablen erreichen sollten (grau hinterlegter Zielquadrant). Am Beispiel der Alpen sind deutliche Abweichungen im Niederschlag für nahezu alle Projektionen zu verzeichnen, hier werden von einigen Projektionen weniger als 20 Punkte und von fast allen nicht mehr als 30 Punkte erreicht. Dahingegen zeigen für die Temperatur viele Projektionen gute und bis sehr gute Übereinstimmungen. So findet nach weiterer Prüfung kein Ausschluss aus dem Ensemble aufgrund der Temperatur statt.

Jedoch werden nach eingehender Prüfung des saisonalen Verlaufes (z. B. auf Gleichläufigkeit des Jahresganges) von den auffälligen Projektionen beim Niederschlag fünf Projektionen vom Ensemble ausgeschlossen. Deutlich wird in Abbildung 17 auch die in den Naturräumen unterschiedliche Güte der Klimamodellierung.

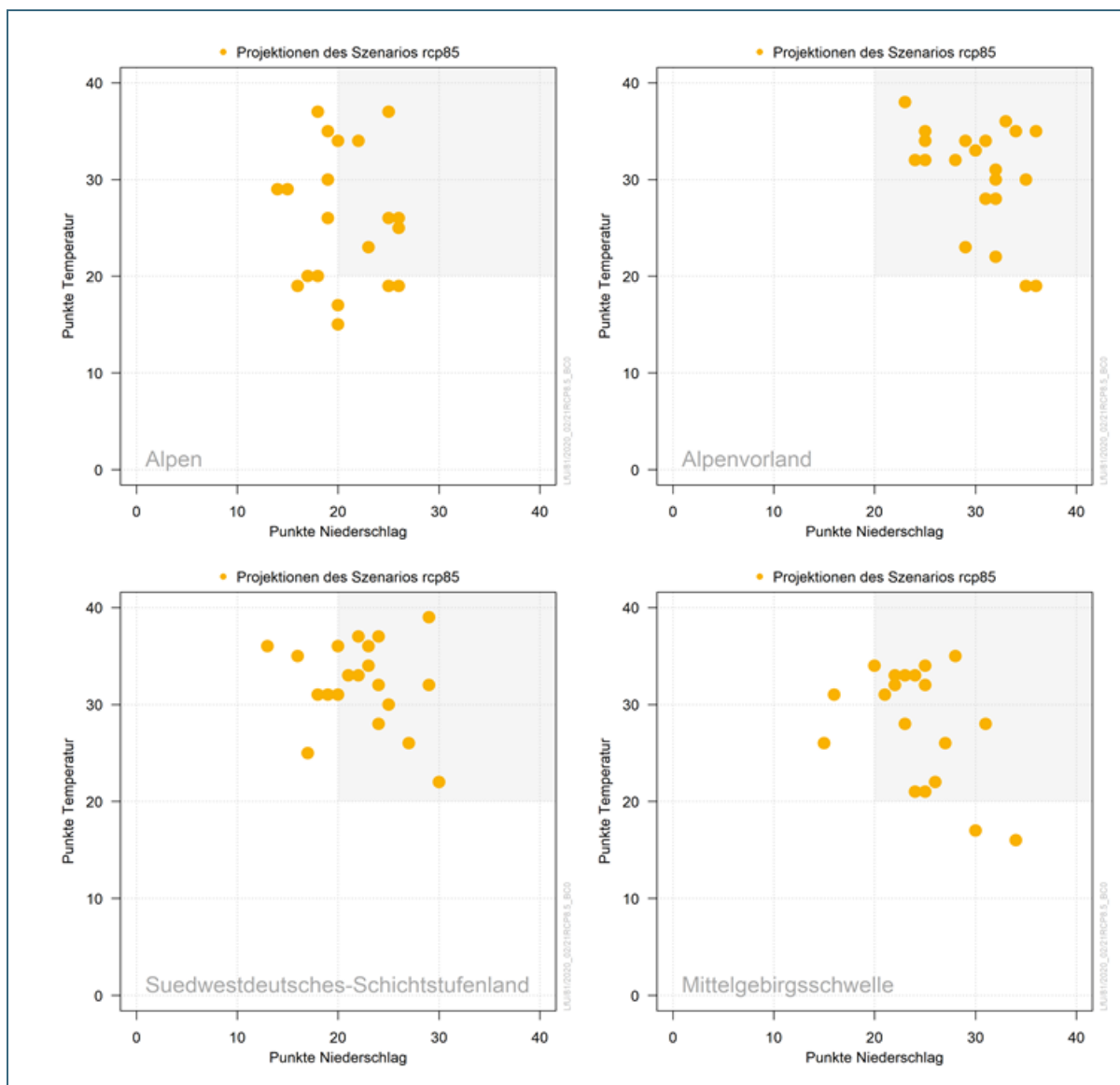


Abb. 17: Streudiagramm der 21 Klimaprojektionen nach ihrer Bewertung durch das Audit in den vier Großlandschaften

5.2 Einordnung der Klimaänderungssignale

Die Änderungssignale von Temperatur und Niederschlag sind in den Abbildungen 18 bis 21 dargestellt. Beide Klimavariablen weisen in der fernen Zukunft (2071-2100) für das Szenario RCP8.5 sehr deutliche Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum (1971-2000) auf. Es zeigt sich, dass die Änderungen der Temperaturen für alle Projektionen aller Naturräume sehr deutlich und relativ gleichförmig sind. Die Temperaturzunahme bewegt sich mit wenigen Ausnahmen in fast allen Naturräumen und Jahreszeiten zwischen 3 °C und 6 °C. Dabei wird deutlich, dass sich die ESD-Projektionen auf zwei Punktwolken mit ähnlichem Änderungssignal konzentrieren, während die RCM-Projektionen eine stärkere Streuung aufweisen. Insbesondere in den Jahreszeiten Frühling und Herbst treten zwischen diesen beiden Projektionstypen klare Unterschiede auf. Im Frühling zeigen die RCM meistens eine geringere und im Herbst oftmals eine stärkere Temperaturzunahme als die ESD.

Die Unterschiede der Änderungssignale zwischen den ESD- und RCM-Projektionen sind beim Niederschlag noch deutlicher. Hier fällt auf, dass die ESD-Projektionen von WETTREG2013 unabhängig

vom antreibenden Globalmodell fast immer deutlich trockener als die RCM sind. Dadurch erreicht die Spannweite der Niederschlagsänderung in einigen Gebieten und Jahreszeiten Werte von fast -40 % bis +40 %. Klare Aussagen zu Niederschlagsänderungen sind bei Berücksichtigung von RCM- und ESD-Klimaprojektionen kaum möglich. Als deutliches Signal kann die sommerliche Niederschlagsabnahme in allen Naturräumen gesehen werden. Vor allem in den Mittelgebirgen und im Schichtstufenland kann auch eine Tendenz zur Niederschlagszunahme im Winter und Frühjahr abgelesen werden.

Es wird deutlich, dass die Stärke des Signals innerhalb des untersuchten Ensembles deutlich streut. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, Projektionen auszuwählen, welche bestimmte klimatische Rahmenbedingungen repräsentieren. In Kombination mit den Bias-Indikatoren des Audits können somit Projektionen ausgewählt werden, welche ein bestimmtes Klimasignal aufweisen und deren Plausibilität in der Referenzperiode zufriedenstellend ist. Auffällig ist der Unterschied zwischen den beiden Modelltypen, die statistischen Modelle sind in allen Jahreszeiten trockener wie die dynamischen Modelle und streuen zudem in den Änderungssignalen deutlich weniger. Am Beispiel des Vergleichs zwischen den RCM- und den ESD-Projektionen zeigt sich auch, wie wichtig es sein kann, die Klimaänderungssignale und deren mögliche Gruppierung zu kennen, wenn man Aussagen für die Veränderung treffen oder Projektionen für die Wirkungsmodellierung nutzen möchte. Auch lassen sich so besonders extreme Veränderungen, wie zum Beispiel in Abbildung 18 im Naturraum Alpen für den Sommer, mit einer RCM-Klimaprojektion mit -40 % Niederschlagsabnahme. Dieses Wissen ist für die weiteren eigenen Untersuchungen und auch dem Vergleich mit anderen, auf einem anderen Ensemble beruhenden Untersuchungen sehr hilfreich.

