



ReKliEs-De ERGEBNISBERICHT

GEFÖRDERT VOM



UNIVERSITÄT HOHENHEIM



Autoren

Dr. Heike Hübener ¹⁾

Dr. Katharina Bülow ²⁾

Dr. Cornelia Fooker ¹⁾

Dr. Barbara Früh ³⁾

Dr. Peter Hoffmann ⁴⁾

Simona Höpp ³⁾

Dr. Klaus Keuler ⁵⁾

Dr. Christoph Menz ⁴⁾

Dr. Viktoria Mohr ⁶⁾

Dr. Kai Radtke ⁵⁾

Hans Ramthun ⁷⁾

Arne Spekat ⁴⁾

Dr. Christian Steger ³⁾

Dr. Frank Toussaint ⁷⁾

Dr. Kirsten Warrach-Sagi ⁶⁾

Michael Woldt ⁵⁾

¹⁾ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

²⁾ Climate Service Center Germany

³⁾ Deutscher Wetterdienst

⁴⁾ Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

⁵⁾ Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

⁶⁾ Universität Hohenheim

⁷⁾ Deutsches Klimarechenzentrum

Satz und Layout

Arne Spekat

doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht

Dezember 2017

ReKliEs-De

Ergebnisbericht

REKLIES-DE
Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland

Dezember 2017

Kernbotschaften

Im Projekt ReKliEs-De wurden die Klimaänderungssignale zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 für das ReKliEs-De-Gebiet (Deutschland und die nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete) untersucht.

ReKliEs-De Mehrwert

Das EURO-CORDEX/ReKliEs-De Ensemble stellt durch seine Größe, die hohe räumliche Auflösung und die Kombination aus statistischen und dynamischen Regionalisierungsverfahren eine **weltweit einzigartige Datenbasis** für die Erforschung des Klimawandels dar. Die Bandbreite der Klimaänderungssignale für das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) und das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) wird durch die in ReKliEs-De zusätzlich erzeugten Simulationen für viele Größen erweitert. Die zentralen Aussagen vorheriger Studien zur Temperaturänderung sowie zur Niederschlagsänderung im Sommer und Winter bleiben aber erhalten.

Nutzerorientierung

Die im Projekt angestrebte Nutzerorientierung wurde durch mehrere Maßnahmen sichergestellt, unter anderem durch einen interaktiven Nutzerworkshop zur Projekthälfte. In einem **Nutzerhandbuch** werden Interpretations- und Anwendungshinweise für die Projektergebnisse gegeben. Neben den Modelldaten werden auch vorausgewertete Daten (klimatische **Kennzahlen**) bereitgestellt und in Graphiken aufbereitet.

Temperatur

Das Modell-Ensemble zeigt für das Weiter-wie-bisher-Szenario eine **Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um fast 4 °C** (Bandbreite des Klimaänderungssignals von 2,8 bis 5,2 °C). Im Klimaschutz-Szenario würde die Erwärmung nur 1 °C (Bandbreite von 0,7 bis 2,4 °C) betragen (siehe Abb. 1). Die wärmsten Tage und **Hitzeperioden werden zunehmen**, Kälteperioden werden abnehmen oder ganz verschwinden. Alle Temperaturänderungen sind im Weiter-wie-bisher-Szenario deutlich stärker als im Klimaschutz-Szenario.

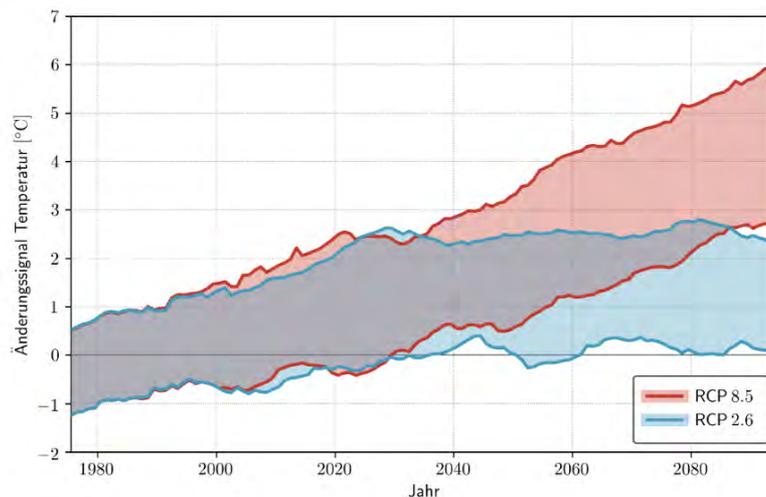


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der Jahresmitteltemperaturänderung in den Szenarios RCP8.5 (rot) und RCP2.6 (blau). Verwendet wurden Regionalisierungen, die sowohl mit Antrieb des Szenarios RCP2.6 als auch RCP8.5 gerechnet wurden.

Niederschlag

Die Mehrzahl der Klimaprojektionen simuliert für den Sommer eine Niederschlagsabnahme, einige simulieren jedoch auch Zunahmen. Der Winterniederschlag nimmt in fast allen Simulationen zu.

Im Weiter-wie-bisher-Szenario reichen die Änderungssignale im Sommer von -60% bis $+40\%$, im Winter von 0 bis $+40\%$. Im Klimaschutz-Szenario liegen die Änderungen bei -30% bis $+10\%$ im Sommer und bei -12% bis $+15\%$ im Winter. Die **Niederschlagsmenge bei Starkregen nimmt prozentual stärker zu als die mittlere Niederschlagsmenge.**

Wind und Strahlung

Die Änderungen der mittleren Windgeschwindigkeit und der einfallenden kurzwelligen Strahlung (Globalstrahlung) sind in beiden Szenarien gering und nicht statistisch signifikant.

Vergleich SRES/RCP

Das RCP8.5-Ensemble (37 Klimaprojektionen) zeigt prinzipiell ähnliche Ergebnisse wie das SRES A1B-Ensemble (16 Projektionen). Allerdings sind die Änderungen in fast allen Größen für das Szenario RCP8.5 stärker als für das Szenario SRES A1B. Für Kennzahlen, bei denen Änderungen in unterschiedliche Richtungen simuliert werden (z.B. einige Niederschlags-Kennzahlen), ist meist die Bandbreite im Szenario RCP8.5 größer als im Szenario SRES A1B.

Einfluss der globalen und der regionalen Modelle

Das Änderungssignal der Jahresmitteltemperatur wird durch das antreibende Globalmodell dominiert. Bei den Änderungen einiger anderer Temperaturkennzahlen, wie z.B. der Spanne der Tagestemperatur, ist der Einfluss des Regionalmodells deutlicher sichtbar. Das Änderungssignal des Niederschlags ist stärker durch das Regionalmodell beeinflusst.

Vergleich der Ergebnisse statistischer und dynamischer Regionalmodelle

Für die meisten Temperaturkennzahlen ergeben sich übereinstimmende Änderungssignale zwischen statistischen und dynamischen Regionalmodellen. Unterschiede zeigen sich vor allem beim Niederschlag: Die statistischen Modelle zeigen einen systematischen Rückgang der Jahresniederschläge, die dynamischen Modelle liefern hingegen überwiegend eine Niederschlagszunahme (siehe Abb. 2).

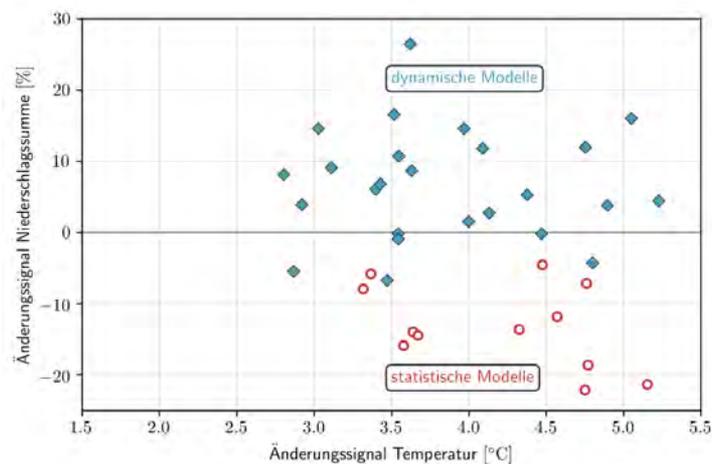


Abbildung 2: Änderung der Temperatur (x-Achse) und des Niederschlages (y-Achse) im Jahresmittel, für RCP8.5, 2071–2100 verglichen mit 1971–2000.

Robustheit

Für die meisten Temperaturkennzahlen und die mittlere Niederschlagshöhe wird die Bandbreite der Änderungssignale mit dem verwendeten Ensemble robust, d.h. sie lässt sich also belastbar abschätzen. Dies gilt jedoch nicht für seltene Ereignisse wie z.B. die tropischen Nächte oder Starkregen-Kennzahlen. Bei diesen erhöht sich die Bandbreite im vorliegenden Ensemble immer weiter, je mehr Projektionen hinzukommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Erkenntnisgewinn durch ReKliEs-De	4
3	Nutzerorientierung	10
4	Temperatur	13
4.1	Mittlere Temperaturwerte	13
4.2	Extreme	15
5	Niederschlag	18
5.1	Mittlerer Niederschlag	18
5.2	Extreme	20
6	Wind und Strahlung	23
6.1	Wind	23
6.2	Strahlung	24
7	Vergleich zwischen den Szenarien SRES A1B und RCP8.5	26
7.1	Vergleich zwischen Äpfeln und Birnen	26
7.2	Vergleich der Temperaturänderung	28
7.3	Vergleich der Niederschlagsänderung	31
8	Einfluss des GCMs auf die RCM/ESD-Ergebnisse	33
9	Vergleich von Regionalisierungen mit RCMs und ESDs	40
9.1	Temperatur und Temperaturkennzahlen	40
9.2	Niederschlag und Niederschlagskennzahlen	44
9.3	Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung	46
10	Robustheit	47

Inhaltsverzeichnis

11 Fazit	52
12 Abkürzungen	54
Anhang	I
A Nomenklatur für Modell-Läufe	I
B Kennzahlen	V
C Grafikdateien für Ensembleabbildungen und Einzelmodelle	VII

1

Einleitung

Im Projekt ReKliEs-De (September 2014 bis Dezember 2017) wurden insgesamt 28 regionale Klimaprojektionen berechnet, 12 davon mit dynamischen regionalen Klimamodellen (RCMs) für ganz Europa, die restlichen 16 mit statistischen regionalen Klimamodellen (ESDs) nur für Deutschland und die nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete (Abb. 1.1). Alle Simulationen erfolgten mit einer räumlichen Auflösung von 12 km ($0,11^\circ$).

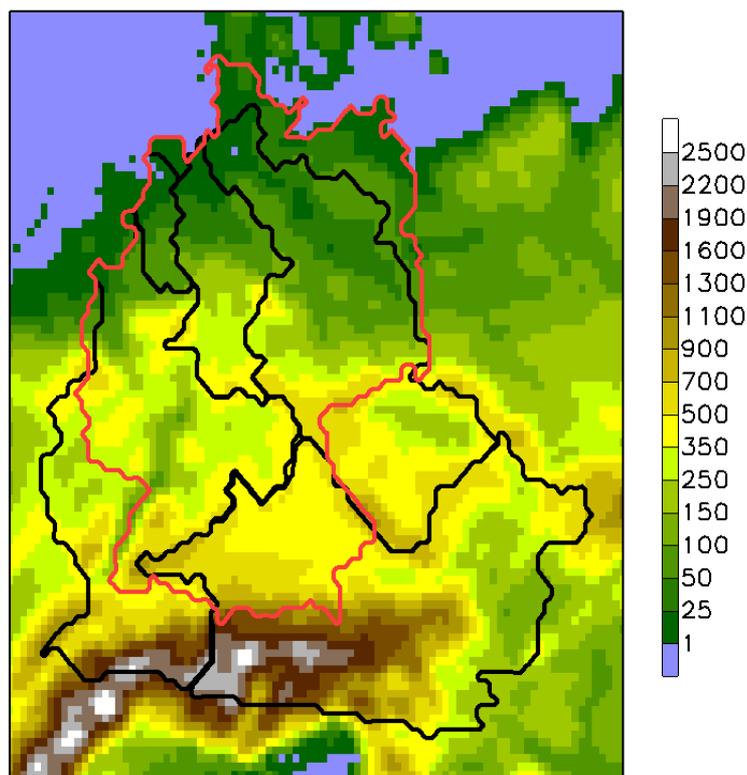


Abbildung 1.1: ReKliEs-De-Untersuchungsgebiet mit der Orographie in der Auflösung von 12 km: Deutschland (roter Umriss) und die Einzugsgebiete von Donau, Rhein, Elbe, Weser und Ems (schwarz).

1 Einleitung

Damit wurde die Anzahl zur Auswertung verfügbarer Klimaprojektionen für Deutschland wesentlich vergrößert. Insbesondere die statistischen Verfahren waren in den vorher vorhandenen Ensembles nicht vertreten.

Eine der in ReKliEs-De geplanten dynamischen Simulationen (MIROC5, regionalisiert mit WRF) wurde wegen technischer Probleme nicht rechtzeitig fertig, um in den Auswertungen berücksichtigt zu werden. Die Daten dieser Simulation sind aber ebenfalls inzwischen verfügbar.

Für alle in ReKliEs-De durchgeführten Auswertungen wurden neben den im Projekt selbst durchgeführten Simulationen auch alle bis zum Stichtag 31.5.2017 vorliegenden Simulationen aus EURO-CORDEX berücksichtigt (Tab. 1.1). Damit liegt den Auswertungen in diesem Bericht ein Ensemble von 37 Simulationen für das Weiter-wie-bisher-Szenario RCP8.5 und ein Ensemble von 15 Projektionen für das Klimaschutz-Szenario RCP2.6 zugrunde.

Neben der Generierung der Simulationen und der wissenschaftlichen Auswertung war ein weiterer Schwerpunkt im Projekt die nutzerorientierte Aufbereitung und Bereitstellung der Ergebnisse. Insbesondere hierfür wurde zur Projekthalbzeit ein Nutzerworkshop durchgeführt, bei dem die Nutzer die Projektarbeiten einsehen konnten und interaktiv ihre Wünsche und Anforderungen direkt in das Projekt einbringen konnten. Diese waren:

- Weitere auszuwertende Kennzahlen (einige davon wurden in das Projekt aufgenommen),
- Unterstützung der Nutzer bei der Interpretation der Modellergebnisse (dies wurde im Nutzerhandbuch berücksichtigt) und
- geeignete Darstellungsformen für die Ergebnisse (diese finden sich im Ergebnisbericht und im elektronischen Ergänzungsdokument).

Die Projektergebnisse werden in drei Dokumenten präsentiert, die auf der Projekt-Webseite <http://reklies.hlnug.de/startseite/> verlinkt sind.

- Der hier vorliegende **Ergebnisbericht** stellt die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse zusammen.
- Im elektronischen Ergänzungsdokument (**Supplement**) sind Abbildungen zu allen Auswertungen für alle Kennzahlen und alle Modelle in graphischer Form enthalten.
- Das **Nutzerhandbuch** liefert Erläuterungen und Interpretationshilfen für die in diesem Ergebnisbericht vorgestellten Erkenntnisse. Das Nutzerhandbuch dient als „Gebrauchsanweisung“ für die Arbeit mit den Projektergebnissen in der Klimafolgenforschung und Politikberatung.

Außerdem werden die Daten der Modellläufe und der Kennzahlen über das ESGF-Portal <http://reklies.wdc-climate.de> zur Verfügung gestellt.

Tabelle 1.1: Liste aller in ReKliEs-De ausgewerteten Simulationen. Die erste Spalte enthält die antreibenden Globalmodelle und das verwendete Szenario, die oberste Reihe enthält die verwendeten Regionalmodelle. Für alle im Projekt ReKliEs-De durchgeführten Simulationen ist in Klammern in der entsprechenden Gitterbox der Name der ausführenden Institution vermerkt.

RCM / ESD GCM + RCP	CCLM	REMO	WRF	WR13	STARS3	RCA4	RACMO	HIRHAM5
EC-EARTH RCP2.6	EURO CORDEX				ReKliEs- De (PIK)	EURO CORDEX	EURO CORDEX	EURO CORDEX
HadGEM2-ES RCP2.6					ReKliEs- De (PIK)	EURO CORDEX	EURO CORDEX	
MPI-ESM-LR RCP2.6	ReKliEs- De (BTU)	EURO CORDEX*	ReKliEs- De (UHOH)	ReKliEs- De (PIK)	ReKliEs- De (PIK)	EURO CORDEX		
MPI-ESM-LR RCP8.5	EURO CORDEX	EURO CORDEX*	EURO CORDEX	ReKliEs- De (PIK)	ReKliEs- De (PIK)	EURO CORDEX		
CNRM-CM5 RCP8.5	EURO CORDEX	ReKliEs- De (GERICS)		ReKliEs- De (PIK)	ReKliEs- De (PIK)	EURO CORDEX		
HadGEM2-ES RCP8.5	EURO CORDEX	ReKliEs- De (GERICS)	ReKliEs- De (UHOH)	ReKliEs- De (PIK)	ReKliEs- De (PIK)	EURO CORDEX	EURO CORDEX	
EC-EARTH RCP8.5	EURO CORDEX	ReKliEs- De (GERICS)	ReKliEs- De (UHOH)	ReKliEs- De (PIK)	ReKliEs- De (PIK)	EURO CORDEX	EURO CORDEX	EURO CORDEX
CanESM2 RCP8.5	ReKliEs- De (DWD)	ReKliEs- De (GERICS)		ReKliEs- De (PIK)	ReKliEs- De (PIK)			
MIROC5 RCP8.5	ReKliEs- De (DWD)	ReKliEs- De (GERICS)	ReKliEs- De** (UHOH)	ReKliEs- De (PIK)	ReKliEs- De (PIK)			
IPSL-CM5A RCP8.5			EURO CORDEX			EURO CORDEX		

* Hier wurden Lauf 1 und Lauf 2 von MPI-ESM-LR gerechnet.

** Der Lauf wurde gerechnet, ist aber nicht in die Kennzahl-Berechnung und die Abbildungen eingegangen.

Wir, das Forschungsteam und die Projektbegleitgruppe hoffen, dass der Ergebnisbericht, das Nutzerhandbuch und das Supplement der Arbeit der Nutzer entgegenkommen. Die Einbeziehung der Nutzerinteressen war ein Schwerpunkt der Arbeit der Projektbegleitgruppe. Sie hatte mittels Newsletter und Flyer die interessierte Fachöffentlichkeit über die Projektentwicklung fortlaufend informiert.

Das Projekt wurde durch das BMBF unter der Fördernummer 01LK1401 gefördert.



Einordnung der ReKliEs-De Ergebnisse in die bestehenden Ensembles: Erkenntnisgewinn durch das Projekt ReKliEs-De

Im Rahmen von ReKliEs-De wurden die existierenden Ensembles des Klimaschutz-Szenarios (RCP2.6) und des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5) mit statistischen (ESD: Empirical Statistical Downscaling) und dynamischen (RCM: Regional Climate Model) Regionalisierungsverfahren erweitert. Diese Erweiterung fand auf Basis des EURO-CORDEX Ensembles statt. Hierfür wurden hochaufgelöste Klimaprojektionen mit einer räumlichen Gitterweite von 12 km ($0,11^\circ$) für das ReKliEs-De Gebiet (siehe Kap. 1) erzeugt. Die Modellgebiete der dynamischen Modelle decken ganz Europa ab (Gebiet wird auch als EUR11-Gebiet bezeichnet), die statistischen Modelle konnten wegen begrenzter Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten nur Simulationen für das ReKliEs-De Gebiet erzeugen.

Für das Klimaschutz-Szenario wurden in ReKliEs-De sechs zusätzliche Simulationen produziert, womit für das ReKliEs-De-Gebiet nun insgesamt 15 Simulationen für dieses Szenario verfügbar sind. Für das Weiter-wie-bisher-Szenario wurden dem bestehenden Ensemble sogar 21 Simulationen hinzugefügt, womit die Größe dieses Ensembles nun auf 37 Simulationen angewachsen ist. Hervorzuheben ist, dass Europa das einzige Gebiet ist, für das derzeit überhaupt hochaufgelöste Klimaprojektionen mit einer Gitterweite von 12 km ($0,11^\circ$) verfügbar sind. Dies zeigt, dass das EURO-CORDEX/ReKliEs-De-Ensemble sowohl hinsichtlich seiner Größe als auch hinsichtlich seiner Zusammensetzung aus dynamischen und statistischen Verfahren weltweit einzigartig ist und eine hervorragende Datenbasis zur Erforschung des Klimawandels in Deutschland und Europa darstellt.

Die im Rahmen von ReKliEs-De durchgeführte Erweiterung des Ensembles hatte in erster Linie das Ziel, die Bandbreite der zukünftig möglichen Klimazustände möglichst vollständig zu erfassen. Dieses Ziel wurde durch die Integration von bisher nicht verwendeten globalen Klimamodellen, neuen Regionalisierungsverfahren und bisher nicht berücksichtigten Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen umgesetzt.

Eine Analyse der bisher im Rahmen von EURO-CORDEX verwendeten Globalmodelle zeigte, dass die Modelle hinsichtlich ihrer Änderungssignale für Temperatur und Niederschlag über Europa gut im CMIP5-Ensemble¹⁾ verteilt sind. Allerdings sind Modelle mit starkem Änderungssignal hinsichtlich der 2 m-Temperatur und des Niederschlags unterrepräsentiert. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wurden in ReKliEs-De mit MIROC5 und CanESM2 zwei zuvor noch nicht verwendete Globalmodelle ausgewählt, die sich durch hohe Temperatur- oder Niederschlagssignale auszeichnen. Ein weiteres essentielles Kriterium für die Auswahl war auch die Verfügbarkeit der von den Regionalmodellen benötigten Eingangsdaten.

Die Abbildungen 2.1 und 2.2 zeigen die Änderungssignale der 2 m-Temperatur (Abszisse) und des Niederschlags (Ordinate) für das Klimaschutz-Szenario (Abb. 2.1) und das Weiter-wie-bisher-Szenario (Abb. 2.2). Das Änderungssignal ist hierbei die Differenz der räumlichen Mittelwerte des ReKliEs-De Gebiets der Zeiträume 2071–2100 und 1971–2000. Zusätzlich zu den Änderungssignalen der Regionalmodelle sind auch die entsprechenden Änderungssignale der Globalmodelle, welche die Randbedingungen liefern, als Kreis mit Punkt eingetragen. Hierdurch lässt sich der Einfluss der Regionalisierung auf das Änderungssignal abschätzen. Zu beachten ist jedoch, dass die Gebiete, für die der Mittelwert in den Global- und Regionalmodellen berechnet wurde, auf Grund der unterschiedlichen Gitter und Auflösungen nicht völlig identisch sind. Diese Tatsache kann einen Einfluss auf die exakten Zahlenwerte der jeweiligen Änderungssignale haben, beeinflusst die grundsätzlichen Unterschiede aber nicht wesentlich.

Aus Abb. 2.1 geht hervor, dass die Bandbreite des Änderungssignals der 2 m-Lufttemperatur im Klimaschutz-Szenario 0,7 °C bis 2,4 °C beträgt. Die projizierte Niederschlagsveränderung für dieses Szenario liegt zwischen minus 8,5 % und plus 7,9 %. Für das Weiter-wie-bisher-Szenario (Abb. 2.2) bewegt sich die projizierte Temperaturänderung zwischen 2,8 °C und 5,2 °C und die Niederschlagsänderung zwischen minus 22 % und plus 26 %. Für das Klimaschutz-Szenario wurde die Bandbreite der Temperatursignale durch die in ReKliEs-De erzeugten Klimaprojektionen von zuvor 0,9 °C bis 1,8 °C auf 0,7 °C bis 2,4 °C vergrößert. Auch die Untergrenze der möglichen Niederschlagsänderung für dieses Szenario hat sich durch die zusätzlichen Klimaprojektionen von 0 % auf –8,5 % verschoben.

¹⁾Dieses Ensemble bildet die Datenbasis für den fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC).

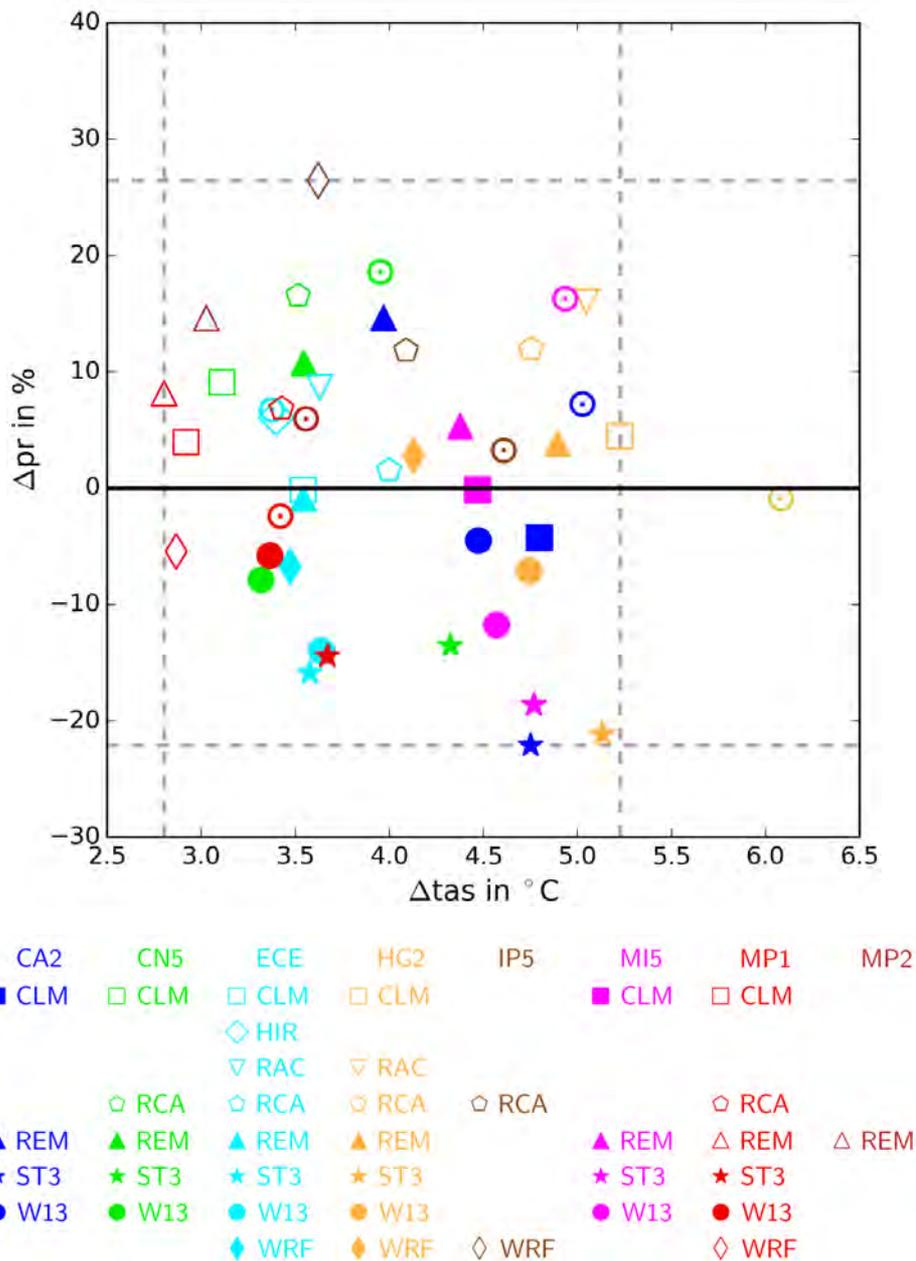


Abbildung 2.2: Wie Abb. 2.1, jedoch für die Änderungssignale in RCP8.5.

Ensemble konnte die Bandbreite diesbezüglich bereits gut abbilden. Dies gilt allerdings nicht notwendigerweise für andere Zeiträume, andere zeitliche Mittelwerte und andere Kennzahlen. So wurde die Bandbreite der Temperaturänderung im Weiter-wie-bisher-Szenario für den Zeitraum 2021–2050 durch die in ReKliEs-De erzeugten Simulationen von 0,7 °C bis 2,2 °C auf 0,7 °C bis 2,5 °C vergrößert. Auch die Bandbreite des Änderungssignals der heißen Tage und der täglichen Temperaturamplitude hat sich beispielsweise durch die neuen Simulationen vergrößert.

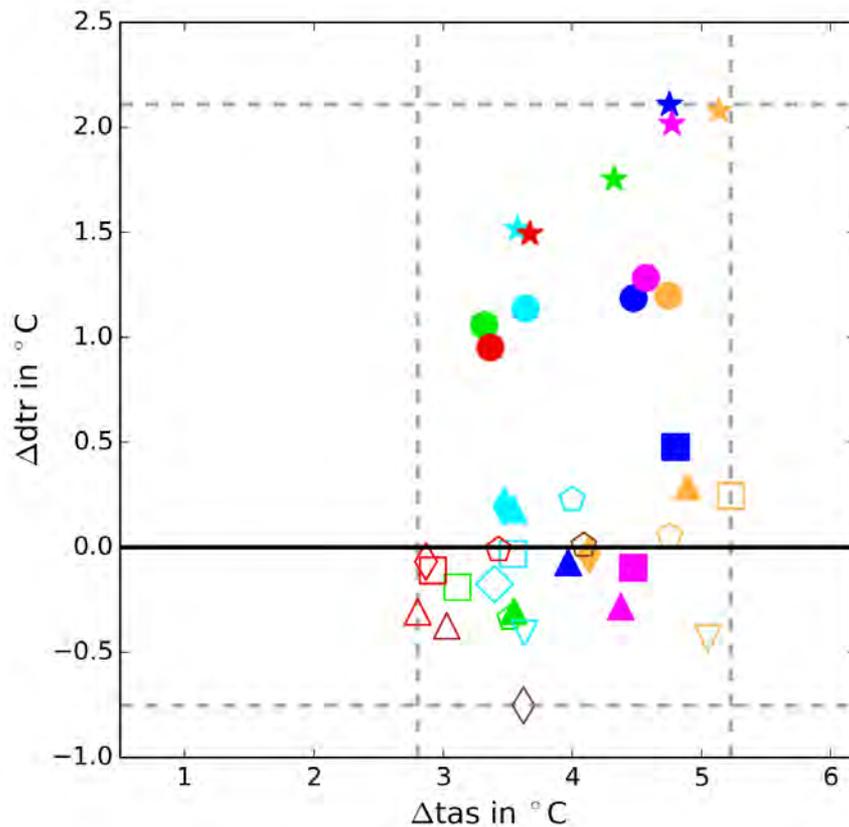


Abbildung 2.3: Wie Abb. 2.2, jedoch für die Änderungssignale der 2 m-Temperatur (tas, x-Achse) und der täglichen Temperaturamplitude (dtr, y-Achse) in RCP8.5.

Für die in Abb. 2.3 dargestellte Änderung der täglichen Temperaturamplitude am Ende des 21. Jahrhunderts im Weiter-wie-bisher-Szenario erhöht sich die Obergrenze der Bandbreite sogar von 0,3 °C auf 2,1 °C. Während die ursprünglich vorhandenen Klimaprojektionen fast ausnahmslos von einer Zunahme des Niederschlags in der Zukunft ausgingen, ergibt sich an dieser Stelle durch die zusätzlichen ReKliEs-De Simulationen ein neues Bild. Insbesondere die Ergebnisse der statistischen Verfahren, aber auch die Ergebnisse einiger dynamischer Klimamodelle (MI5_CLM_R85²⁾, ECE_REM_R85, CA2_CLM_R85, ECE_WRF_R85), projizieren wenig Änderung oder einen Niederschlagsrückgang, wodurch sich die Untergrenze der zukünftig möglichen Bandbreite von -5,4 % auf -22 % verschiebt.

Dieses grundsätzliche Muster lässt sich auch auf einen Großteil der in ReKliEs-De berechneten Klimakennzahlen übertragen, da die meisten davon aus Temperatur- oder Niederschlagsgrößen abgeleitet wurden. Vor allem hinsichtlich der niederschlagsbasierten Kennzahlen, aber auch bezüglich einiger temperaturbasierten Kennzahlen wie der bereits erwähnten täglichen Temperaturamplitude, ist meist eine klare Aufteilung des Ensembles zwischen den Ergebnissen der statistischen und dynamischen Modelle zu registrieren.

²⁾Für die Bezeichnung der Kombinationen aus antreibendem Globalmodell und Regionalmodell wurde für ReKliEs-De eine Kurzschreibweise entwickelt, die in Anhang A erläutert ist.

Einige interessante Aspekte lassen sich auch aus dem Vergleich der regionalen Klimaprojektionen mit den globalen Klimaprojektionen, aus denen die Randbedingungen für die Regionalisierung entnommen wurden, ableiten. Hinsichtlich der Temperatursignale zeigt sich, dass die Regionalmodelle im Wesentlichen den Vorgaben der Globalmodelle folgen, was sich in den Abb. 2.1 und 2.2 daran erkennen lässt, dass Symbole gleicher Farbe, mit einer gewissen Streuung, vertikal übereinander angeordnet sind. Allerdings sind die Änderungssignale in den Regionalmodellen in der Regel um 0,5 °C bis mehr als 1 °C geringer als in den antreibenden Globalmodellen. Dies ist trotz der bereits angesprochenen Probleme hinsichtlich der direkten Vergleichbarkeit der Werte ein bemerkenswertes Ergebnis. Eine Ausnahme stellen diesbezüglich die mit dem Globalmodell EC-EARTH angetriebenen Simulationen dar, die durchweg ein größeres Temperatursignal aufweisen als das Globalmodell. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass verschiedene globale EC-EARTH Realisationen als Antrieb für die Regionalmodelle verwendet wurden (Details siehe Nutzerhandbuch, Kapitel 2).