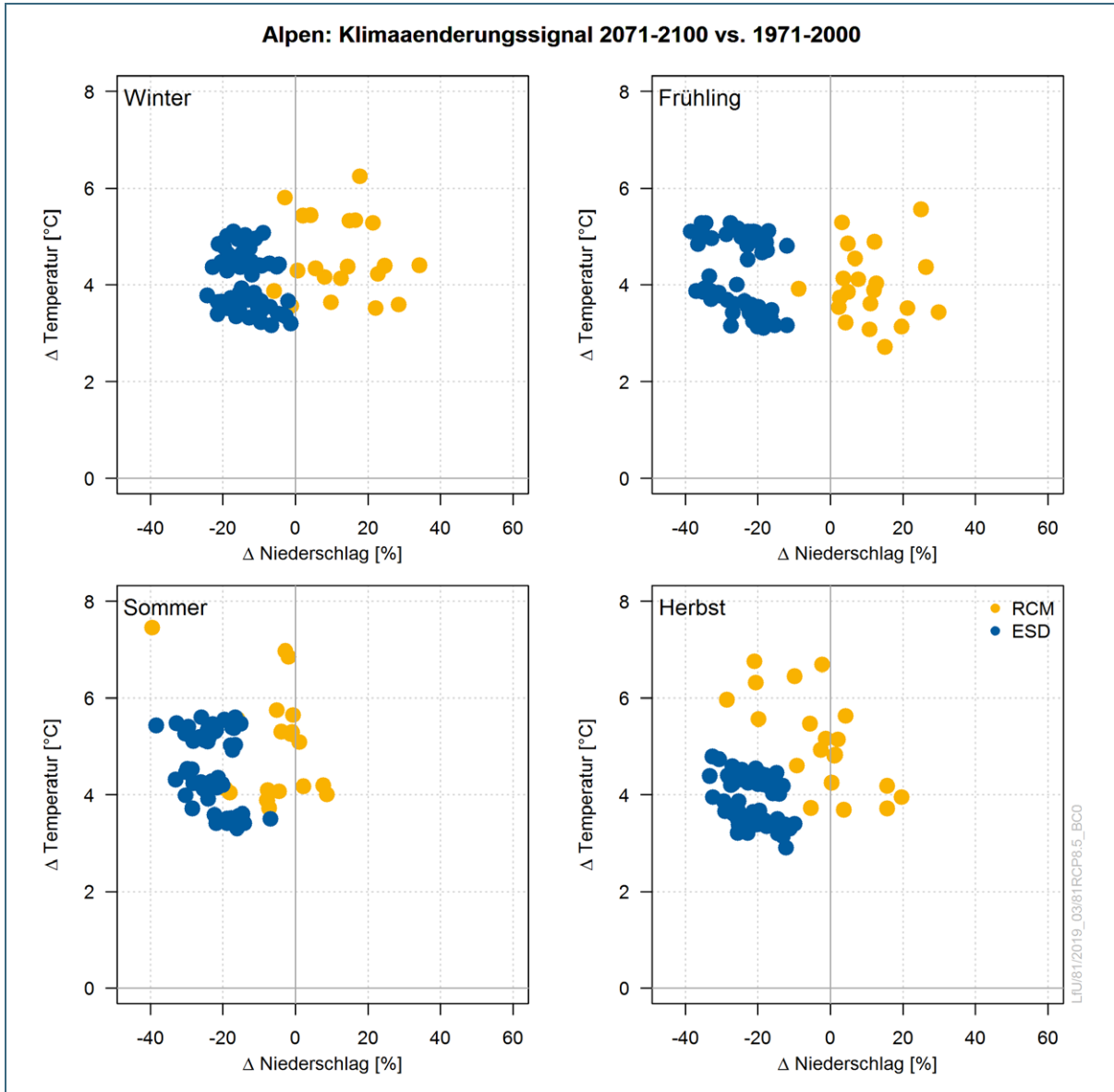


Abb. 18: Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft in den Alpen

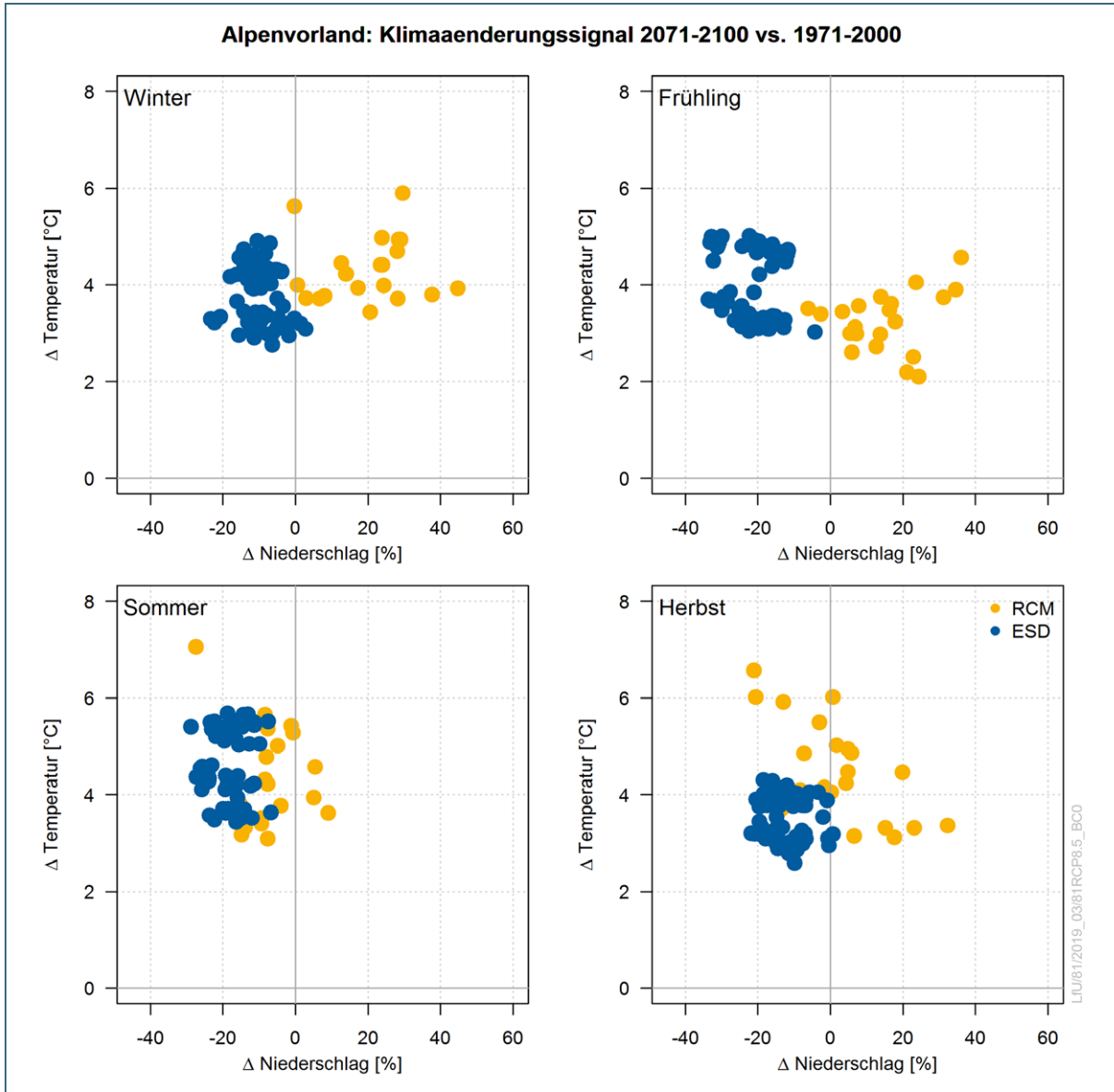


Abb. 19: Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft im Alpenvorland

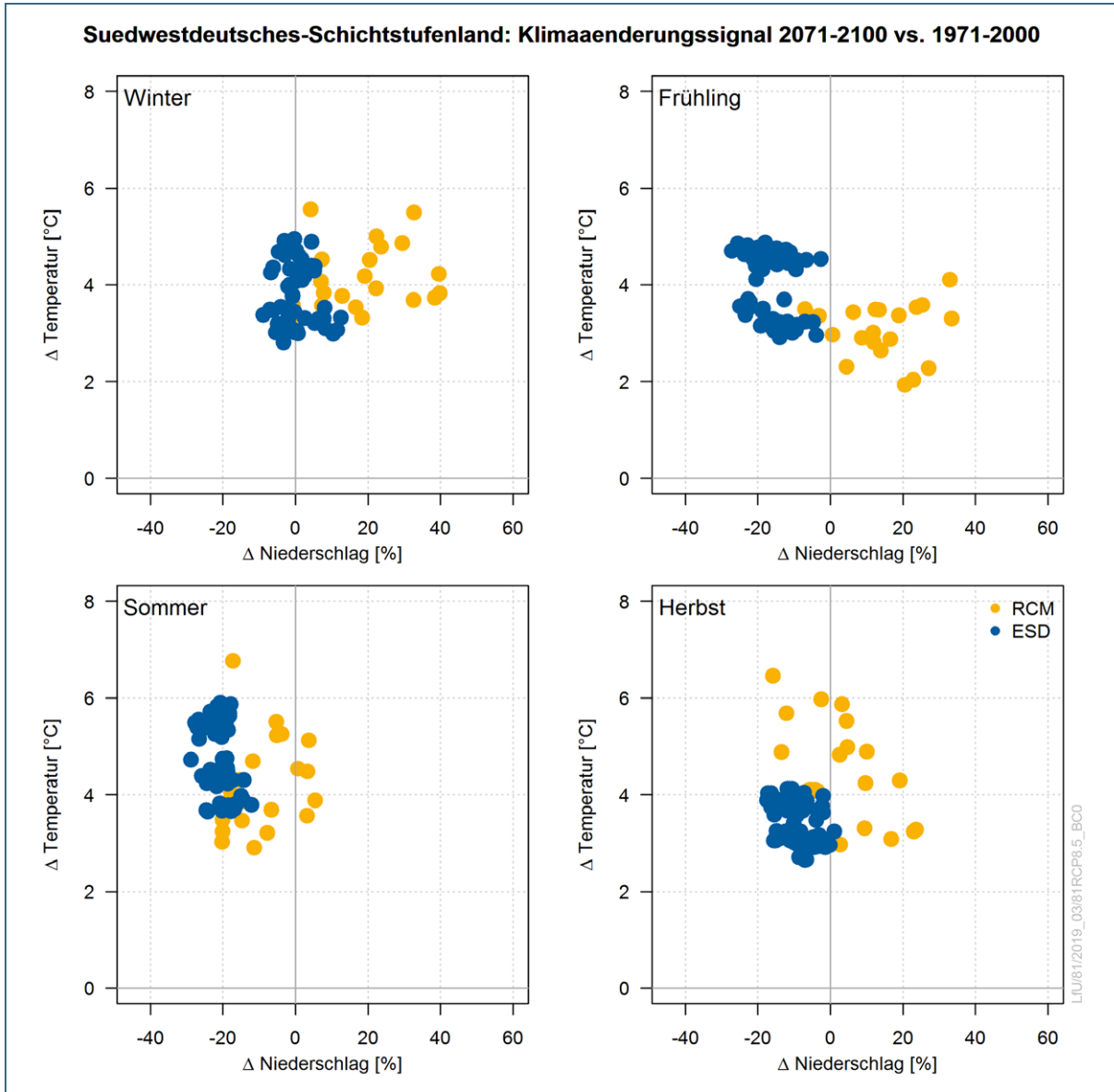


Abb. 20: Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft im Schichtstufenland

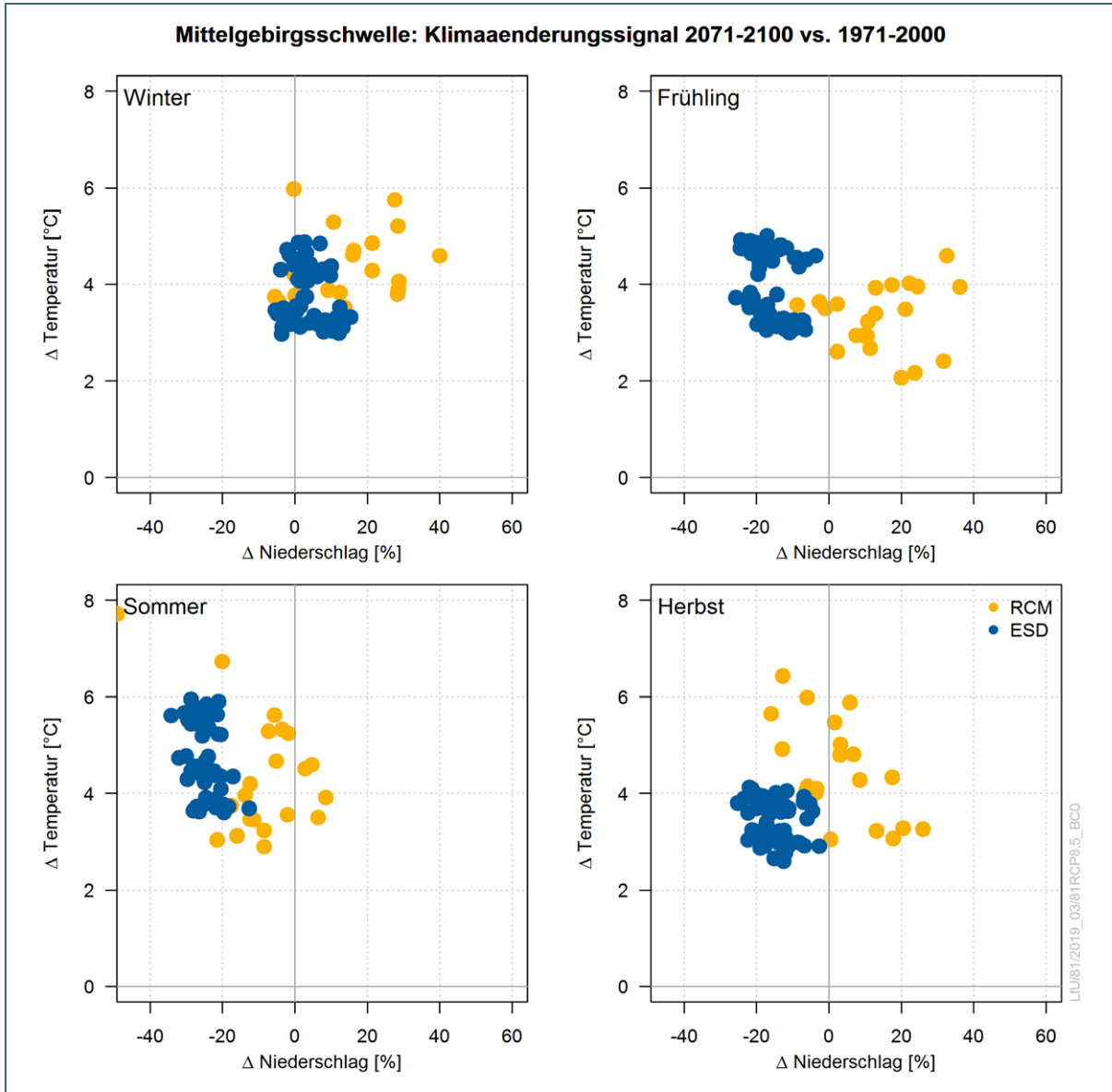


Abb. 21: Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft im Mittelgebirge

6 Diskussion

Ein Kernziel des LfU ist die Zusammenstellung eines bayernweit einheitlich gültigen Projektionsensembles (Bayern-Ensemble) mit dem sowohl Auswertungen zukünftiger klimatischer Entwicklungen als auch Wirkungsmodellierungen durchgeführt werden können. Dies bedeutet, dass nur plausible Projektionen in dieses Ensemble einbezogen werden sollen, welche zur Beantwortung der genannten Fragestellungen für Bayern geeignet sind. Mit der vorgestellten Auditierung soll diese Beurteilung der Klimaprojektionen transparent und nachvollziehbar sein. Ein Ausschluss aus der weiteren Verwendung in Bayern heißt jedoch nicht, dass die jeweilige Projektion per se schlecht oder ungeeignet ist. Der Ausschluss einer Projektion vom Bayern-Ensemble bedeutet lediglich, dass diese, nach den vorgestellten Kriterien und für die gegenwärtig relevanten LfU-Fragestellungen in den Naturräumen Bayerns nicht geeignet sind. Eine vergleichbare Prüfung, jedoch mit einem angepassten Bewertungsschlüssel, wären durchzuführen, sofern Naturräume außerhalb Bayerns und/oder andere Fragestellungen betrachtet werden sollen.

Neben einer frühzeitigen Fehleridentifikation in den genutzten Datensätzen wird mit der Betrachtung verschiedener Charakteristika, wie der gesamten absoluten Abweichung, der saisonalen Abweichung und der räumlichen Abweichung, versucht, möglichst vielen Anforderungen klimatischer Analysen gerecht zu werden. Dabei verdeutlicht zum Beispiel die paarweise (pixelweise) Gegenüberstellung von Mess- und Modellwert, durch den Musterindikator (IV) das Phänomen der Verdriftung von Niederschlägen bei den REMO-Projektionen. Es zeigte sich