Hinsichtlich der Niederschlagssignale ergibt sich ein grundlegend anderes Bild als für die Temperatursignale. Hier zeigt sich der Einfluss der Regionalmodelle stärker als bei der Temperatur, was daran zu erkennen ist, dass gleiche Symbole in der Regel mit geringer Streuung horizontal nebeneinander liegen. Dies bedeutet, dass jedes Regionalmodell, vor allem im Vergleich zur Bandbreite des gesamten Ensembles, immer ein ähnliches Niederschlagssignal erzeugt, unabhängig davon mit welchem Globalmodell es angetrieben wurde. Zu beachten ist, dass diese Aussage nur für die hier dargestellten räumlichen und zeitlichen Mittelwerte gilt. Auch WRF stellt hier keine Ausnahme dar, obwohl der Unterschied zwischen IP5_WRF_R85 und den übrigen WRF Simulationen groß ist. Die Projektion IP5_WRF_R85 wurde allerdings im Rahmen von EURO-CORDEX erzeugt, wobei das Modell gänzlich anders eingestellt war als bei den WRF Projektionen, die in ReKliEs-De berechnet wurden. Dadurch kann die für die Projektion IP5_WRF_R85 verwendete WRF Version praktisch als eigenständiges Modell angesehen werden.

Darüber hinaus ist interessant, dass sich die einzelnen Regionalmodelle im Bezug auf jedes Globalmodell anders verhalten. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. COSMO-CLM (CLM) erzeugt mehr Niederschlag als das Globalmodell, wenn es mit MPI-ESM-LR (MP1_CLM_R85) und HadGEM2-ES (HG2_CLM_R85) angetrieben wird. Dagegen ist das Niederschlagssignal geringer als im Globalmodell, wenn CLM mit EC-EARTH (ECE_CLM_R85), CNRM-CN5 (CN5_CLM_R85), MIROC5 (MI5_CLM_R85) und CanESM2 (CA2_CLM_R85) angetrieben wird. Ähnliches gilt auch für die anderen dynamischen Modelle, während die statistischen Modelle im Vergleich mit allen Globalmodellen ein geringeres Niederschlagssignal produzieren, allerdings mit sehr unterschiedlichen Beträgen.

3

Nutzerorientierung

Ziel des Projektes ReKliEs-De ist die Bereitstellung robuster Informationen über die Bandbreiten und Extreme der zukünftigen Klimaentwicklung in Deutschland für die Klimafolgenforschung und Politikberatung. Hierzu gehört neben der Generierung der wissenschaftlichen Erkenntnisse insbesondere auch die nutzerorientierte Aufbereitung der Modellergebnisse für die Verwendung in der Klimafolgenforschung. Zu diesem Zweck wurden zunächst innerhalb von ReKliEs-De die Nutzerbedarfe in zwei Schritten zusammengestellt. Erstens wurde eine Literaturrecherche zu Nutzerbedarfen von regionalen Klimainformationen durchgeführt. Diese ist auf der ReKliEs-De Homepage herunterladbar. Des Weiteren wurde nach der Hälfte der Projektlaufzeit ein Nutzerworkshop durchgeführt, denn für viele Nutzer ist es wichtig, in den Prozess der Entwicklung der Klimainformation einbezogen zu werden. Sie wünschen sich eine ausführliche Beratung und Betreuung sowie die Möglichkeit der wiederholten Rücksprache. Auf dem Workshop wurden erste Projektergebnisse vorgestellt. So konnten die Nutzer während der Projektlaufzeit Einfluss auf die Art und Weise der Darstellung der Ergebnisse nehmen.

Ein wichtiger Wunsch der Nutzer auf dem Zwischenworkshop war ein Kapitel zur Bewertung der im Projekt verwendeten globalen und regionalen Klimamodelle im Nutzerhandbuch. Diesem Wunsch wurde entsprochen und ein entsprechendes Kapitel verfasst. Es beschreibt die Stärken und Schwächen der verwendeten Modelle, so dass die Nutzer die Unterschiede innerhalb des Ensembles nachvollziehen und verstehen können. Des Weiteren gibt das Nutzerhandbuch Informationen zu Auswertestandards, Indizes, Ensembles, Extremen, Bias-Adjustierung und Datenverarbeitung. Zur Verbesserung der Kommunikation zwischen den Wissenschaftlern und Anwendern wird im Nutzerhandbuch viel Wert darauf gelegt, die komplexen Aussagen ohne viele Fachtermini und implizite Formulierungen zu beschreiben, sondern stattdessen eine möglichst allgemeinverständliche Sprache zu wählen. Das Nutzerhandbuch erscheint parallel zum Ergebnisbericht und dient als Hintergrundinformation und Interpretationshilfe für die Projektergebnisse.

Um den Zustand und die Veränderung des Klimasystems zu beschreiben eignen sich sogenannte Kennzahlen, d.h. berechnete Größen aus den Klimamodellergeb-

nissen. Alle Nutzergruppen haben einen Bedarf an unterschiedlichen Kennzahlen. Bei der Literaturrecherche und auf dem Nutzerworkshop wurden die von Nutzern gewünschten Kennzahlen zusammengestellt. Folgende Kennzahlen wurden innerhalb von ReKliEs-De berechnet:

- Temperaturkennzahlen: Mittlere Temperatur (bzw. Minimum und Maximum), Eistage, Frosttage, Sommertage, Hitzetage, tropische Nächte, tägliche Temperaturspanne, Anteil kalter bzw. warmer Tage, Andauer von Kälte- bzw. Wärmeperioden, Heizgradtage, Länge der Vegetationsperiode;
- Niederschlagskennzahlen: Mittlere Niederschlagshöhe, Anzahl der trockenen Tage, Anzahl der Tage mit Niederschlag über 10 bzw. 20 mm, Niederschlagsmenge an feuchten/extrem feuchten Tagen, Anzahl von Trocken- bzw. Niederschlagsperioden und
- Weitere Kennzahlen: Mittlere Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung. Die Kennzahlen sind in Anhang B erläutert.

Die in ReKliEs-De erzeugten Klimasimulationen und berechneten Kennzahlen werden den Nutzern sowohl als Datenfiles als auch in graphischer Aufbereitung zugänglich gemacht. Alle Abbildungen für sämtliche ausgewerteten Kennzahlen sind im elektronischen Ergänzungsdokument (Supplement) verfügbar.

Der Bedarf an einem großen Ensemble von Klimasimulationen wird in ReKliEs-De durch neue Simulationen unterstützt. Die in ReKliEs-De berechneten Modellergebnisse und Kennzahlen liegen auf dem EURO-CORDEX Gitter vor. Im ReKliEs-De-Projekt wurden daher sämtliche Auswertungen für das größtmögliche verfügbare Ensemble durchgeführt, d.h. alle bis zum Stichtag 31.5.2017 verfügbaren EURO-CORDEX-Simulationen wurden ebenfalls in die Auswertungen einbezogen. Je größer das vorhandene Ensemble von Modellprojektionen ist, desto besser lassen sich Unsicherheit und Variabilität der Modellergebnisse bewerten. Die Modellergebnisse sowie die Kennzahlen sind nach dem vorgegebenen Standard formatiert und werden im ESGF frei zur Verfügung gestellt.

Um den Nutzern der Projektergebnisse die Interpretation der Ensemble-Ergebnisse und die Weiterverwendung der Simulationen zu erleichtern, werden im Nutzerhandbuch Hilfestellungen zur Interpretation und Nutzung der Daten gegeben. Zusätzlich sind in fast allen graphischen Darstellungen die einzelnen Simulationen unterscheidbar, d.h. die charakteristischen Eigenschaften bestimmter Modelle oder Modellkombinationen lassen sich innerhalb des Ensembles identifizieren. Auch dazu finden sich weitergehende Erläuterungen im Nutzerhandbuch.

In vielen Fällen fordern die Nutzer eine Korrektur oder Adjustierung systematischer Abweichungen der Modellergebnisse vom beobachteten Klima in der Referenzperiode (sog. Bias). Hierfür gilt, dass es keine universelle Bias-Adjustierung gibt. Es gibt jedoch zahlreiche spezielle Verfahren, welche mit unterschiedlichen Methoden verschiedene klimatologische Variablen korrigieren. Innerhalb von ReKliEs-De werden Bias-Adjustierungen für den Parameter Niederschlag und für

3 Nutzerorientierung

temperaturabhängige Kenntage (z.B: Sommertage, Hitzetage) durchgeführt und den Nutzern zur Verfügung gestellt. Sie ergänzen die bereits von anderen Projekten bereitgestellten bias-adjustierten Datensätze im Datenportal ESGF.

Die Ergebnisse der Klimaforschung können abhängig von den Nutzerbedarfen in unterschiedlichen Datenformaten weiterverarbeitet werden. Die Präferenzen für verschiedene Datenformate hängen stark mit der geplanten Verwendung der Daten zusammen. Die Projekte COST Action VALUE und CLIPC haben die Nutzer von Klimamodellergebnissen in Gruppen abhängig vom Klimadatenbedarf eingeteilt:

- Naturwissenschaftler und Impact-Modellierer benutzen überwiegend die direkten Modellausgabedaten der globalen und regionalen Klimamodelle.
- Wirtschaftswissenschaftler, Sozialwissenschaftler und Endnutzer aus dem privaten und staatlichen Sektor benötigen Informationen zur regionalen Änderung der Klimaindizes (z. B. Hitzeperioden) und zu deren sich ändernden Eintrittswahrscheinlichkeiten. Diese Informationen können aus den regionalen Klimamodelldaten oder Impact-Modellergebnissen stammen. Die Daten und bereits erstellte Graphiken der Ergebnisse werden verwendet.
- Entscheidungsträger und Programminitiatoren aus Wissenschaft und Wirtschaft sowie die Medien benötigen alle Informationen über die Klimaänderung verständlich, eindeutig, knapp und übersichtlich und speziell für ihren Bedarf dargestellt. Sie verwenden die Klimamodelldaten nicht direkt.
- Für gesellschaftliche Endnutzer scheinen, zusätzlich zu den bereits angeführten Formaten, Informationsketten nützlich zu sein. Diese Informationsketten reichen von beobachteten und projizierten Klimaänderungssignalen bis zu deren Einfluss auf das biophysikalische System und die sozialwirtschaftlichen Auswirkungen.

Im Projekt ReKliEs-De werden die Projektergebnisse so aufbereitet, dass sie zumindest für die ersten beiden Nutzergruppen direkt verwendbar sind. Dieser Ergebnisbericht ist so strukturiert, dass er auch für die anderen beiden Nutzergruppen verwendbar sein sollte.

4.1 Mittlere Temperaturwerte

Für das ReKliEs-De-Gebiet liegen die Änderungen der Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum von 2071–2100 gegenüber dem Zeitraum 1971–2000 (Abb. 4.1) für das Klimaschutz-Szenario RCP2.6 (oben) im Ensemble-Median bei 1,0 °C (Mitte), mit einer Bandbreite von 0,8 (links) bis 2,0 °C (rechts). Im Weiter-wie-bisher-Szenario RCP8.5 beträgt die Erwärmung im Ensemble-Median 3,8 °C (Mitte) mit einer Bandbreite von 2,9 (links) bis 5,1 °C (rechts).

Während in Abb. 4.1 nur Median und die 5- und 95-Perzentile dargestellt sind, zeigt Abb. 4.2 die Erwärmungssignale für die gesamte von den Ensemblemitgliedern abgedeckte Bandbreite des Klimaänderungssignals, es reicht von 2,8 bis 5,2 °C im ReKliEs-De-Gebiet. Die mittleren Temperaturänderungssignale unterscheiden sich kaum zwischen den einzelnen Flusseinzugsgebieten. Beim deutlich kleineren Ensemble des RCP 2.6. sieht man ein Änderungssignal von rund 1 °C bei einer Bandbreite von 0,7 bis 2,4 °C bei Einbeziehung aller Simulationen (siehe SUPPLEMENT RCP2.6 DATEI ZU 01_tas, ABB. 1.10¹⁾).

Die Klimasimulationen für das Szenario RCP8.5 weisen im ReKliEs-De Gebiet und einzelnen darin enthaltenen Flusseinzugsgebieten eine starke Abhängigkeit der Temperaturänderungssignale von den antreibenden globalen Klimamodellen (GCMs) auf (Abb. 4.2). Die Bandbreite der jeweiligen Temperaturänderungssignale der GCMs wird durch die regionalen Klimamodelle um rund 1 °C aufgefächert (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 01_tas, ABB. 1.14). Dabei ist das Temperaturänderungssignal bei den mit MPI-ESM-LR angetriebenen Simulationen am geringsten und bei den mit HadGEM2 angetriebenen Simulationen am stärksten.

¹⁾Ergänzende Abbildungen werden im Bericht in dieser Kurzform aufgeführt. Sie sind im elektronischen Supplement zu finden. Die Namen der Dateien sind in Anhang C erläutert und in Tab. C.1 aufgelistet. Für dieses Beispiel heißt die zugehörige Datei mit der Abbildung rcp26/Ensembleabbildungen/01_ReKliEs.Plots_tas_rcp26.pdf – dort ist der im Bericht erwähnte Boxplot zu finden.

4 Temperatur

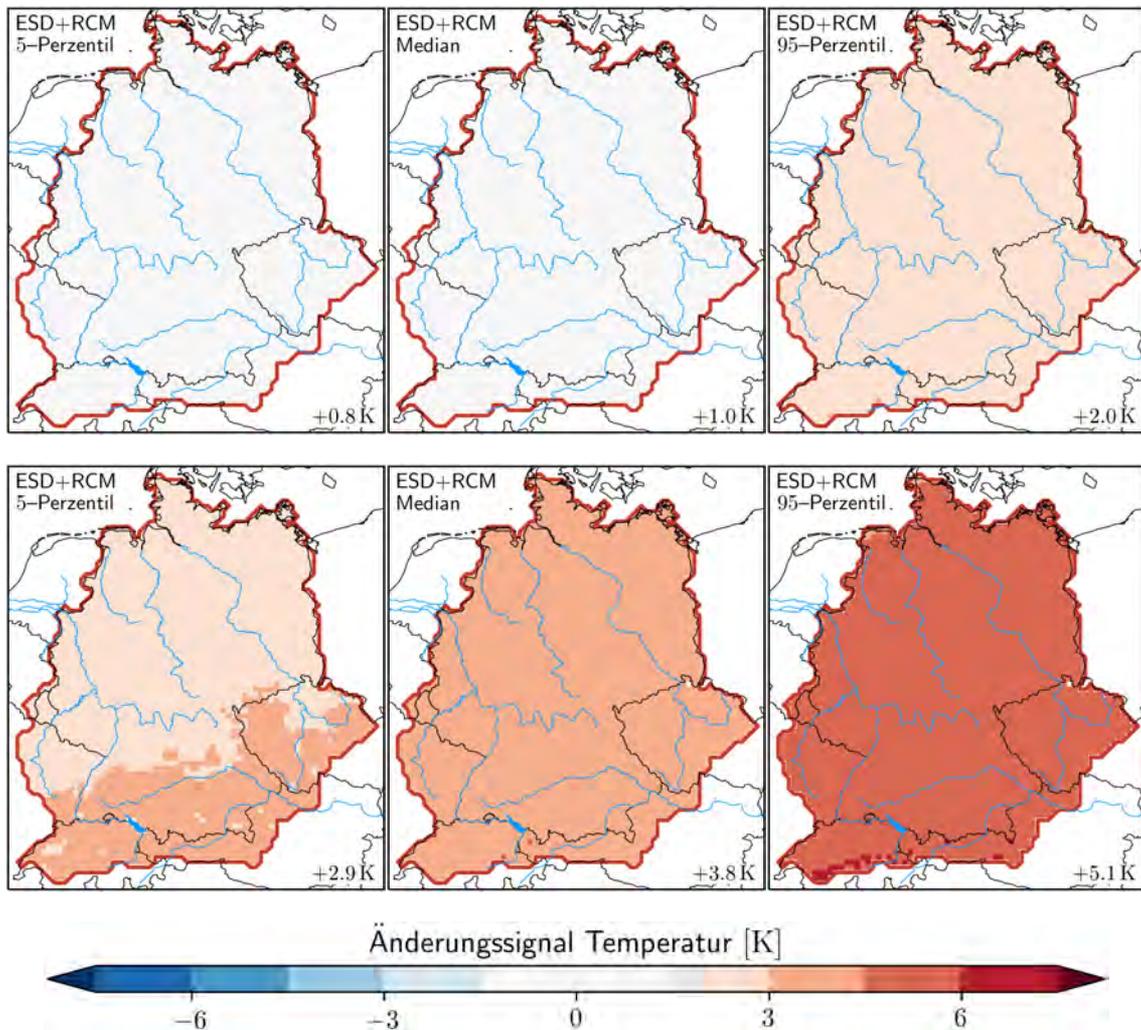


Abbildung 4.1: Temperaturänderung im Jahresmittel für alle verwendeten regionalen Klimaprojektionen, 2071–2100 im Vergleich zu 1971–2000. Oben: Szenario RCP2.6, unten: Szenario RCP8.5. Jeweils links: unterste 5 % aller Ergebnisse, Mitte: Ensemble-Median, rechts: oberste 5 % aller Ergebnisse.