ein räumlicher Versatz des Niederschlags von ein bis zwei Rasterzellen. Trotz sehr guter Übereinstimmungen der Jahressgänge für Temperatur und Niederschlag, verhindern diese starken räumlichen Niederschlagsabweichungen der REMO-Projektionen eine weitere Anwendung in der hydrologischen Wirkungsmodellierung in bayerischen Einzugsgebieten. Ein räumlicher Versatz des Niederschlags hat gerade bei dieser Anwendung deutliche Folgen und würde methodisch bedingt zu Fehlinterpretationen der Wirkmodellergenergebnisse führen. Daher werden die sechs REMO-Projektionen aus dem Bayern-Ensemble ausgeschlossen, auch wenn sie für die rein meteorologische Änderungsanalyse für ganz Bayern oder für größere Einzugsgebiete und bezogen auf temperaturbezogene Kennwerte weiterverwendet werden könnten.

Einige Projektionen wurden zudem bei Indikator III auffällig. Aus der Analyse der Niederschlagsjahressgänge traten die Projektionen MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 und CCCma-CanESM2_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 als besonders auffällig mit völlig unzureichender und inverser Jahresdynamik hervor. Weniger deutlich aber immer noch mit teilweise inverser oder aber auch fehlender Jahresdynamik wurden die Projektionen MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2, MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 und IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 identifiziert. Hier stellt sich die Frage, ob die Modelle, die in den Untersuchungsgebieten vorherrschenden Prozesse grundsätzlich abbilden können. Mit einer Bias-Adjustierung können zwar die Modellwerte an die Messwerte der Referenzperiode angepasst werden, doch ist eine solche Anpassung im Falle einer unzureichenden und inversen Jahresdynamik wenig vertrauenswürdig. Insbesondere die Ableitung kombinierter klimatischer Leitwerte aus Temperatur und Niederschlag, wie beispielsweise verschiedene Trockenheitsindikatoren (BERNHOFER ET AL. 2015) können hier mit einer unzureichenden Prozessabbildung irreführende Ergebnisse liefern. Daher wurden diese Projektionen ebenfalls aus dem Bayern-Ensemble ausgeschlossen.

Bei den RACMO-Projektionen fiel bei der Betrachtung aller Projektionen ein gleichartiger Temperatur-Bias auf. Dieser deutet darauf hin, dass die klimatischen Prozesse im Klimamodell zwar richtig, aber mit einer falschen Größenordnung, abgebildet wurden. Dies kann aber aus Sicht des LfU mit der aktuell am LfU verwendeten Bias-Adjustierung ausgeglichen werden.

Eine zusätzliche schnelle Beurteilungsmöglichkeit der verschiedenen Projektionen liefern die vorgestellten Thermopluviogramme. Dabei zeigte sich, dass insbesondere im Bereich der Hochgebirge (Alpen) die Performanz der Klimaprojektionen schlechter ist.

Einen eher ergänzenden Informationscharakter hat zudem die mögliche Darstellung des Änderungssignals der Projektionen im Thermopluviogramm. Durch diese kann der Anwender ein Gefühl entwickeln, ob einzelne Projektionen beispielsweise zu trockeneren, feuchteren, wärmeren oder weniger warmen Entwicklungen neigen. Aber auch zuvor als auffällig gekennzeichnete Projektionen wie MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 und CCCma-CanESM2_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 sind in den Thermopluviogrammen durch extreme Änderungssignale auffällig. Darüber hinaus zeigen die ESD-Projektionen im Gegensatz zu den RCM-Projektionen, unabhängig vom antreibenden Globalmodell und betrachteten Naturraum, einen systematischen Rückgang der Niederschläge (HÜBENER ET AL. 2017a) sowie eine generelle Gruppierung mit geringeren Spannweiten als die RCMs. Auch in früheren Studien ist das WETTREG-Regionalisierungsmodell als trockenere und oft auch wärmere Projektion in Erscheinung getreten und wurde deshalb auch als „worst-case“ – Szenario für die zukünftige Temperatur- und Niederschlagsentwicklung bei einigen Studien in der Kooperation KLIWA herangezogen. Insgesamt bilden die aktuellen WETTREG2013-Projektionen ein deutliches Gegengewicht zu den Änderungssignalen der RCM-Projektionen. Diese Ausdifferenzierung in zwei entgegengesetzte Lager, wird im Verlaufe des 21. Jahrhunderts von naher zu ferner Zukunft immer deutlicher. Gerade die Änderungssignale von WETTREG2013 in der fernen Zukunft sind methodisch bedingt mit größeren Unsicherheiten belastet, da die einzelnen Wetterlagen nur aus dem Pool der bereits gemessenen meteorologischen Bedingungen gespeist werden. Somit können mögliche Prozessänderungen durch WETTREG2013 nicht im vollen Umfang berücksichtigt werden (KREIENKAMP ET AL. 2017).

Durch die beiden Modellfamilien (ESD und RCM) wird somit ein sehr breites Spektrum an Änderungssignalen aufgespannt. Dies erschwert eine klare Aussage insbesondere über das zukünftige Niederschlagsverhalten. Am deutlichsten ist die sommerliche Niederschlagsabnahme ausgeprägt, die im Einklang zu Ergebnissen früherer Studien auf Basis von SRES A1B-Projektionen aber auch zu Beobachtungen in anderen Regionen in Deutschland steht (HÜBENER ET AL. 2017a). Weiterhin lässt sich deutlich eine Tendenz zur winterlichen Niederschlagszunahme für Nordbayern ableiten. Für den Süden ist aufgrund der enormen Schwankung des Änderungssignals keine konkrete Aussage möglich.

Im Gegensatz zur projizierten Niederschlagsentwicklung ist bei der Temperaturentwicklung keine derart deutliche Differenzierung zwischen den beiden Projektionsfamilien ESD und RCM zu erkennen.

Ein Resultat der Betrachtung der Änderungssignale ist, dass sich beide Familien mit ihren Projektionen im Änderungsspektrum von 3 °C bis 6 °C bewegen. Beide zeigen für das RCP8.5-Szenario eine deutlich stärkere Erwärmung für Bayern an, als es zur Einhaltung des 2 °C-Zieles für diesen Zeitraum angestrebt wird

Insgesamt wurden für Bayern durch das hier vorgestellte Klimaprojektionsaudit neben den REMO Projektionen fünf weitere RCM identifiziert die deutlich vom Klimareferenzdatensatz abweichen. Bei diesen Projektionen würde auch eine Bias-Adjustierung das Vertrauen in die Ergebnisse nicht verbessern. Vermutlich bilden diese Modelle die für Bayern entscheidenden regionalklimatische Prozesse nicht adäquat ab. Auch diese Projektionen werden für eine Verwendung im ausgeschlossen. Demnach verbleiben von den 21 RCM-Projektionen zehn dynamische Projektionen sowie zwei statistische Projektionen (siehe nächster Abschnitt) im Bayern-Ensemble (Tab. 8). Für das Bayern-Ensemble muss im Anschluss daran eine Betrachtung der Bandbreite gegenüber der ursprünglichen 21 RCM-Projektionen durchgeführt werden, um die Einschränkungen der Signale durch die Modellauswahl beurteilen zu können.

Das vorgestellte Klimaprojektionsaudit wurde ebenfalls für die 60 WETTREG2013-Projektionen mit unterschiedlich antreibenden GCM durchgeführt. Jedoch sind die Ergebnisse des Klimaprojektionsaudits der WETTREG2013-Projektionen nicht mit den Ergebnissen der dynamischen Klimaprojektionen vergleichbar, da aufgrund Ihrer auf Beobachtungsdaten basierenden Methodik von einer generell besseren Wiedergabe der Referenz auszugehen ist. Trotz leichter Unterschiede zwischen den einzelnen WETTREG-Projektionen konnte keine besonders auffälligen Projektionen identifiziert werden. Da es sich um jeweils zehn Realisationen einer Projektion handelt, sind die Änderungssignale sehr ähnlich. Die Verwendung von 60 ESD zusammen mit 10 RCM unterschiedlicher RCM-GCM-Kombinationen würde das Änderungssignal sehr zu Gunsten der ESD gewichten. Daher wurden mit Hilfe der Selektionsmethode nach DALELANE (2018) zwei repräsentative WETTREG-Projektionen (MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_CEC-WETTREG2013_v1-r1 & ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1_CEC-WETTREG2013_v1-r1) ausgewählt. Somit umfasst das Bayern-Ensemble_v1 letztendlich insgesamt zwölf Klimaprojektionen (Tab. 8). Für die Einschätzung der Änderungssignale des Bayern-Ensembles gegenüber den gesamten Referenzensembles des DWD ohne Ausschlüsse befinden sich Abbildungen der Änderungssignale des Bayern-Ensembles_v1 im Anhang.

Andere in der Literatur verfügbare Auditierungsverfahren wie im Clim4Energy-Projekt (JIN ET AL. 2016) oder bei MCSWEENEY ET AL. (2012) und MCSWEENEY ET AL. (2015) beschrieben, verwenden andere Verfahrensabläufe oder Gütemaße. MCSWEENEY ET AL. (2015) heben hervor, dass bei der Prüfung anhand der bodennahen Variablen nicht direkt auf Unzulänglichkeiten im Modell geschlossen werden kann. Demzufolge wird dort ein GCM nur als nicht plausibel eingestuft, wenn es nicht in der Lage ist die regionalen Klimaprozesse (z. B. Zugbahnen oder Zirkulationsmuster) abzubilden (MCSWEENEY ET AL. 2015). Abweichungen der bodennahen Klimavariablen besagen lediglich, dass die Projektionen/Modelle einen mehr oder weniger starken Bias haben (MCSWEENEY ET AL. 2015). Somit ergibt sich die Einteilung von Projektionen in vier Klassen: nicht plausibel (1), signifikanter Bias (2), Bias (3), zufriedenstellend (4) (MCSWEENEY ET AL. 2015). Anhand dieses angeführten Beispiels, einer anderen Auditierungsmöglichkeit, wird deutlich, dass es noch erheblichen Spielraum für mögliche Erweiterungen und Verbesserungen des hier vorgestellten Klimaprojektionsaudits gibt. Beispielsweise wäre eine Erweiterung um einen Indikator, der die Gleichläufigkeit der Jahregänge betrachtet und somit Indikator III ergänzt, möglich.

Bias-Indikatoren können grundsätzlich auch für andere Gebiete, wie z. B. Regierungsbezirke oder Flusseinzugsgebiete berechnet werden. Es sollte lediglich darauf geachtet werden, dass die Gebiete nicht zu klein gewählt werden, da mit kleineren Gebieten die Abweichung im räumlichen Muster nicht repräsentativ abgebildet werden kann. Auch ist generell eine Erweiterbarkeit der betrachteten Variablen möglich. Bisher nicht betrachtet wurden zum Beispiel klimatische Kennwerte, wie zum Beispiel Anzahl der Niederschlagstage oder Niederschlagstage über einem Perzentil. Allerdings hat das hier vorgestellte Audit nicht per se zum Ziel, die allgemeine Plausibilität der Klimamodelle zu prüfen. Vielmehr soll die Belastbarkeit der für die klimatischen Auswertungen oder Wirkungsmodellierung benötigten Klimavariablen in Bayern geprüft werden.