Alle Modellsimulationen zeigen im Sommer eine multidekadische Variabilität, wie sie auch beobachtet wird und die kleiner ist als das Klimaänderungssignal selbst (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 01_tas, ABB. 1.2 und RCP2.6 DATEI ZU 01_tas, ABB. 1.2). Hier zeigt sich ebenfalls der Einfluss der GCMs.

Im ReKliEs-De Gebiet fällt das Klimaänderungssignal bei RCP8.5 im Sommer im Ensemble Median mit 4 °C nur etwas stärker aus als im Jahresmittel (s. Boxplot SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 01_tas, ABB. 1.11), aber im Sommer (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 01_tas, ABB. 1.12) ist die vom Modellensemble abgedeckte Breite des Änderungssignals von 2,6 °C bis zu 7,2 °C deutlich größer als in den übrigen Jahreszeiten und im Jahresmittel. Hier zeigt sich ebenfalls der Einfluss der GCMs: Die mit CanESM2 angetriebenen Simulationen weisen das stärkste Temperaturänderungssignal im Sommer auf. Im Winter sind dies die mit MIROC5 angetriebenen Simulationen. Im Sommer sieht man in den

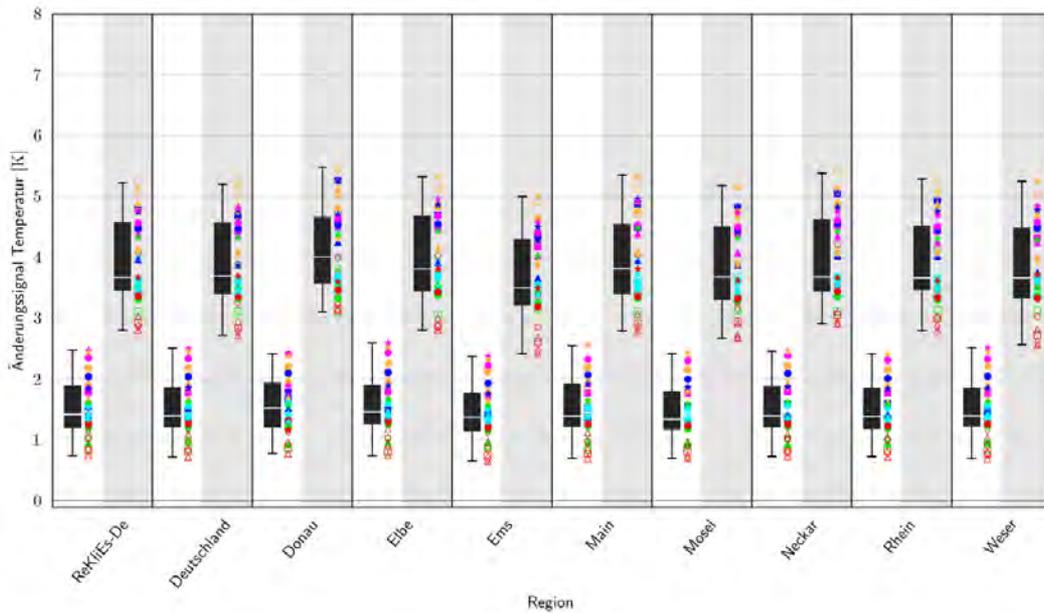


Abbildung 4.2: Boxplot für das das Änderungssignal der Jahresmitteltemperatur mit RCP8.5. Dargestellt sind Paare von Boxplots der Perioden 2021–2050 (weiß hinterlegt) und 2071–2100 (grau hinterlegt) für die ReKliEs-Region, Deutschland sowie 8 Flusseinzugsgebiete. Die Legende zu den Symbolen rechts neben den Boxplots findet sich in Abb. 2.2 auf S. 7.

süddeutschen Flusseinzugsgebieten (z.B. Neckar) eine im Median bis zu 0,5 °C stärkere Erwärmung als in den nördlichen Flusseinzugsgebieten (z.B. Ems).

4.2 Extreme

Die temperaturbezogenen Extreme lassen sich z.B. durch die Anzahl der Hitzetage, Andauer der Hitzeperioden, Anzahl der Eis- und Frosttage sowie die Andauer von Kälteperioden beschreiben.

Die simulierte Anzahl von Hitzetagen, d.h. Tagen mit einer Höchsttemperatur von 30 °C oder darüber, liegt im Mittel über alle Modelle für die Referenzperiode (1971–2000) bei 4,3 Tagen pro Jahr. Im Szenario RCP2.6 werden bis zum Ende dieses Jahrhunderts zusätzlich weitere 3,7 Hitzetage pro Jahr simuliert, im RCP8.5 Szenario sogar weitere 19,4 Tage pro Jahr (Abb. 4.3). Insgesamt liegt das Signal zwischen 8 und 45 zusätzlichen Hitzetagen pro Jahr, mit einer deutlich sichtbaren Abhängigkeit vom Globalmodell. Hier gibt es allerdings eine Ausnahme: Beim Antrieb mit dem Globalmodell CanESM2 zeigen z.B. die Regionalmodelle STARS3 und CCLM die größte Zunahme, während die Simulationsergebnisse mit dem Regionalmodell REMO eher im Mittelfeld der übrigen Simulationsergebnisse liegen.

Die Tendenz der Ergebnisgruppierung nach den antreibenden Globalmodellen wird auch in der zunehmenden Anzahl der wärmsten Tage sichtbar. Eine dafür geeignete Kennzahl ist tx90p, der Anteil der Tage mit Temperaturen über dem 90. Perzentil des Referenzzeitraums. Die Änderungen sind dabei so definiert, dass der

4 Temperatur

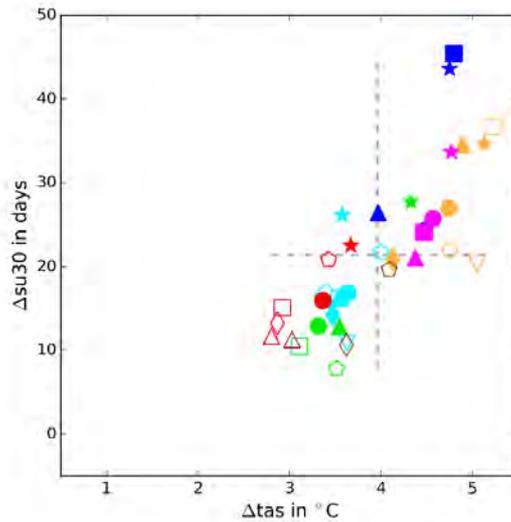


Abbildung 4.3: Streudiagramm für die Kennzahlkombination tas-su30 (Temperatur in Bodennähe und Hitzetage = Tage mit Höchsttemperatur >30 °C), Jahr. Periode 2071–2100, relativ zu 1971–2000 für die ReKliEs-Region und das Szenario RCP8.5. Die Legende ist dieselbe wie in Abb. 2.2.

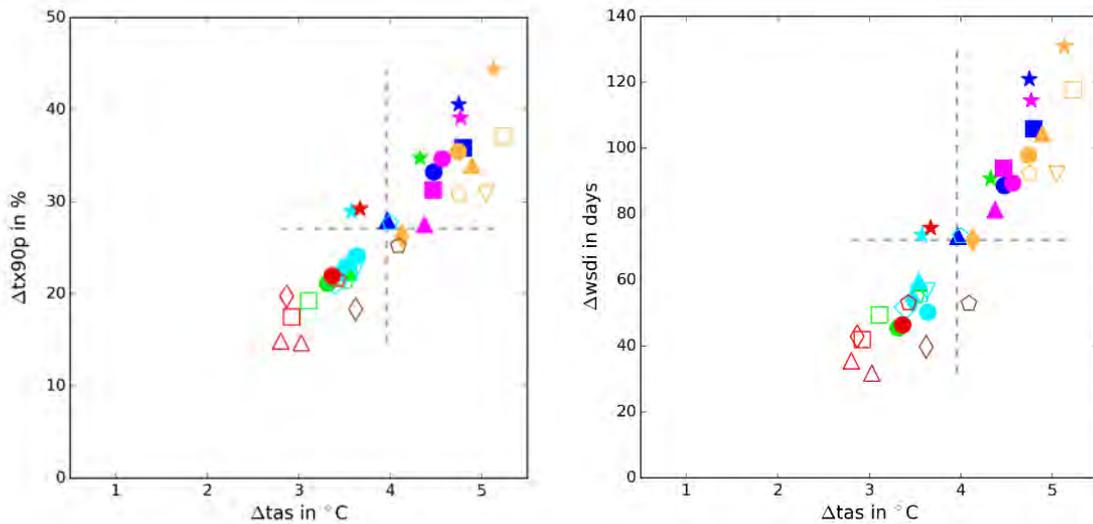


Abbildung 4.4: Links: Streudiagramm für die Kennzahlkombination tas-tx90p (Temperatur in Bodennähe und Anteil warmer Tage mit Tagesmaximumtemperatur $T_x > T_{x90}$), Jahr. Dargestellt ist die Periode 2071–2100 für die ReKliEs-Region. Rechts: Wärmeperioden (wsdi): Summe der zusammenhängenden Tage (mindestens 6), an denen die Tagesmaximumtemperatur $T_x > T_{x90}$ ist. T_{x90} ist das 90. Perzentil der Tagesmaximumtemperatur im Referenzzeitraum (1971–2000). Szenario RCP8.5. Die Legende ist dieselbe wie in Abb. 2.2.

Anstieg *prozentual* angegeben wird. Wenn also in der Gegenwart an 36 von 365 Tagen (das ist das 90-Perzentil) diese Schwelle übertroffen wird und in der Zukunft an 108 Tagen, dann sind das in der Gegenwart 10 % und in der Zukunft 30 % aller

Tage. Das heißt, es wird ein Zuwachs um 20 Prozentpunkte errechnet. Die Kennzahl tx90p (Abb. 4.4 links) zeigt, dass im Ensemblemedian (horizontale, gestrichelte Linie) eine Zunahme um 28 % auftritt – von 10 % auf 38 % aller Tage. Auch die Zunahme der Anzahl von Tagen in Hitzeperioden belegt dies mit einer Zunahme um 75 Tage im Ensemblemedian deutlich (wsdi, Abb. 4.4 rechts). Insgesamt zeigt das Ensemble nicht nur bei den mittleren Temperaturänderungssignalen, sondern auch bei der Anzahl der wärmsten Tage und Hitzeperioden eine sehr große Bandbreite, die von den regionalen Modellen bei den jeweiligen GCM-Antrieben aufgespannt wird.

Die Anzahl der Eistage (Tageshöchstwert < 0 °C) und Frosttage (Tagestiefstwert < 0 °C) nimmt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich ab (Abb. 4.5, Eistage und SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 03_fr, ABB. 3.2, Frosttage), aber auch am Ende des Jahrhunderts gibt es noch Frost- und Eistage. In der Referenzperiode simulieren die Modelle im Mittel ca. 94 Frosttage pro Jahr. Im Szenario RCP2.6 nimmt diese Zahl bis Ende des Jahrhunderts im Median um 18 Tage ab (s. Ensemblekarten im SUPPLEMENT RCP2.6 DATEI ZU 03_fd, ABB. 3.3). Im Szenario RCP8.5 halbiert sich die Anzahl der Frosttage: Die Abnahme beträgt im Median 56 Tage (s. Streudiagramm im SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 03_FD, ABB. 3.6). Das Ensemble für das Szenario RCP8.5 zeigt im Median eine Abnahme um 20 Eistage von 1971–2000 bis 2071–2100 (s. Streudiagramm im SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 02_id, ABB. 2.6). Kälteperioden wird es im Szenario RCP8.5 im Ensemble Median am Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr geben (vgl. Ensemblekarten im SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 10.csd, ABB. 10.3).

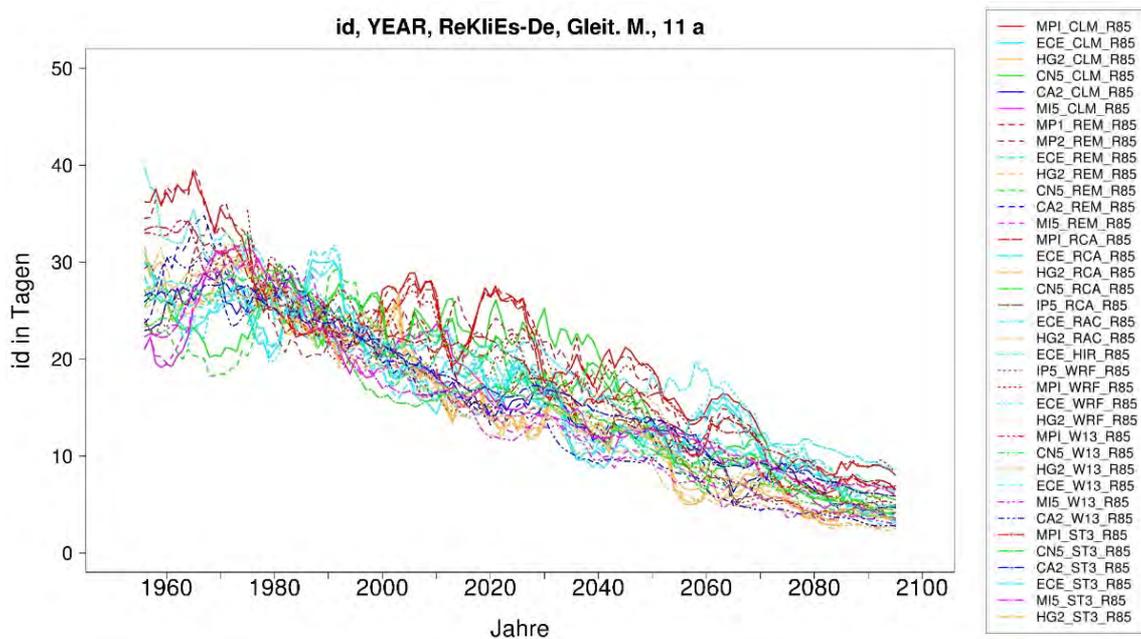


Abbildung 4.5: Zeitliche Verläufe 1971–2100 für die Kennzahl id (Eistage), Projektionen mit dem Szenario RCP8.5.

5.1 Mittlerer Niederschlag

Die mittlere Jahresniederschlagsänderung zwischen 2070–2099 und 1971–2000 gemittelt über das ReKliEs-De Gebiet (Abb. 5.1, oben) zeigt in beiden Szenarien uneinheitliche Signale: einige Modelle simulieren eine Niederschlagszunahme, andere eine –abnahme. Die simulierten Änderungen im Szenario RCP2.6 betragen jedoch nur $\pm 10\%$, bei RCP8.5 sind es teilweise mehr als $\pm 20\%$. Saisonal unterscheiden sich die Niederschlagsänderungen stark.

Im Sommer (Abb. 5.1, Mitte) gibt es in beiden Szenarien ebenfalls simulierte Zu- und Abnahmen. Auch hier sind die Änderungen unter dem Szenario RCP2.6 mit -30% bis $+10\%$ deutlich geringer als unter dem Szenario RCP8.5 mit -60% bis $+40\%$.

Im Winter (Abb. 5.1, unten) simuliert ein Modell unter dem Szenario RCP2.6 eine signifikante Niederschlagsabnahme, die übrigen Modelle simulieren nicht signifikante Änderungen oder Zunahmen um bis zu ca. 15% . Unter dem Szenario RCP8.5 simulieren alle Modelle eine Niederschlagszunahme, die im Extremfall bis zu 40% beträgt.

Im Winter zeigt die räumliche Verteilung der Niederschlagsänderung zwischen 2071–2100 und 1971–2000 individuelle Muster abhängig vom Regionalmodell, jedoch mit unterschiedlichen Intensitäten (vgl. Einzelmodellkarten im SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 14_pr, ABB. 14.48 bis 14.55¹⁾).