Tab. 8: Übersicht über die RCP 8.5 Klimaprojektionen sowie resultierendes Bayern_Ensemble_v1 (ESD hell hinterlegt, * für das Bayern- Ensemble_v1 ausgewählte ESD, jeweils Realisation 1)

GCM	RCM	ALADIN63	CCLM4-8-17	HIRHAM5-v1	HIRHAM5-v2	RACMO22Ev1	RACMO22Ev2	RCA4v.1	RCAv.1a	REMO2009	REMO2015	WRF334F	WRF361H	STARS3	WET13
CanESM2_r1			X								X			X	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5		X	X					X			X			X	10
ICHEC-EC-EARTH_r1															
ICHEC-EC-EARTH_r3					X										
ICHEC-EC-EARTH_r12											X			X	10
IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1								X				X			
MIROC5_r1			X								X			X	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1			X	X			X	X			X			X	10*
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1										X				X	10*
MPI-M-MPI-ESM-LR_r2										X					
NorESM1-M_r1					X										
Datenquelle								CORDEX						ReKliEs-DE	
Ausschluss durch DWD										X					
Ausschluss durch LfU										X					

7 Schlussfolgerung

Das vorgestellte Klimaprojektionsaudit beinhaltet neben der Plausibilitätsprüfung auch eine qualitative Prüfung nach klar formulierten Kriterien und regional differenzierter Analyse. Es ermöglicht somit eine wissenschaftliche und nachvollziehbare Auswahl von Klimamodellen, die elementarer Bestandteil eines „qualitätsgeprüften“ Bayerischen Klimaprojektionsensembles (Bayern-Ensemble, siehe Tabelle 9) sind.

Tab. 9: Bayern-Ensemble_v1 für die einzelnen RCP-Szenarien

Globalmodell	Regionalmodell	RCP		
		8.5	4.5	2.6
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17			
ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E			
ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4			
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E			
ICHEC-EC-EARTH (r1)	UHOH-WRF361H	*		
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17			
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4			
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H			
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	WETTREG-13			
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17			
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF361H			
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	WETTREG-13			
	Daten verfügbar (*Strahlung noch nicht verfügbar)			
	Daten nicht verfügbar			

Dieses Bayern-Ensemble kann nachfolgend für klimatische Auswertungen herangezogen werden. Eine Bias-Adjustierung ist für eine anschließende Berechnung von Klimakennwerten sowie zur Verwendung in Wirkmodellen, wie z. B. dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM, als ein weiterer Verarbeitungsschritt notwendig und wird am LfU durchgeführt. Als Bias-Adjustierung wird am LfU eine Methodik verwendet, die im Wesentlichen auf Quantile Delta Mapping (QDM) nach CANNON ET AL. (2015) beruht. Das Klimaprojektionsaudit des LfU hilft den weiteren Verarbeitungsaufwand zu reduzieren. Denn es werden diejenigen Projektionen bereits im Vorfeld ausgeschlossen, bei denen eine Bias-Adjustierung einen zu großen Eingriff in die physikalischen Zusammenhänge der Klimamodelle mit sich bringt. Es ist zu erwarten, dass mit Verwendung des Bayern-Ensembles, als Ergebnis des Klimaprojektionsaudits, auch die Belastbarkeit der Klimaaussagen und die Ergebnisse von Wirkmodellen positiv beeinflusst werden.

Literaturverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2014a): Naturräumliche Gliederung Bayerns. 2. Großlandschaften. Online verfügbar unter <https://www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume/index.htm>, zuletzt geprüft am 02.04.2019.

Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2014b): Vergleichende Analyse Globaler Klimamodellsimulationen für Bayern (Süddeutschland) und umliegende Gebiete, UmweltSpezial. - Augsburg: 69 S.

Bernhofer, C.; Hänsel, S.; Schaller, A.; Pluntke, T. (2015): Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit. Schriftenreihe des LfULG, Heft 7/2015, Dresden, 208 S.

CDC, DWD Climate Data Center (2013): Historische tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland, DWD, Deutscher WetterdienstVersion v006, Online verfügbar unter ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical, zuletzt geprüft am 09.01.2019.

Cannon, A.J.; Sobie S.R.; Murdock, T.Q. (2015): Bias correction of simulated precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve relative changes in quantiles and extremes? *J Clim* 28(17):6938–6959. doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1

Cornes, R.; van der Schrier, G.; van den Besselaar, E.J.M.; Jones, P.D. (2018): An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123. doi:10.1029/2017JD028200

Dalelane, C.; Früh, B.; Steger, C.; Walter, A. (2018): A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. In: *J. Appl. Meteor. Climatol.* 57, 3, DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0141.1, 477–491 S.

DWD, Deutscher Wetterdienst (2018): Informationen zu den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rcp-datensatz_node.html, zuletzt geprüft am 24.02.2020.

ENSEMBLES data archive (2014): RCM data portal. Online verfügbar unter <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>, zuletzt geprüft am 01.05.2014.

EURO-CORDEX (2019): RCM data project and portal. Online verfügbar unter <https://euro-cordex.net/index.php.en>, zuletzt geprüft am 23.03.2020, Download von esgf-data.dkrz.de, betrieben von Deutsches Klimarechenzentrum GmbH

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (2005): ERA-40 Monthly Means of Model Level Forecasts. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. Online verfügbar unter <http://rda.ucar.edu/datasets/ds122.2/>, zuletzt geprüft am 09.01.2019.

Freudinger, D.; Frielingsdorf, B.; Stahl, K.; Steinbrich, A.; Weiler, M.; Griessinger, N.; Seibert, J. (2016): Das Potential meteorologischer Rasterdatensätze für die Modellierung der Schneedecke alpiner Einzugsgebiete. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hg.): HyWa: Das Potential meteorologischer Rasterdatensätze für die Modellierung der Schneedecke alpiner Einzugsgebiete; Einsatz simulationsgestützter Modelloptimierung im ereignisbezogenen Talsperrenbetrieb - weiteres siehe Abstract, BfG für Fachverwaltungen des Bundes und der Länder (60. Jahrgang, Heft 6).

Frick, C.; Steiner, H.; Mazurkiewicz, A.; Riediger, U.; Rauthe, M.; Reich, T.; Gratzki, A. (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS). Mean temperature and relative humidity. In: *Meteorologische Zeitschrift*, Volumen 23, Nummer 1, DOI: 10.1127/0941-2948/2014/0560, 15–32 S.

Göttel, H. (2009): Einfluss der nichthydrostatischen Modellierung und der Niederschlagsverdriftung auf die Ergebnisse regionaler Klimamodellierung. Berichte zur Erdsystemforschung, 60, Hamburg.

Hübener, H.; Bülow, K.; Fooker, C.; Früh, B.; Hoffmann, P.; Höpp, S. et al. (2017a): ReKliEs-De Ergebnisbericht.

Jerez, S.; López-Romero, J. M.; Turco, M.; Jiménez-Guerrero, P.; Vautard, R.; Montávez, J. P. (2018): Impact of evolving greenhouse gas forcing on the warming signal in regional climate model experiments. In: Nature communications, 9, 1, DOI: 10.1038/s41467-018-03527-y.

Jin, X.; Tobin, I.; Denvil, S.; Vautard, R. (2016): Report on climate Projection dataset. Clim4Energy. ECMWF COPERNICUS Report.

JRC, Joint Research Center (2015): AGRI4CAST Interpolated Meteorological Data. Online verfügbar unter <http://ies-webarchive-ext.jrc.it/mars/mars/About-us/AGRI4CAST/Data-distribution/AGRI4CAST-Interpolated-Meteorological-Data.html>, zuletzt geprüft am 09.01.2019.

Knoche, R.; Keuler, K. (2017): Dynamische Regionalisierung. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.): Regionale Klimamodellierung I, Offenbach am Main, Deutscher Wetterdienst Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek (promet - Meteorologische Fortbildung, 99), 29–40 S.

Kreienkamp, F.; Spekat, A.; Hoffmann, P. (2017): Empirisch-Statistisches Downscaling. Eine Übersicht ausgewählter Methoden. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.): Regionale Klimamodellierung I, Offenbach am Main, Deutscher Wetterdienst Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek (promet - Meteorologische Fortbildung, 99), 20–28 S.

McSweeney, C. F.; Jones, R. G.; Lee, R. W.; Rowell, D. P. (2015): Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. In: Clim Dyn, 44, DOI: 10.1007/s00382-014-2418-8, 3237–3260 S.

McSweeney, C. F.; Jones, Richard G.; Booth, Ben B. (2012): Selecting Ensemble Members to Provide Regional Climate Change Information. In: J. Climate, 25, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00526.1, 7100–7121 S.

Rauthe, M.; Steiner, H.; Riediger, U.; Mazurkiewicz, A.; Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). In: Meteorologische Zeitschrift, Volumen 22, Nummer 3, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0436, 235–256 S.

Schulla, J. (2012): Model description WaSiM - Water balance simulation model. Completely revised version 2012. Zürich.

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

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Das hydrologische Bayern unterteilt in die Naturräume als Grundlage zur Analyse der Klimaprojektionen	8
Abb. 2:	Vergleich des mittleren jährlichen Niederschlags zwischen den Datensätzen HYRAS-2006 (links) und KliRef-2014 (rechts) für das hydrologische Bayern 1971-2000	10
Abb. 3:	Darstellung der Zonierung für die WaSiM-interne Interpolation der Lufttemperatur. Anhand dieses Rasters werden die Daten aus unterschiedlichen Quellen durch das hydrologische Modell WaSiM zusammengeführt.	12
Abb. 4:	Prozess der Auditierung	14
Abb. 5:	Visuelle Qualitätskontrolle der unbearbeiteten Klimaprojektionsdaten. Nicht plausible mittlere Tagestemperaturen sind rot umrandet.	15
Abb. 6:	Geometrien der verfügbaren Klimaprojektionen	17
Abb. 7:	Beispiel für ein Thermopluviogramm der normierten Bias-Indikatoren für den Naturraum der Alpen	20
Abb. 8:	Beispiel für die Darstellung der modellierten (rote Kurven) und beobachteten (schwarze Kurven) Jahresgänge des Niederschlages für den Naturraum der Alpen	22
Abb. 9:	Beispiel für ein Thermopluviogramm der Änderungssignale für den Naturraum der Alpen in der mittleren Zukunft. Die Auswirkung einer Reduktion um 11 Projektionen wird anhand der Farbunterscheidung visualisiert.	23
Abb. 10:	Beispiel für einen Steckbrief der Bias-Indikatoren (Ind) für die Projektion MPI-M-MPI-ESM-LR_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1 für das Bundesland Bayern	24
Abb. 11:	Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahresgangs der Projektion HadGEM2-ES_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen	26
Abb. 12:	Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahresgangs der Projektion CCCma-CanESM2_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen	27
Abb. 13:	Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahresgangs der Projektion MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen	27
Abb. 14:	Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahresgangs der Projektion MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen	28
Abb. 15:	Gegenüberstellung des mittleren Niederschlagsjahresgangs der Projektion IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen	28

Abb. 16:	Gegenüberstellung des Jahresgangs der mittleren monatlichen Tagestemperatur der RCM-Projektionen (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) im Naturraum der Alpen	30
Abb. 17:	Streudiagramm der 21 Klimaprojektionen nach ihrer Bewertung durch das Audit in den vier Großlandschaften	31
Abb. 18:	Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft in den Alpen	33
Abb. 19:	Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft im Alpenvorland	34
Abb. 20:	Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft im Schichtstufenland	35
Abb. 21:	Spektrum der Klimaänderungssignale für die ferne Zukunft im Mittelgebirge	36
Abb. 22:	Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft in den Alpen	47
Abb. 23:	Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft im Alpenvorland	48
Abb. 24:	Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft im Südwestdeutschen Schichtstufenland	49
Abb. 25:	Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft im Mittelgebirge	50

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Die zur Erstellung des KliRef2014 Datensatzes verwendeten Daten	11
Tab. 2:	Datengrundlage für die verschiedenen meteorologischen Parameter und WHM-Regionen	13
Tab. 3:	Für die Auditierung verwendetes DWD-Referenz-Ensemble 2018 (DWD 2018) mit 21 RCP8.5 (grau) sowie sechs ESD-Projektionen (hell hinterlegt)	16
Tab. 4:	Schrittgröße des Bewertungsschlüssels zur Normierung der Bias-Indikatoren	18
Tab. 5:	Schlüssel zur Vergabe von Bewertungspunkten für die Bias-Indikatoren	19
Tab. 6:	Normierte Indikatoren der 21 RCM für den Niederschlag in den vier Naturräumen. Projektionen, die für mindestens einen Indikator nur null Punkte erhalten haben, sind hervorgehoben und farblich markiert.	25
Tab. 7:	Normierte Indikatoren der 21 RCM für die Temperatur in den vier Naturräumen. Projektionen, die für mindestens einen Indikator nur null Punkte erhalten haben, sind hervorgehoben und farblich markiert.	29
Tab. 8:	Übersicht über die RCP 8.5 Klimaprojektionen sowie resultierendes Bayern_Ensemble_v1 (ESD hell hinterlegt, * für das Bayern- Ensemble_v1 ausgewählte ESD, jeweils Realisation 1)	40
Tab. 9:	Bayern-Ensemble_v1 für die einzelnen RCP-Szenarien	41
Tab. 10:	Normierte Indikatoren (Niederschlag) der 60 ESD für die vier Naturräume	51
Tab. 11:	Normierte Indikatoren (Temperatur) der 60 ESD für die vier Naturräume	52