Für das gesamte Ensemble nimmt die Bandbreite der Änderung des mittleren Niederschlags sowie der Niederschlagsindizes für den späteren Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum früheren Zeitraum 2021–2050 zu (z.B. Boxplots in den Ensembledarstellungen im SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 14_pr, ABB 14.16 bis 14.18). Dies ist am auffälligsten im Sommer (vgl. Abb. 5.2).

¹⁾In diesem Fall handelt es sich um Darstellungen der **Einzelmodelle**, nicht der Ensembleabbildungen, die im Supplement rcp85/Einzelmodelle/14_ReKliEs_Panels_pr_rcp85.pdf zu finden sind.

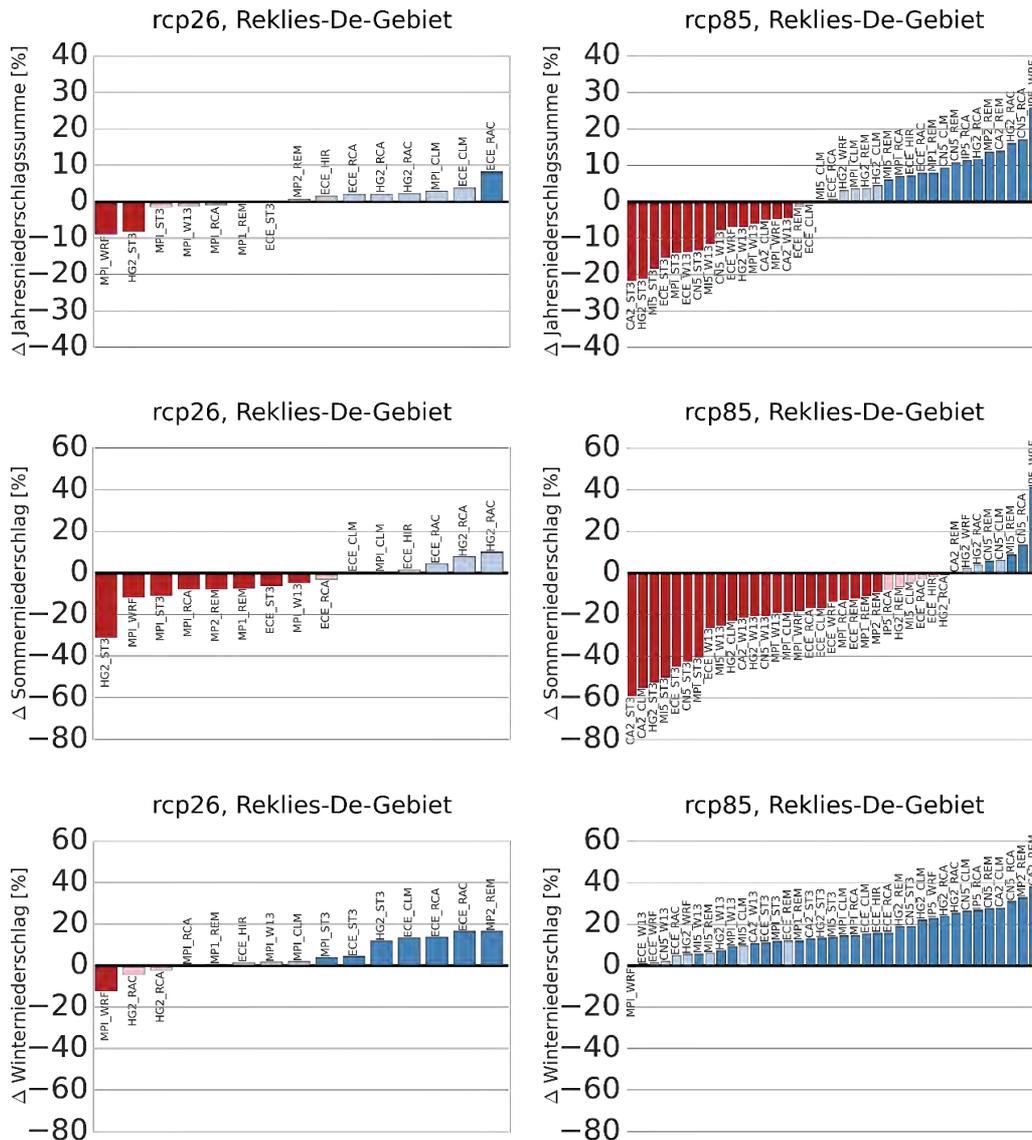


Abbildung 5.1: Änderungssignale des Niederschlages (in %) zwischen den Zeiträumen 2070–2099 und 1971–2000 im Jahresmittel (oben) und in den Jahreszeiten Sommer (JJA, 2. Zeile) und Winter (DJF, 3. Zeile) für das ReKliEs-De Gebiet. Linke Spalte: Szenario RCP2.6; rechte Spalte: Szenario RCP8.5. In hellblau sind Zunahmen, in dunkelblau signifikante Zunahmen, in rosa Abnahmen und in rot signifikante Abnahmen dargestellt. Die Signifikanz wird mit dem Mann-Whitney U-Test ermittelt.

5 Niederschlag

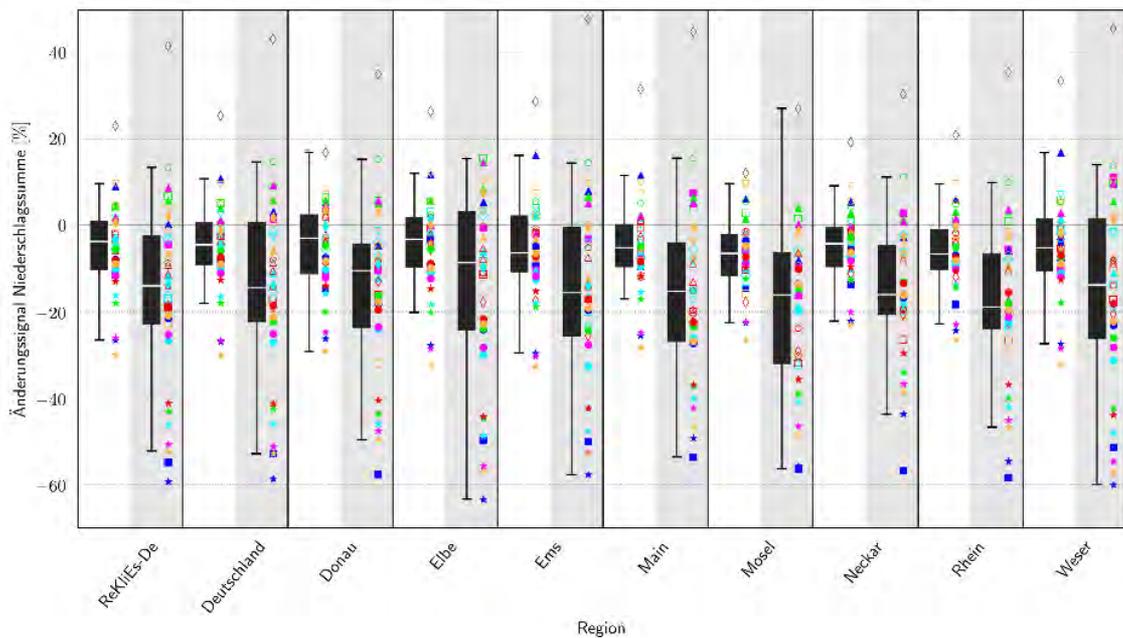


Abbildung 5.2: Boxplot für die Kennzahl pr, Sommer (JJA). Dargestellt sind Paare von Boxplots der Perioden 2021–2050 (weiß hinterlegt) und 2071–2100 (grau hinterlegt) für die ReKliEs-Region, Deutschland sowie 8 Flusseinzugsgebiete. Die Legende für die Symbole rechts neben den Boxplots ist in Abb. 2.2 wiedergegeben.

5.2 Extreme

Für die mittlere Änderung pro Jahr zwischen 2070–2099 und 1971–2000 der Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 1 mm/Tag (Abb. 5.3, obere Reihe) gibt es Abnahmen und Zunahmen. Für die Anzahl der Tage ≥ 10 und 20 mm/Tag gibt es überwiegend Zunahmen, nur einige ESDs zeigen Abnahmen (Abb. 5.3, mittlere und untere Reihe).

Die Änderung der Niederschlagskennzahl „Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 1 mm/Tag“ liegt im Winter in beiden Szenarien zwischen -15 bis $+20$ %. Im Sommer überwiegt deutlich die Anzahl der Simulationen, welche eine Abnahme zeigen. Die Änderungen liegen für RCP2.6 zwischen -30 und $+5$ % und für RCP8.5 zwischen -60 und $+20$ %.

Die Niederschlagskennzahlen „Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 , 20 mm/Tag zeigen im Winter generell Zunahmen, vergleichbar zur Änderung des mittleren Niederschlags. Die mittlere Änderung ist im RCP8.5 deutlich intensiver als in RCP2.6. Die Änderung der Niederschlagskennzahl „Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 mm/Tag“ liegt für RCP2.6 zwischen -5 und $+30$ % und für RCP8.5 zwischen 0 bis 60 %.

Im Sommer ist das Ergebnis ebenfalls nicht einheitlich. Bei den Kennzahlen „Anzahl der Niederschlagstage ≥ 10 und 20 mm/Tag“ gibt es Abnahmen und Zunahmen. Auch hier ist die mittlere Änderung im RCP8.5 deutlich intensiver als in

RCP2.6. Die Änderung der Niederschlagskennzahl „Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 mm/Tag“ liegt für RCP2.6 zwischen -30 und $+20$ % und für RCP8.5 zwischen -60 bis 50% (vgl. SUPPLEMENT RCP2.6 und RCP8.5, ABB. AUS DATEIEN ZU 16_r1mm, 17_r10mm und 18_r20mm).

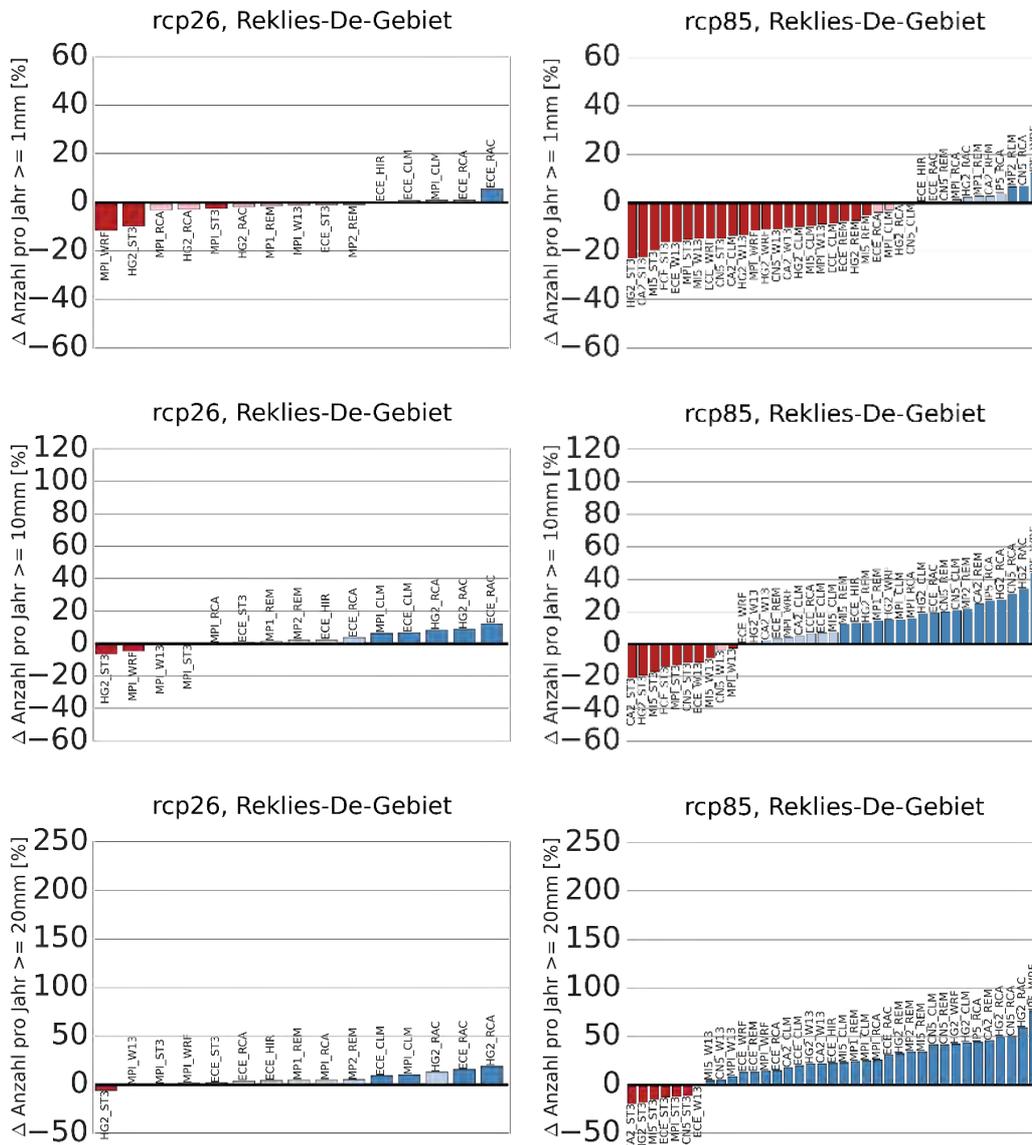


Abbildung 5.3: Mittlere Änderung [%] gemittelt über das ReKliEs-De Gebiet zwischen dem Zeitraum 2070–2099 und 1971–2000 pro Jahr für die Anzahl der Niederschlagstage ≥ 1 mm (oben), ≥ 10 mm (Mitte) und ≥ 20 mm (unten). Linke Spalte: Szenario RCP2.6; rechte Spalte Szenario RCP8.5 (siehe auch Abb. 5.1). In hellblau sind Zunahmen, in dunkelblau signifikante Zunahmen, in rosa Abnahmen und in rot signifikante Abnahmen dargestellt. Die Signifikanz wird mit dem Mann-Whitney U-Test ermittelt.

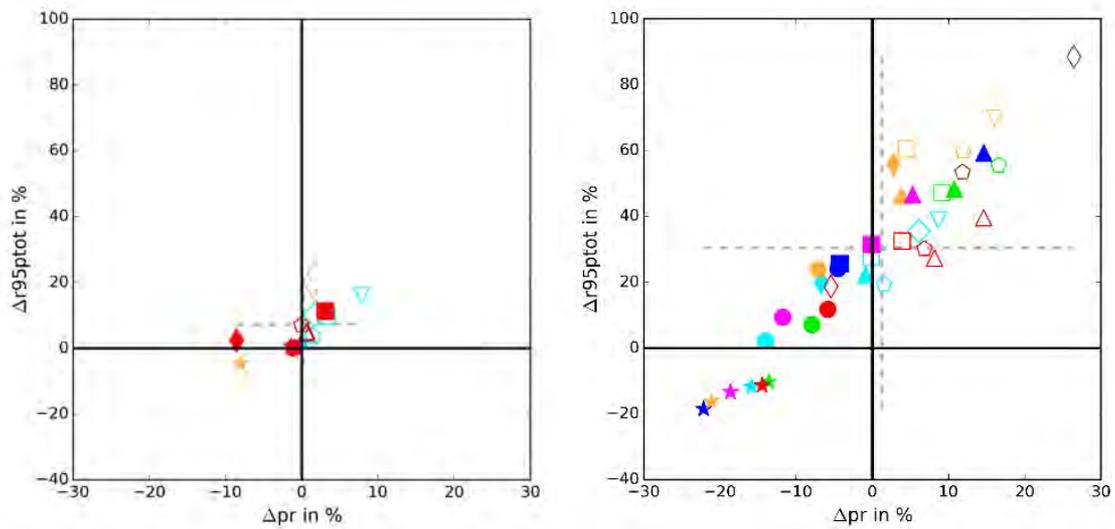


Abbildung 5.4: Links: Streudiagramm für die Kennzahlkombination tas-pr95ptot (Niederschlagsmenge oberhalb des 95-Perzentils), Jahr, Szenario RCP2.6. Dargestellt ist die Periode 2071–2100 für die ReKliEs-Region. Rechts: Analog zur linken Abbildung aber mit dem Antrieb vom Szenario RCP8.5. Die Legende ist dieselbe wie in Abb. 2.2.

Im Vergleich zwischen den Zeiträumen 2071–2100 und 1971–2000 nimmt in allen Simulationen außer bei dem Modell STARS3 die Niederschlagsmenge oberhalb des 95. und 99. Perzentils zu (Abb. 5.4). Die prozentuale Zunahme ist deutlich größer als die Zunahme des mittleren jährlichen Niederschlags. Auch bei Simulationen, die eine mittlere jährliche Niederschlagsabnahme berechnen, nimmt die Niederschlagsmenge oberhalb des 95. und 99. Perzentils zu.