Anhang

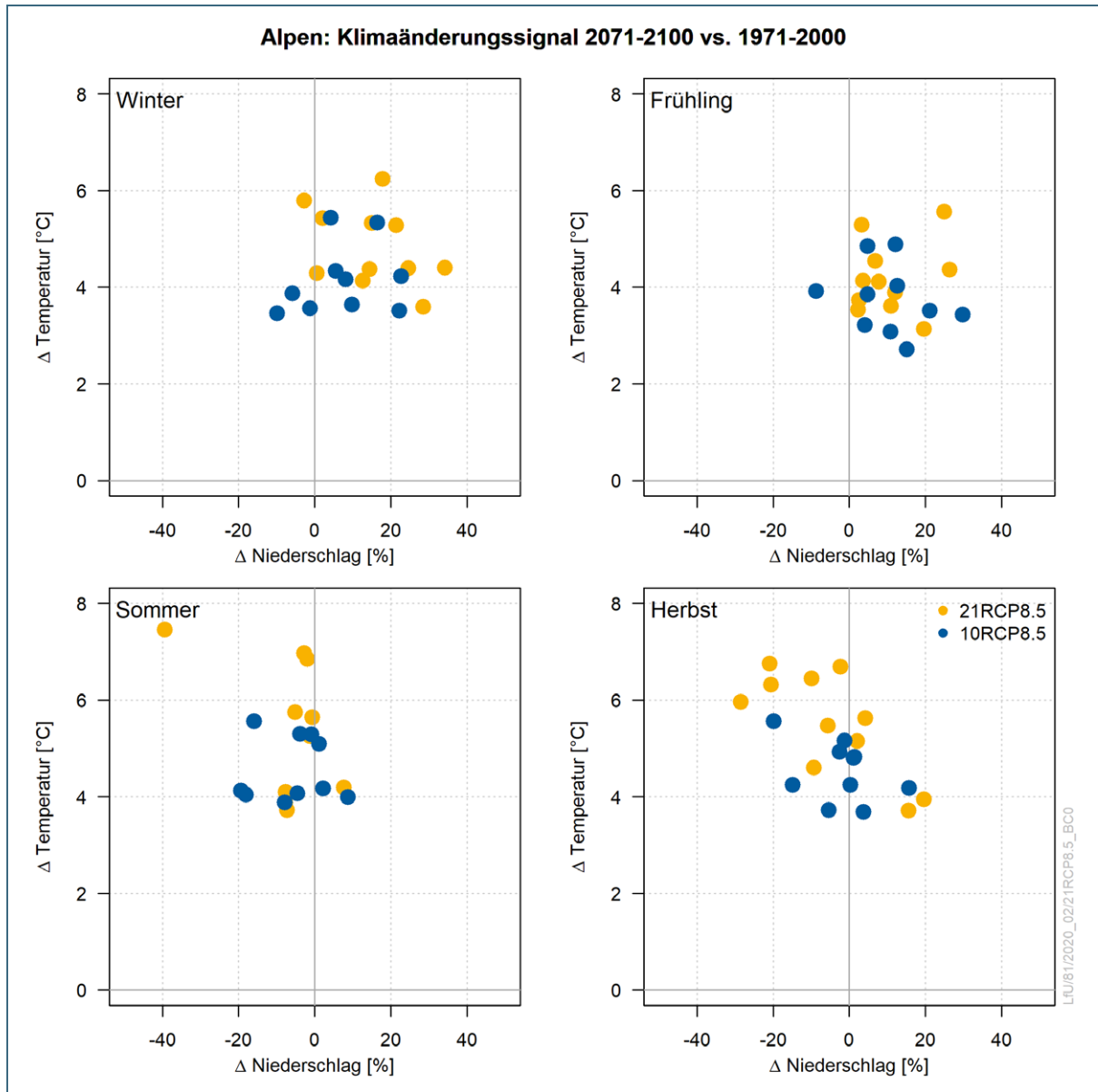


Abb. 22: Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft in den Alpen

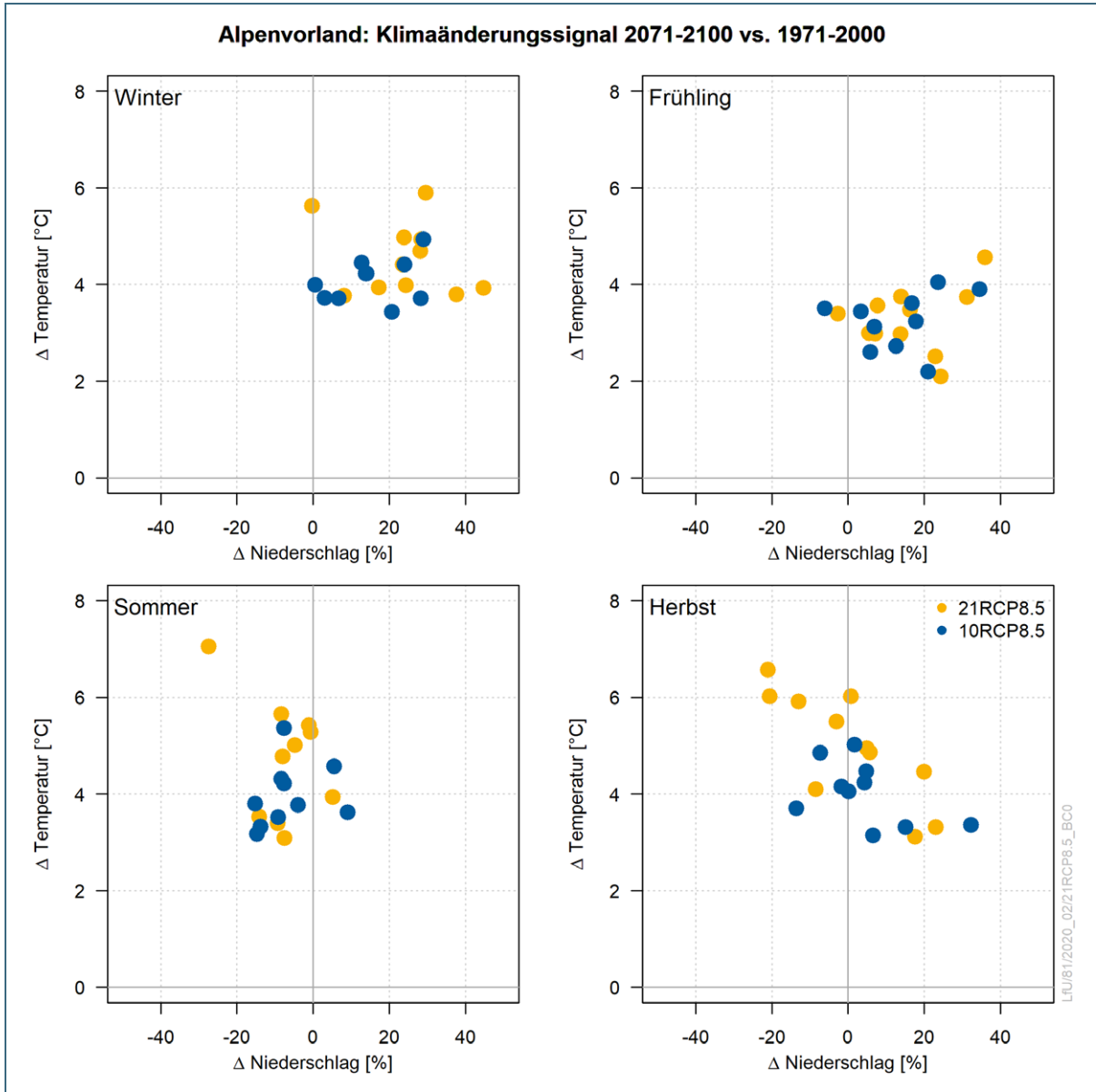


Abb. 23: Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft im Alpenvorland

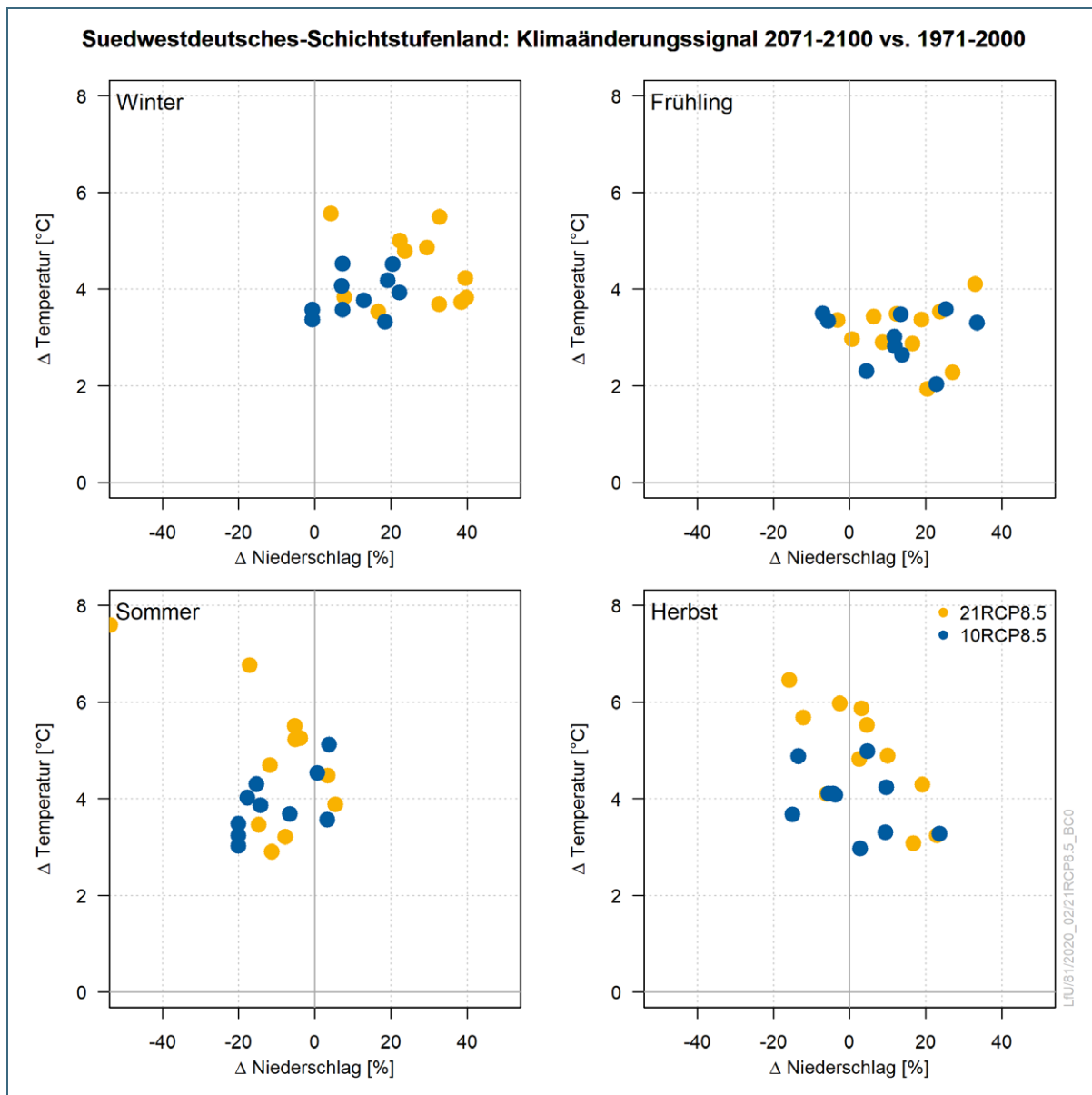


Abb. 24: Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft im Südwestdeutschen Schichtstufenland