Wind und Strahlung

Die Mehrzahl der im ReKliEs-De Projekt analysierten Kennzahlen beschreiben Temperatur- bzw. Niederschlag. Darüber hinaus erfolgten Untersuchungen des bodennahen Winds (Variablenname in den Modellen: *sfcWind*) und der abwärts gerichteten kurzwelligen Einstrahlung (Variablenname in den Modellen: *rsds*). Letztere wird nur von den Regionalisierungen mit dynamischen Modellen zur Verfügung gestellt. Allerdings kann die Bewölkung (in den statistischen Modellen vorhanden) als eine Umschreibung (Proxy) für die Strahlung angesehen werden – wiewohl es in ReKliEs keine Vergleichsanalysen dieser beiden Größen gab.

6.1 Wind

Die Änderungssignale sind für den bodennahen Wind relativ gering. In den Jahreszeiten Frühjahr, Sommer und Herbst werden dabei leichte Rückgänge um 0,1 m/s für den Zeitraum bis 2021–2050 und um 0,2 m/s für den Zeitraum 2071–2100 verzeichnet (s. Abb. 6.1).

Das verwendete Ensemble der Modelle zeigt für den bodennahen Wind im *Winter* ein anderes Bild. In den meisten untersuchten Regionen ist eine leichte Zunahme um rund 0,1 m/s zum Zeitraum 2021–2050 erkennbar (s. Abb. 6.2). Dieses Änderungssignal ist zumindest bei Betrachtung des Medians (weiße Striche innerhalb der Box) zum Zeitraum 2071–2100 kaum verstärkt. Deutlicher tritt in Erscheinung, dass die Streuung der Projektionen für den Zeithorizont 2071–2100 stark zunimmt.

Es besteht die Tendenz, dass die statistischen Regionalisierungen relativ geringe Änderungssignale bezüglich der Windgeschwindigkeit projizieren (vgl. Abschnitt 9.3).

Die Untersuchung von Projektionen mit dem Klimaschutzszenario RCP2.6 (hier nicht in Abbildungsform wiedergegeben) zeigt, dass für dieses Szenario die Änderungssignale des Winds nahe der Nachweisgrenze sind.

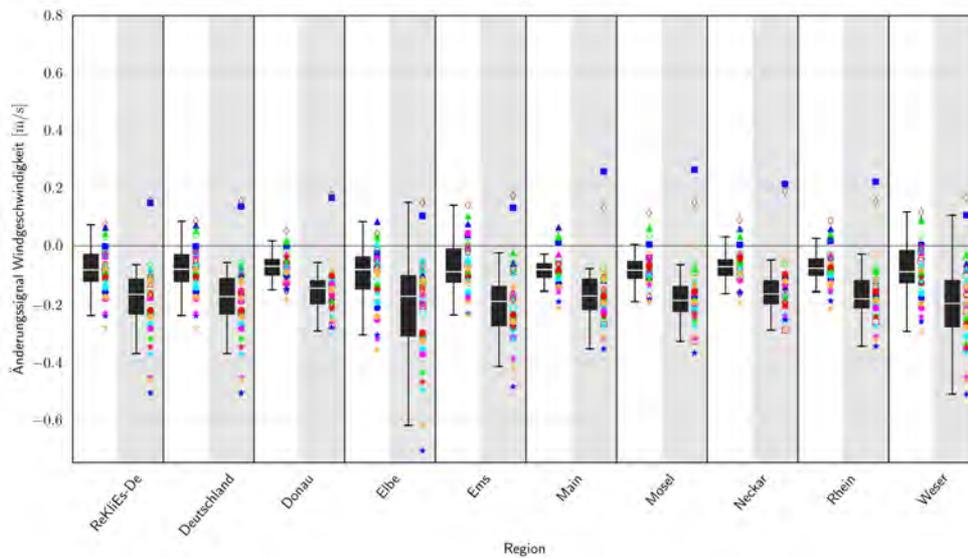


Abbildung 6.1: Boxplot für den bodennahen Wind (sfcWind, Sommer JJA). Dargestellt sind Paare von Boxplots der Perioden 2021–2050 (weiß hinterlegt) und 2071–2100 (grau hinterlegt) für die ReKliEs-Region, Deutschland sowie 8 Flusseinzugsgebiete. Die Legende für die Symbole rechts neben den Boxplots ist dieselbe wie in Abb. 2.2.

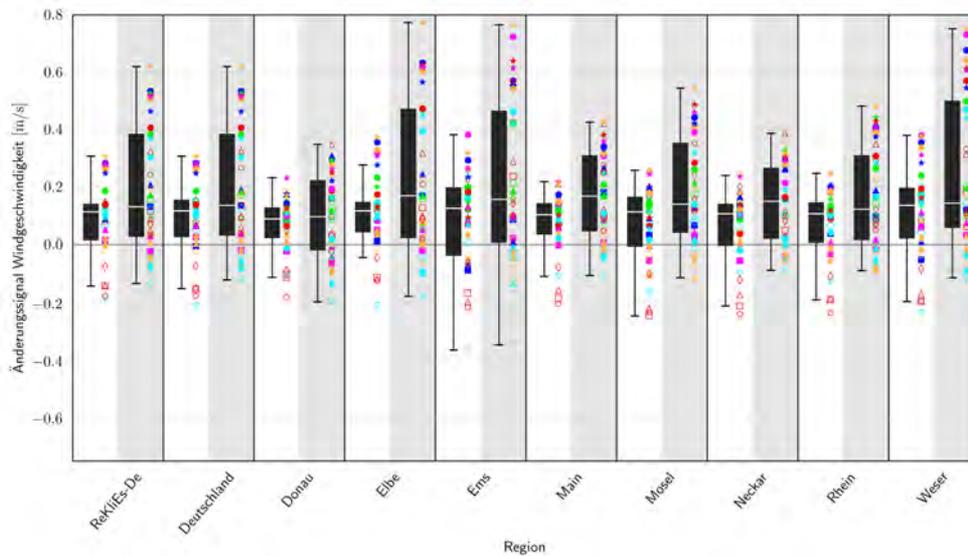


Abbildung 6.2: Wie Abb. 6.1, jedoch für den Winter (DJF).

6.2 Strahlung

Bei der Strahlung ist das Bild von relativ großen Unterschieden zwischen den Projektionen der einzelnen Modelle sowie von geringen Änderungssignalen geprägt. Die Streudiagramme in Abb. 6.3 zeigen auf, dass das verwendete Modellensemble in jährlicher Betrachtung mit wenigen Ausnahmen einen leichten Strahlungsrückgang bis 10 W/m^2 ausweist. Auffällig ist dabei die Sonderstellung aller Regionalisierungen mit dem Modell WRF (Rauten in Abb. 6.3), die einen

besonders starken Strahlungsrückgang zwischen 15 und 30 W/m² projizieren. In Verbindung mit dem Temperatursignal (linker Teil von Abb. 6.3) zeigt sich eine Proportionalität: Die Projektionen liegen genähert auf einer ansteigenden Geraden; Modelle, mit denen ein geringes Temperatursignal ermittelt wird verfügen über einen relativ starken Rückgang der Strahlung, während Modelle, deren Temperatursignal stark ist, nur wenig oder keine Abnahme der Strahlung projizieren. Die Zusammenschau mit den Niederschlagssignalen (rechter Teil von Abb. 6.3) weist für die Änderungen der Strahlung (ohne Einbeziehung der Resultate des Modells WRF) hingegen keine deutliche linienartige Orientierung der Symbole auf.

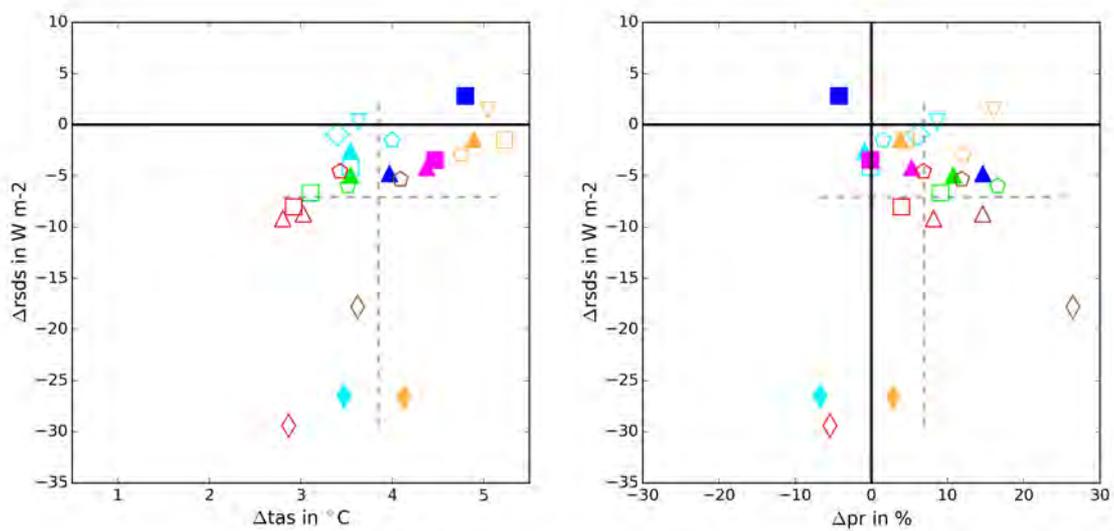


Abbildung 6.3: Links: Streudiagramm für die Kennzahlkombination tas-rsds (abwärts gerichtete kurzwellige Strahlung), Jahr, Szenario RCP8.5. Dargestellt ist die Periode 2071–2100 für die ReKliEs-Region. Rechts: Analog zur linken Abbildung aber für die Kennzahlkombination pr-rsds. Die Legende ist dieselbe wie in Abb. 2.2.

Ähnlich wie beim Wind zeigen auch bei der Strahlung Untersuchungen mit dem Klimaschutz-Szenario (RCP2.6), dass in den damit durchgeführten Projektionen kaum nachweisbare Signale auftreten.



Vergleich zwischen den Szenarien SRES A1B und RCP8.5

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse aus dem Projekt ReKliEs-De in den Kontext früherer Analysen zum Klimawandel in Deutschland und Mitteleuropa. Damit lassen sich bereits durchgeführte Untersuchungen daraufhin überprüfen, inwieweit durch die nun neu hinzugekommenen Simulationen Abschätzungen oder Bewertungen des Klimawandels und seiner Folgen überarbeitet werden müssen.

7.1 Vergleich zwischen Äpfeln und Birnen

Zu diesem Zweck vergleichen wir ausgewählte Ergebnisse aus ReKliEs-De unter Verwendung des Weiter-wie-bisher-Szenarios RCP8.5 mit Simulationsergebnissen verschiedener globaler Modelle unter dem bisher am häufigsten verwendeten Szenario SRES A1B. Dieser Vergleich hinkt aus mehreren Gründen:

- a) Die Szenarien SRES A1B und RCP8.5 haben nicht nur ein unterschiedliches Niveau der Treibhauskonzentrationen, sie sind auch unterschiedlich berechnet: für alle SRES Szenarien wurden die Treibhausgas-Emissionen vorgegeben und daraus mit Kohlenstoff-Kreislauf-Modellen die entsprechenden Konzentrationen berechnet. Da verschiedene Kohlenstoff-Kreislauf-Modelle verwendet wurden, resultieren daraus bereits unterschiedliche Konzentrationen in den verschiedenen Modellen. Für die RCP Szenarien wurde die Treibhausgas-Konzentration vorgegeben (die für diese Konzentration erlaubten Emissionen werden dann quasi rückwärts berechnet), vgl. Abb. 7.1.
- b) Zwischen den Simulationen mit dem Szenario SRES A1B und mit dem Szenario RCP8.5 liegen mehrere Jahre. In diesen Jahren wurden die Klimamodelle weiter verbessert. Für einige Modelle ergeben sich mit der aktuellen Modellversion nur geringe Ergebnisunterschiede im Vergleich zu

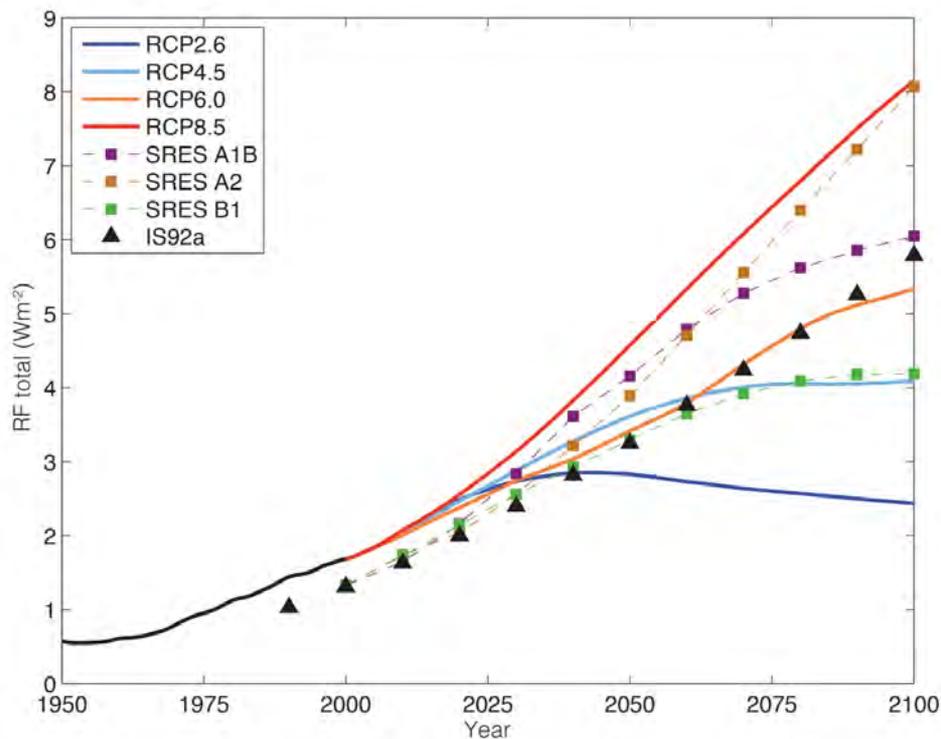


Abbildung 7.1: Strahlungsantrieb (engl.: Radiative Forcing, RF) in W/m^2 für die SRES-Szenarien (gestrichelte Linien mit Symbolen) und die RCP-Szenarien (durchgezogene Linien). Zusätzlich ist das veraltete Szenario IS92a mit schwarzen Dreiecken dargestellt. Quelle: IPCC, 2013, AR5-WGI, Abb.1-15.

Ergebnissen mit der vorigen Modellversion, in anderen Modellen ist der Unterschied zwischen den Modellversionen erheblich. Insbesondere das vom Max-Planck-Institut in Hamburg verwendete Modelle ECHAM (jetzt MPI-ESM) zeigt in der aktuellen Modellversion MPI-ESM-LR deutlich schwächere Klimaänderungssignale in Mitteleuropa als die vorherige Modellversion ECHAM5.

- c) Einige Modelle sind nicht in beiden Ensembles enthalten, z.B. gibt es das Modell EC-EARTH erst seit wenigen Jahren, es war in den SRES A1B Simulationen noch nicht enthalten.
- d) Das SRES A1B Ensemble enthält zwar immerhin 16 Simulationen (im Vergleich zu 37 Simulationen mit RCP8.5), von den 16 Simulationen benutzen jedoch 6 Simulationen das Modell ECHAM5 und 5 Simulationen das Modell HadCM3. Das Ensemble ist daher stark durch diese beiden Modelle dominiert.

Trotzdem stellen wir hier einige Vergleiche an, um einen Eindruck davon zu geben, wie sich die Bandbreiten mit dem neuen Szenario RCP8.5 im Vergleich zu bisherigen Arbeiten verschieben.

Für die Auswertungen des Szenarios SRES A1B wurden folgende Modellsimulationen (GCM-RCM) verwendet:

ARPEGE-RM5,
ARPEGE-HIRHAM5,
BCM-HIRHAM5,
BCM-RCA3,
ECHAM5-HIRHAM,
ECHAM5-RegCM3,
ECHAM5-RACMO2,
ECHAM5-REMO,
ECHAM5-RCA3,
ECHAM5-WETTREG2013,
HadCM3Q3-RCA3,
HadCM3Q0-HadRM3Q0,
HadCM3Q16-HadRM3Q16,
HadCM3Q3-HadRM3Q3,
HadCM3Q0-CLM und
HadCM3Q16-RCA3.

7.2 Vergleich der Temperaturänderung zwischen SRES A1B und RCP8.5

Abb. 7.2 zeigt als farbige Linien die Änderung der Jahresmitteltemperatur, simuliert mit dem Szenario RCP8.5 für die in ReKliEs-De ausgewerteten Modellsimulationen. Der graue Bereich umfasst den Bereich, in dem die entsprechenden Linien der Simulationen für das Szenario SRES A1B liegen. Es zeigt sich, dass die Simulationen mit dem Szenario RCP8.5 einen ähnlichen Bereich abdecken wie die Simulationen mit dem Szenario SRES A1B. Lediglich der untere Rand der Simulationen mit dem Szenario SRES A1B wird von den Simulationen mit dem Szenario RCP8.5 nicht abgedeckt.

In Abb. 7.3 sind die Temperaturänderungen für Sommer (Juni, Juli und August, oben links) und Winter (Dezember, Januar und Februar, oben rechts) dargestellt. In beiden Jahreszeiten liegen einige Simulationen mit dem Szenario RCP8.5 oberhalb des grauen Bereichs, der die Simulationsergebnisse mit dem Szenario SRES A1B umfasst. Gleichzeitig gibt es am unteren Ende der Verteilung Simulationen mit SRES A1B, die eine geringere Erwärmung zeigen als die Simulationen mit RCP8.5.

Der Bereich, der für die Änderung der Anzahl der Sommertage (Abb. 7.3, unten links) von den SRES A1B-Simulationen abgedeckt wird, ist schmaler als der Bereich, der durch die RCP8.5-Simulationen abgedeckt wird. Mit dem Szenario RCP8.5 werden von einigen regionalen Modellen deutlich größere Steigerungen der Anzahl von Sommertagen simuliert als in den Simulationen mit Szenario SRES A1B. Diese besonders hohen Werte werden überwiegend von den statistischen Modellen STARS3 und WETTREG13 simuliert (siehe dazu auch Kapitel 9), aber

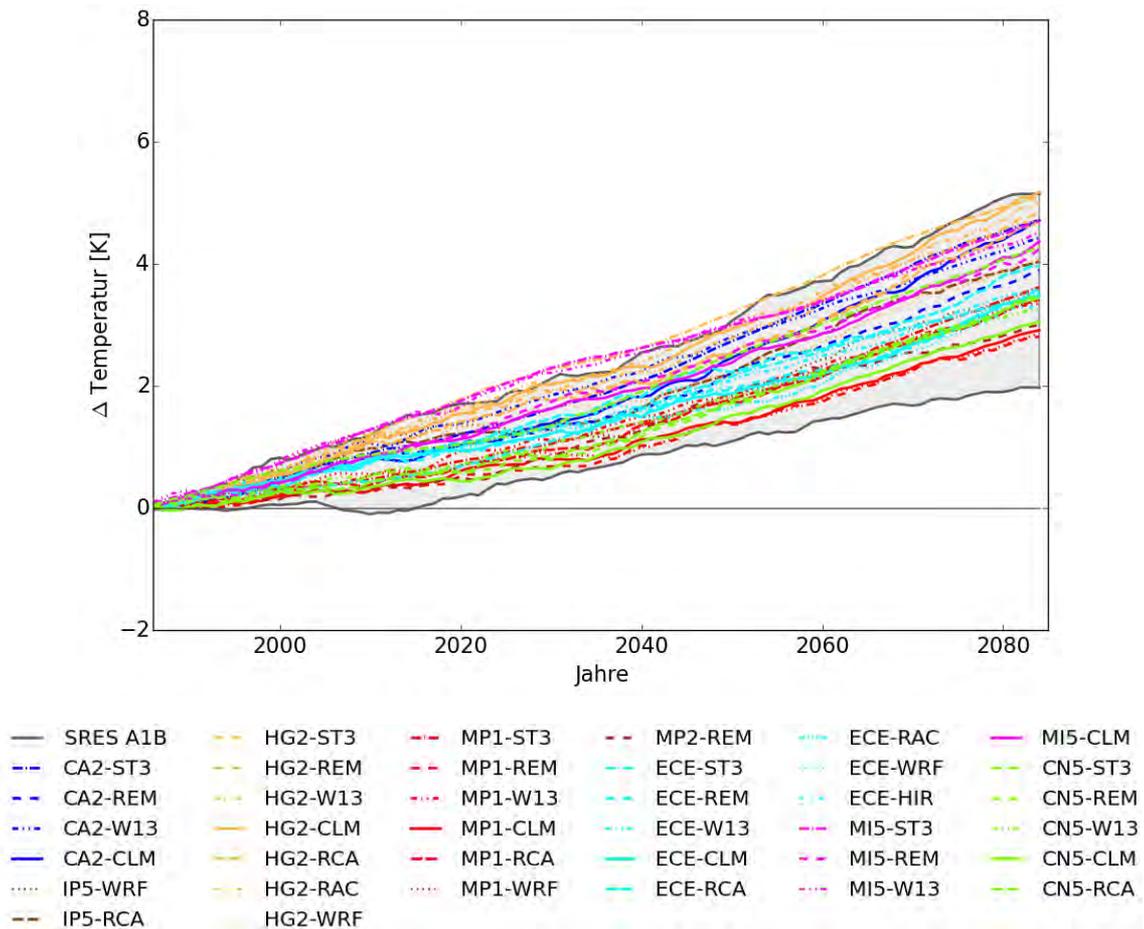


Abbildung 7.2: Zeitlicher Verlauf der mittleren Änderung der Jahresmitteltemperatur [°C] für das ReKliEs-De-Gebiet, 30-Jahre gleitendes Mittel (1986–2085) minus (1971–2000), für die in ReKliEs-De ausgewerteten RCP8.5-Simulationen (farbige Linien) und die SRES A1-Simulationen (grauer Bereich).

auch einige Simulationen mit dem dynamischen Modell CLM liegen oberhalb des Bereiches der SRES A1B-Simulationen.

Für die tropischen Nächte (Abb. 7.3, unten rechts) stellt sich die Situation etwas anders dar. Auch mit dem Szenario SRES A1B wurden in einigen Klimaprojektionen erhebliche Zunahmen der Anzahl tropischer Nächte simuliert. Nur zwei Simulationen (beide mit dem dynamischen Regionalmodell CLM) mit dem Szenario RCP8.5 gehen über den durch die SRES A1B-Simulationen abgedeckten Bereich hinaus.

Die Anzahl der Frosttage geht in beiden Szenarien in allen Simulationen deutlich zurück (Abb. 7.4). Während in einigen Simulationen mit dem Szenario SRES A1B die Abnahme der Frosttage mit ca. –30 Tagen noch relativ moderat ausfiel, zeigen alle RCP8.5-Simulationen Abnahmen der Frosttage um mindestens –40 Tage.

7 Vergleich zwischen den Szenarien SRES A1B und RCP8.5

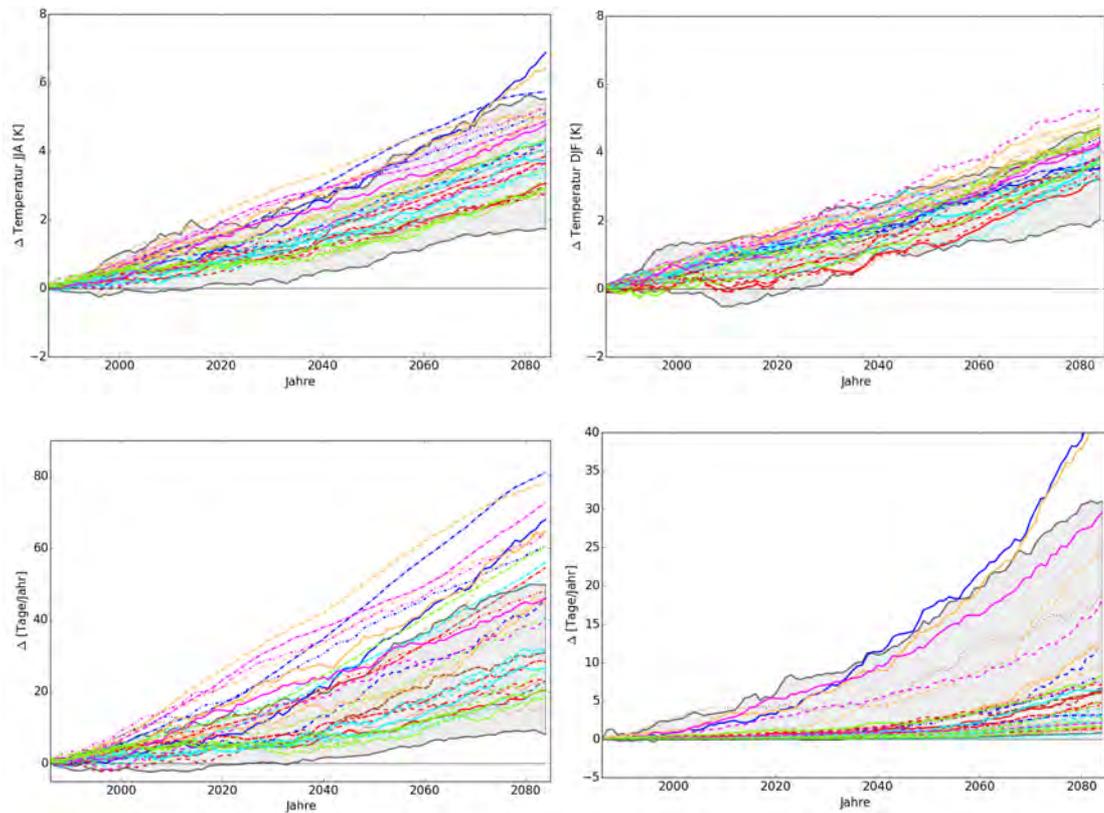


Abbildung 7.3: Zeitlicher Verlauf der mittleren Änderung der Sommertemperatur (links oben) und der Wintertemperatur (rechts oben), der Sommertage (Tageshöchsttemperatur > 25 °C, links unten) und der tropischen Nächte (Tagestiefsttemperatur > 20 °C, rechts unten), für das ReKliEs-De-Gebiet, 30-Jahre gleitendes Mittel (1986–2085 minus 1971–2000), für die in ReKliEs-De ausgewerteten RCP8.5-Simulationen (farbige Linien) und die SRES A1B-Simulationen (grauer Bereich). Die Legende findet sich in Abb. 7.2.

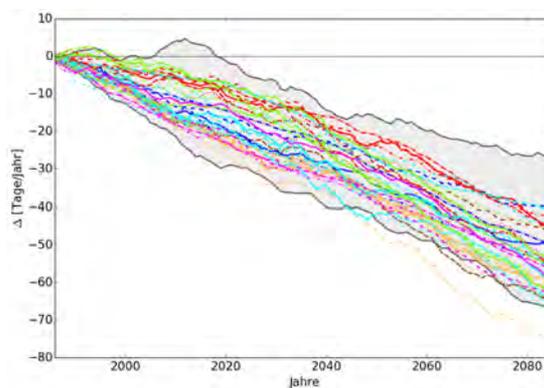


Abbildung 7.4: Zeitlicher Verlauf der Änderung der Anzahl der Frosttage (Tagestiefsttemperatur < 0 °C), 30-jähriges gleitendes Mittel (1986–2085 minus 1971–2000), für die in ReKliEs-De ausgewerteten RCP8.5-Simulationen (farbige Linien) und die SRES A1B-Simulationen (grauer Bereich). Die Legende findet sich in Abb. 7.2.

Da die Modelle (in der ReKliEs-De Auswertung) für den Referenzzeitraum 1971–2000 zwischen 80 und 120 Frosttage simulieren (vgl. SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 03_fd), dort sind die absoluten Zahlen der simulierten Frosttage seit 1961 abgebildet), liegt der Rückgang der Frosttage im RCP8.5 in der Größenordnung von mindestens einem Drittel bis zwei Drittel der heutigen Frosttage. Der untere Rand, d.h. die stärksten simulierten Abnahmen der Frosttage sind jedoch in den beiden Ensembles ähnlich.

7.3 Vergleich der Niederschlagsänderung zwischen SRES A1B und RCP8.5

Die projizierten Niederschlagsänderungen im Sommer (Abb. 7.5, links) und Winter (Abb. 7.5, rechts) zeigen unterschiedliche Signale.

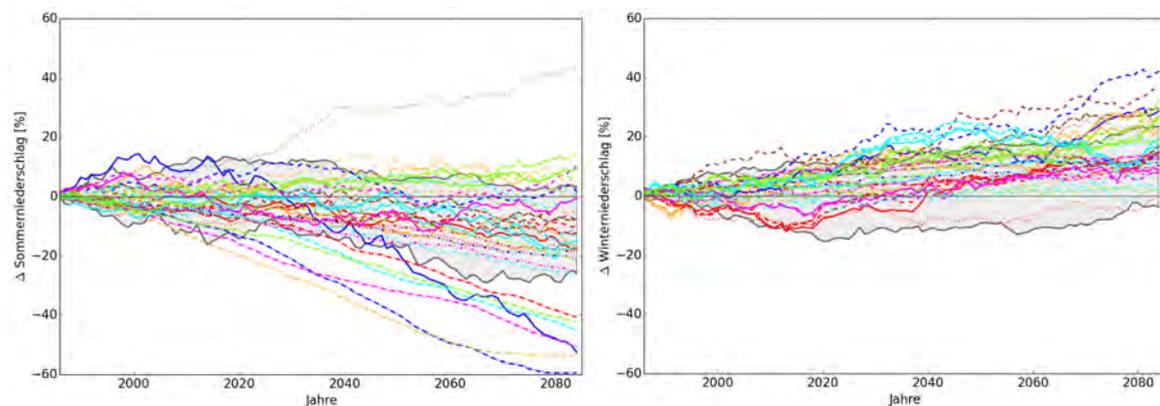


Abbildung 7.5: Zeitlicher Verlauf der mittleren Änderung [%] für das ReKliEs-De Gebiet des Niederschlags im Sommer (links) und Winter (rechts), 30-Jahre gleitendes Mittel (1986–2085 minus 1971–2000), für die in ReKliEs-De ausgewerteten RCP8.5-Simulationen (farbige Linien) und die SRES A1B-Simulationen (grauer Bereich). Die Legende findet sich in Abb. 7.2.

Im Sommer ist die simulierte Bandbreite der Niederschlagsänderung mit dem Szenario RCP8.5 deutlich größer als mit dem Szenario SRES A1B. Mit beiden Szenarien zeigen die meisten Klimaprojektionen zwar eine Abnahme des Sommerniederschlags, mit dem Szenario RCP8.5 gibt es aber auch einige Projektionen, die eine Zunahme des Sommerniederschlags simulieren (die Klimaprojektion, die eine Zunahme von 40 % simuliert, ist vermutlich physikalisch nicht plausibel). Einige Klimaprojektionen zeigen einen dramatischen Niederschlagsrückgang im Sommer von bis zu –60 %.

Auch beim Winterniederschlag zeigen die Klimaprojektionen mit dem Szenario RCP8.5 eine größere Bandbreite möglicher Änderungen als mit dem Szenario SRES A1B. Im Winter wird die Bandbreite jedoch nur in eine Richtung erweitert: Der Niederschlag könnte im Extremfall sogar um bis zu 40 % zunehmen.

7 Vergleich zwischen den Szenarien SRES A1B und RCP8.5

Abb. 7.6 zeigt die Änderung der Anzahl von Starkniederschlagstagen mit mehr als 20 mm Niederschlag (r20mm) im Sommer (links) und Winter (rechts). Auch hier zeigt sich, dass die Bandbreite der simulierten Änderungen mit dem Szenario RCP8.5 größer ist als mit dem Szenario SRES A1B. Für den Referenzzeitraum 1971–2000 zeigen die regionalen Simulationen ca. 5 Tage/Jahr Starkregentage (r20mm). Im Sommer simuliert die Hälfte der Klimaprojektionen mit dem Szenario RCP8.5 eine Zunahme von Starkregentagen (r20mm), die andere Hälfte simuliert eine Abnahme (vgl. SUPPLEMENT RCP8.5 DATEIEN ZU 18_r20mm). Im Winter simulieren alle Modelle eine Zunahme dieser Tage (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 18_r20mm).