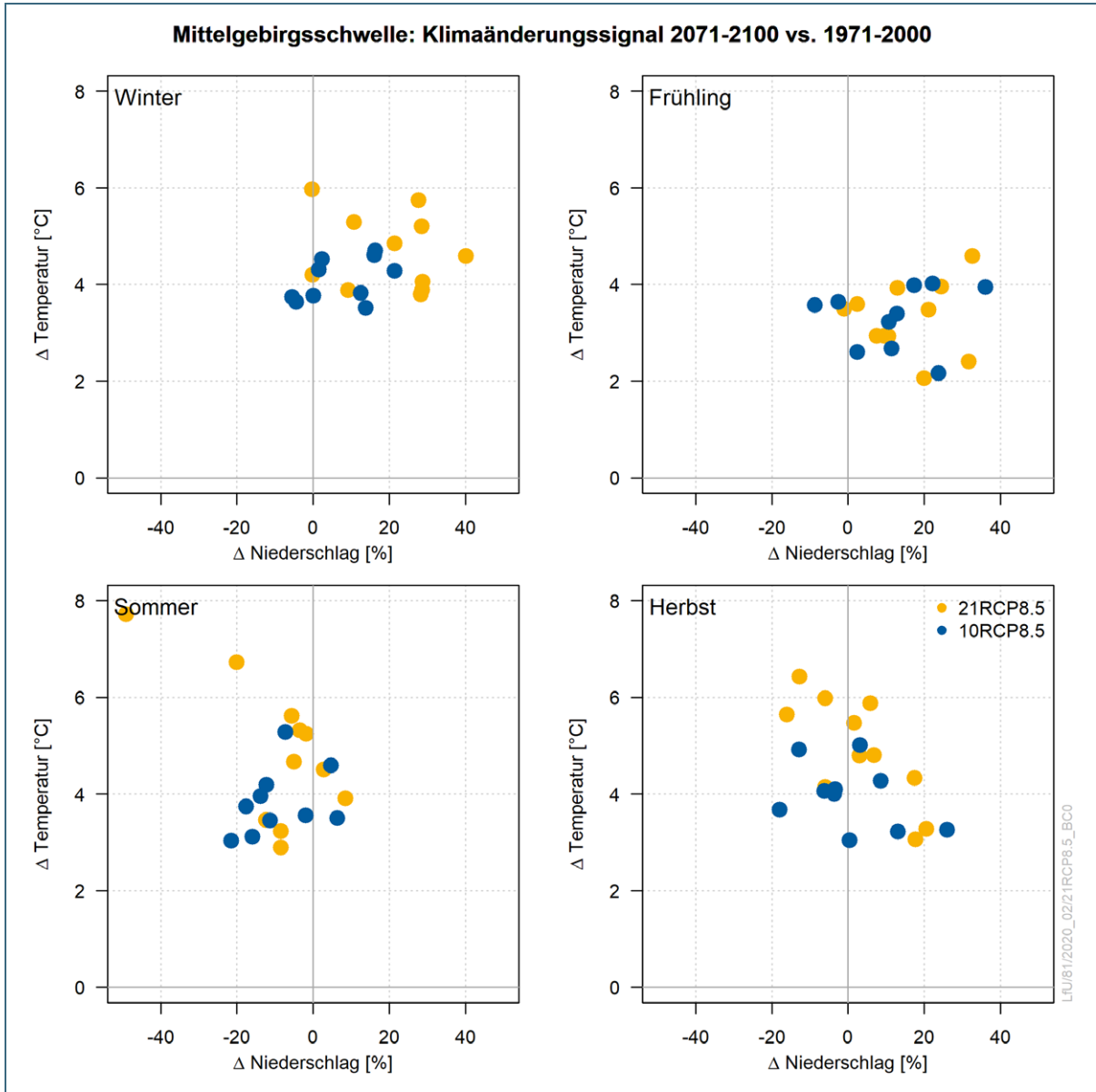


Abb. 25: Spektrum der Klimaänderungssignale der dynamischen Projektionen für die ferne Zukunft im Mittelgebirge

Tab. 10: Normierte Indikatoren (Niederschlag) der 60 ESD für die vier Naturräume

GCM	RCM	Alpen				Alpenvorland				Schichtstufenland				Mittelgebirgsschwelle			
		Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	9	8	7	3	10	9	8	10	10	9	7	10	10	8	8	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	9	8	9	3	10	8	9	10	10	8	7	10	9	8	5	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	9	8	7	3	9	9	8	10	10	9	6	10	10	8	6	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	8	8	6	3	9	9	8	10	10	9	8	10	10	8	6	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	9	8	8	3	10	9	10	10	10	9	8	10	9	8	6	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	9	8	6	3	10	9	8	10	10	9	7	10	10	8	7	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	8	8	8	3	9	9	8	10	10	9	7	10	10	8	7	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	9	9	8	3	10	9	9	10	10	9	7	10	9	8	7	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	8	8	8	3	10	9	9	10	10	9	8	10	10	8	7	10
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	9	8	7	3	9	8	8	10	10	8	7	10	9	8	5	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	9	8	6	3	10	8	7	10	10	8	6	10	10	8	6	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	9	8	8	3	10	9	10	10	10	9	7	10	9	8	6	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	9	8	8	3	10	9	9	10	10	9	6	10	10	8	6	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	8	8	7	4	9	9	9	10	10	9	7	10	10	8	6	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	10	9	8	3	10	9	9	10	10	8	7	10	9	8	7	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	9	8	8	4	10	9	9	10	10	9	7	10	9	8	6	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	8	8	7	3	9	8	9	10	10	9	8	10	10	8	6	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	9	8	8	3	10	9	9	10	10	9	7	10	10	9	8	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	8	8	7	3	9	9	9	10	10	9	8	10	10	9	8	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	9	8	7	3	10	8	7	10	10	9	8	10	10	9	8	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	7	7	7	3	8	8	8	10	10	9	7	10	10	8	8	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	7	7	7	3	8	8	8	10	9	8	6	10	10	8	6	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	7	7	7	3	9	8	8	10	10	8	5	10	10	8	6	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	7	7	7	4	8	8	8	10	10	9	8	10	10	8	8	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	7	7	8	3	9	8	9	10	10	9	8	10	10	9	8	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	8	8	8	3	9	8	9	10	10	8	6	10	10	8	6	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	8	8	9	3	9	9	9	10	10	9	8	10	10	9	8	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	8	8	8	4	9	8	9	10	10	9	8	10	10	8	6	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	7	7	8	3	8	8	9	10	10	9	8	10	10	8	7	10
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	8	7	7	3	9	8	8	10	10	9	8	10	10	9	8	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	8	7	8	3	9	8	9	10	10	9	8	10	10	9	8	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	8	8	7	3	9	9	9	10	10	9	7	10	10	8	7	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	8	8	7	4	9	8	8	10	10	8	5	10	10	8	6	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	7	7	8	3	9	8	9	10	10	9	7	10	10	9	8	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	7	7	7	4	8	8	8	10	10	9	8	10	10	9	8	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	8	8	7	4	9	9	8	10	10	8	6	10	10	8	6	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	8	8	8	3	9	8	8	10	10	8	7	10	10	8	7	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	8	8	8	3	9	8	9	10	10	9	7	10	10	8	7	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	8	8	7	4	9	8	8	10	10	9	6	10	10	9	8	10
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	8	8	6	3	9	8	7	10	10	8	6	10	10	8	7	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	8	8	6	3	9	8	7	10	10	9	8	10	10	9	7	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	9	8	7	3	10	9	8	10	10	9	6	10	10	8	6	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	9	8	8	3	10	8	9	10	10	9	6	10	10	8	5	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	9	8	7	3	10	8	8	10	10	9	7	10	10	9	8	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	9	8	6	3	9	9	8	10	10	9	7	10	10	9	8	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	8	8	8	3	10	9	9	10	10	9	7	10	10	8	7	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	9	8	7	3	10	8	9	10	10	9	6	10	10	8	6	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	9	8	9	3	10	9	10	10	10	9	7	10	10	8	6	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	9	8	7	3	10	8	9	10	10	8	7	10	10	8	7	10
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	9	8	7	3	10	8	9	10	10	8	6	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	8	8	8	3	9	8	9	10	10	9	6	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	8	8	9	3	9	9	9	10	10	9	8	10	10	9	8	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	8	7	7	3	9	8	8	10	10	8	7	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	7	7	7	4	9	8	8	10	10	9	6	10	10	8	6	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	7	7	7	3	8	8	7	10	10	9	6	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	7	7	6	3	8	8	8	10	10	8	7	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	7	7	7	3	8	8	8	10	10	9	7	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	8	8	9	3	9	8	9	10	10	9	7	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	8	8	7	3	8	8	8	10	10	8	6	10	10	8	7	10
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	8	8	8	3	9	9	9	10	10	9	7	10	10	9	8	10

Tab. 11: Normierte Indikatoren (Temperatur) der 60 ESD für die vier Naturräume

GCM	RCM	Alpen				Alpenvorland				Schichtstufenland				Mittelgebirgsschwelle			
		Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	5	5	10	6	9	8	10	5	9	8	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	5	5	10	6	9	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	5	5	10	6	9	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	5	5	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	5	5	10	6	9	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	5	5	10	6	9	8	10	5	9	8	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	4	4	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CCCma-CanESM2_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	5	5	10	6	9	8	10	6	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	6	6	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	10	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	6	6	10	6	9	9	10	6	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	6	6	10	6	9	9	10	5	10	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	5	5	10	6	9	9	10	5	10	9	10	9	10	9	10	7
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	5	5	10	6	9	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	10	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	5	5	10	6	9	8	10	5	9	8	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	5	5	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	7
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	10	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	5	5	10	6	9	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	5	5	10	6	10	9	10	5	10	9	10	9	10	9	10	7
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	5	5	10	6	9	9	10	5	10	9	10	9	10	9	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	5	5	10	6	9	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	10	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	5	5	10	6	9	8	10	5	9	8	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	5	5	10	6	9	8	10	5	9	8	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	5	5	10	6	9	8	10	5	9	8	10	9	10	9	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	6	6	10	6	10	9	10	5	10	9	10	9	10	10	10	6
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	5	5	10	6	9	9	10	5	9	9	10	9	10	10	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r1	4	4	10	6	8	8	10	5	8	8	10	9	9	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r10	4	4	10	6	8	8	10	5	8	8	10	9	10	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r2	4	4	10	6	8	8	10	5	8	8	10	9	10	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r3	4	4	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r4	4	4	10	6	8	8	10	5	8	8	10	9	10	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r5	4	4	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	10	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r6	4	4	10	6	8	8	10	5	8	8	10	9	10	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r7	4	4	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r8	4	4	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2013_v1-r9	4	4	10	6	8	8	10	5	9	9	10	9	10	9	10	6



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