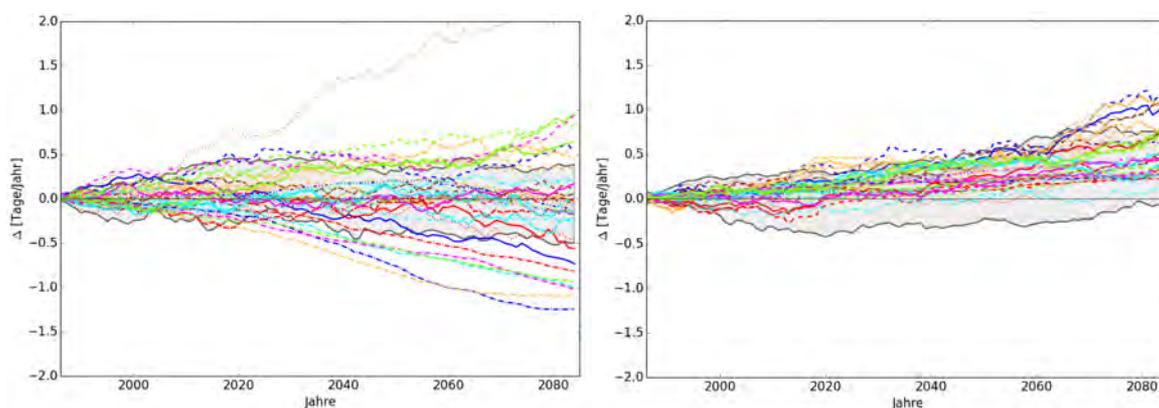


Abbildung 7.6: Zeitlicher Verlauf der mittleren Änderung für das ReKliEs-De Gebiet der Anzahl der nassen Tage ≥ 20 mm im Sommer (links) und im Winter (rechts), 30-Jahre gleitendes Mittel (1986–2085) minus (1971–2000), für die in ReKliEs-De ausgewerteten RCP8.5-Simulationen (farbige Linien) und die SRES A1B-Simulationen (grauer Bereich). Die Legende findet sich in Abb. 7.2.

In beiden Jahreszeiten ändert sich damit die prinzipielle Aussage gegenüber Projektionen mit dem Szenario SRES A1B nicht: Im Sommer ist die zukünftige Tendenz uneindeutig, im Winter nehmen Starkregentage zu. Jedoch liefern die Klimaprojektionen mit dem Szenario RCP8.5 größere Bandbreiten, d.h. auch eine größere mögliche Zunahme von Starkregentagen als die Klimaprojektionen mit dem Szenario SRES A1B.

Im elektronischen Supplement (RCP8.5 DATEI ZU 18_r20mm) sind zusätzlich die Änderungen der Starkregentage für das ganze Jahr (also nicht aufgeschlüsselt nach Jahreszeiten) in absoluten Zahlen dargestellt. Es gibt aber keine entsprechende Auswertung für die SRES A1B-Simulationen, sodass hierfür kein Vergleich erfolgen kann.

Auswertungen für moderate Starkregentage mit Niederschlag von 10 mm oder mehr (r10mm) zeigen prinzipiell vergleichbare Ergebnisse.



Einfluss des GCMs auf die RCM/ESD-Ergebnisse

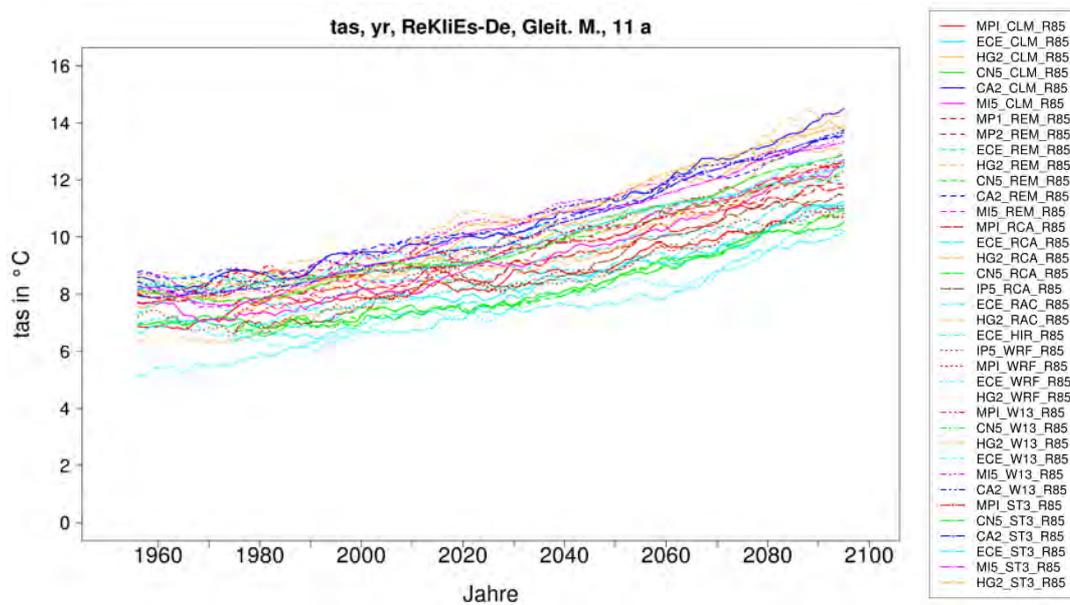
Der Verlauf der mittleren bodennahen Lufttemperatur (tas, Abb. 8.1a) zeigt weitestgehend eine Clusterung nach den antreibenden GCMs. Alle HadGEM2 (gold) und CanESM2 (dunkelblau) angetriebenen Simulationen liegen im oberen (warmen), MPI-ESM-LR (rot) angetriebene Simulationen im mittleren, EC-EARTH angetriebene (türkis) im unteren Bereich der geglätteten Zeitreihen. Die mit CNRM-CM5 (grün) angetriebenen Simulationen zeigen aber noch einen anderen Aspekt deutlich: Während alle dynamischen Modelle mit CNRM-CM5 Antrieb sehr nah beieinander im unteren Teil des Schlauches liegen, befinden sich die beiden ESDs deutlich getrennt davon weiter oben, am Ende des 21. Jahrhunderts bei ca. 2 °C höheren Temperaturen. Ähnliches ist bei EC-EARTH (türkis) Antrieb zu sehen. Die dynamischen Modelle streuen etwas weiter, befinden sich aber alle in der unteren Hälfte. Die beiden ESDs zeigen ca. 1–3 °C höhere Temperaturen.

Die Klimänderungssignale (d.h. die jeweilige Änderung relativ zum simulierten Referenzzeitraum 1971–2000) zeigen die gleiche Clusterung nach antreibendem GCM (Abb. 8.1b). Die Regionalisierungen von HadGEM2-ES, MIROC5 und CanESM2 weisen hohe Klimaänderungssignale auf. Die mit MPI-ESM-LR angetriebenen Projektionen zeigen die schwächsten Klimaänderungssignale. Dieses Verhalten ist in allen Jahreszeiten ähnlich zu beobachten (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 14_tas, Boxplots).

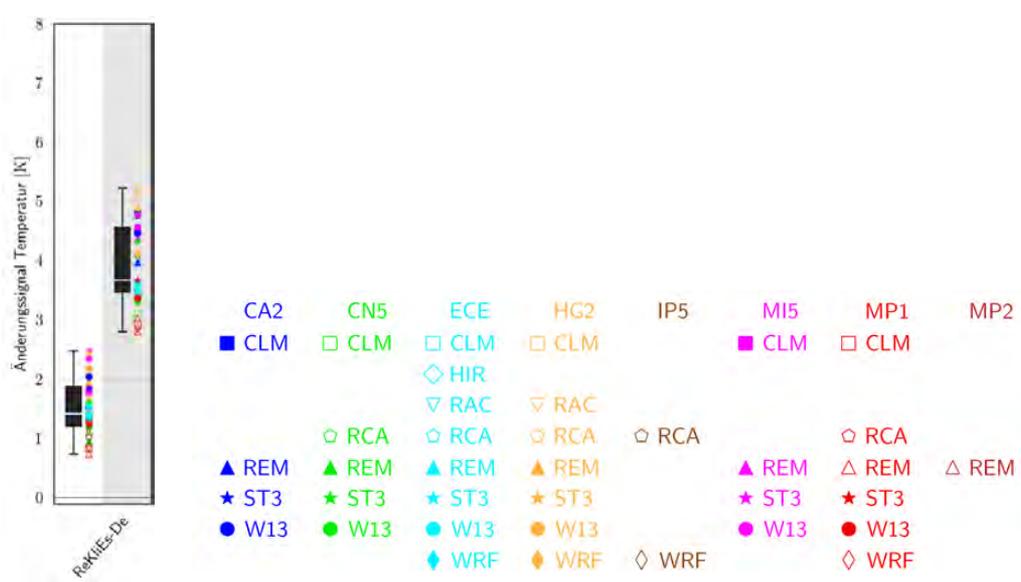
Analog zum Verlauf der mittleren bodennahen Lufttemperatur ist der Verlauf des Anteils warmer (tx90p) und kalter (tx10p) Tage durch den GCM-Antrieb dominiert (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 08_tx10p und 09_tx90p, Zeitreihe und Boxplots). Aber auch die Regionalisierungsmethode kann hier einen Einfluss haben. Z.B. zeigen die STARS3-Projektionen eine große Zunahme (30–45 %) der warmen Tage und sie liegen bis zu 10 % über der nächsten Regionalisierung mit dem jeweils gleichen Antrieb.

Die Andauer von Kälteperioden (csdi) fällt in allen Projektionen unabhängig vom Ausgangswert auf Werte kleiner 2 Tage (Abb. 8.2a). Dadurch ist das Klimaänderungssignal (Abb. 8.2b) stark an die Werte in der Referenzperiode

8 Einfluss des GCMs auf die RCM/ESD-Ergebnisse



(a)



(b)

Abbildung 8.1: Die mittlere bodennahe Lufttemperatur (tas); a) Die mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel geglättete Zeitreihe und Legende für die Linienattribute; b) Boxplot der Klimaänderungssignale für die Zeiträume 2021–2050 (weiß hinterlegt) und 2071–2100 (grau hinterlegt) gegen den Referenzzeitraum 1971–2000. Daneben die Legende mit den Symbolen für die Modelle.

gekoppelt. Diese werden stark vom Regionalmodell beeinflusst. Die ESDs WETT-REG13 und vor allem STARS3 produzieren geringere absolute Werte für csdi und daher die geringsten Abnahmen. Die höchsten Werte und Abnahmen zeigen die REMO-Simulationen. Die dekadische Variabilität der RCMs wird durch das antreibende GCM beeinflusst. So zeigt Abb. 8.2a z.B., wie die Andauer von Kälteperioden für die meisten dynamischen Modelle mit MPI-ESM-

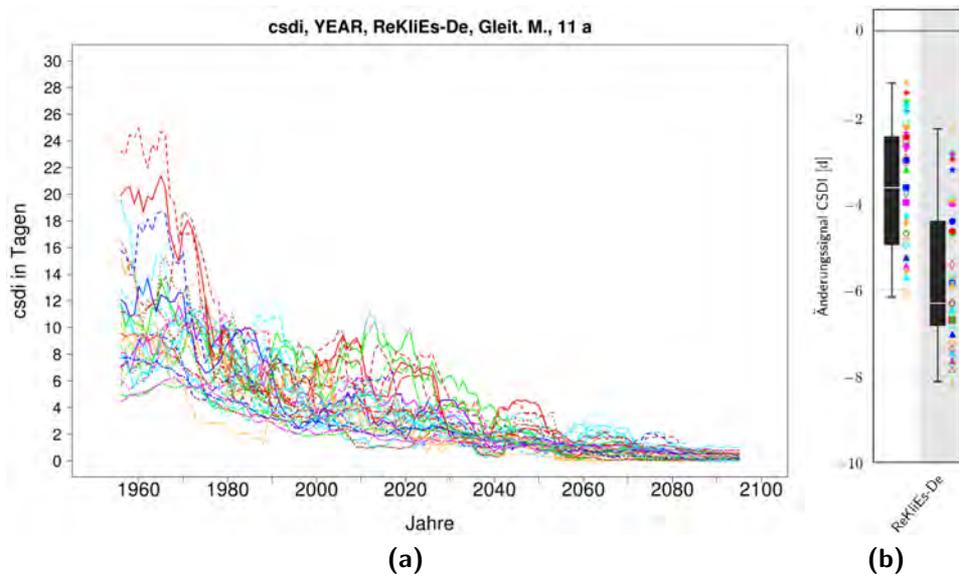


Abbildung 8.2: Andauer von Kälteperioden (csdi); a) Die mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel geglättete Zeitreihe; b) Boxplot der Klimaänderungssignale für die Zeiträume 2021–2050 (weiß hinterlegt) und 2071–2100 (grau hinterlegt) gegen den Referenzzeitraum 1971–2000. Legenden siehe Abb. 8.1.

LR Antrieb (rot) am Ende des 20. Jahrhunderts zunächst ansteigt, dann in den 2010er Jahren ein Minimum erreicht und danach wieder steigt. WETTREG13 folgt diesen Schwankungen etwas weniger, STARS3 gar nicht. Die Andauer von Wärmeperioden (wsdi) ist dagegen in Absolutwerten und Klimaänderungssignal klar nach GCM-Antrieb geclustert (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 10_csdi, Zeitreihe und Boxplot), mit hohen Zunahmen (ca. 70–130 Tage) für die CanESM2 und HadGEM2 angetriebenen und geringen Zunahmen (ca. 30–75 Tage) für MPI-ESM-LR angetriebene Simulationen. Dieses Verhalten ist analog zur Zunahme der Mitteltemperatur. Allerdings liegen die STARS3-Projektionen wieder ca. 10–30 Tage über der nächsten Regionalisierung mit dem jeweils gleichen Antrieb.

Die verschiedenen Kennzahlen für Schwellwertüberschreitungen – die Anzahl von Frosttagen (fd), Eistagen (id), tropischen Nächten (tr), Sommertagen (su) und Hitzetagen (su30) – zeigen meist einen dominierenden Einfluss des antreibenden GCMs (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 02_id, 03_fd, 04_su und 05_SU30, Zeitreihen und Boxplots). Hier treten aber auch Einflüsse der Regionalisierung auf, insbesondere für die beiden ESDs. Die ESDs zeigen z.B. meist die geringste Abnahme an Frosttagen, für Sommertage und Hitzetage liefert STARS3 meist die größte Zunahme. Während die ESDs, vor allem STARS3, kaum eine Zunahme der tropische Nächte (tr) produzieren (<5 Tage), liefern einige Kombinationen (CCLM und REMO mit GCMs, die eine starke Temperaturzunahme liefern: HadGEM2-ES, MIROC5 und CanESM2) sehr große Werte (15 bis 20 Tage).

Im Gegensatz zu den anderen temperaturbasierenden Kennzahlen zeigt die Spanne der Tagestemperatur (dtr) ein stark Regionalmodell-abhängiges Verhalten (Abb. 8.3), mit jahreszeitlichen Unterschieden (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 07_dtr, Zeitreihen). WETTREG13 und vor allem STARS3 liefern eine starke

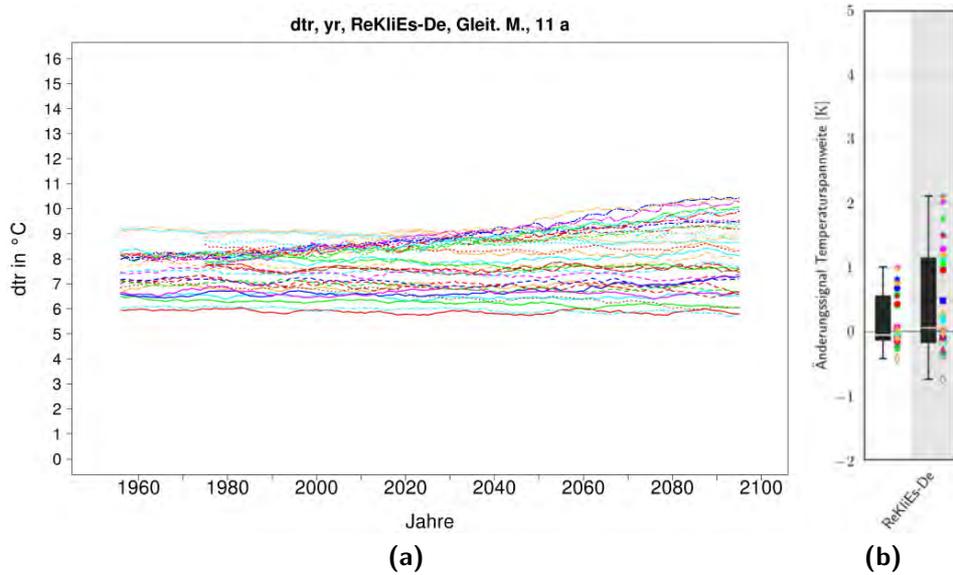


Abbildung 8.3: Spanne der Tagestemperatur (dtr); a) Die mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel geglättete Zeitreihe; b) Boxplot der Klimaänderungssignale für die Zeiträume 2021–2050 (weiß hinterlegt) und 2071–2100 (grau hinterlegt) gegen den Referenzzeitraum 1971–2000. Legenden siehe Abb. 8.1.

Zunahme des Jahresmittelwertes. Alle RCMs sind nach Regionalmodell geclustert und liefern geringere Zu- oder Abnahmen. RACMO liefert unabhängig vom GCM zu Beginn der Simulationen ein um 50–70 % höheres dtr vor allem im Winter, im weiteren Verlauf dann eine Abnahme. CLM zeigt sehr geringe Werte.

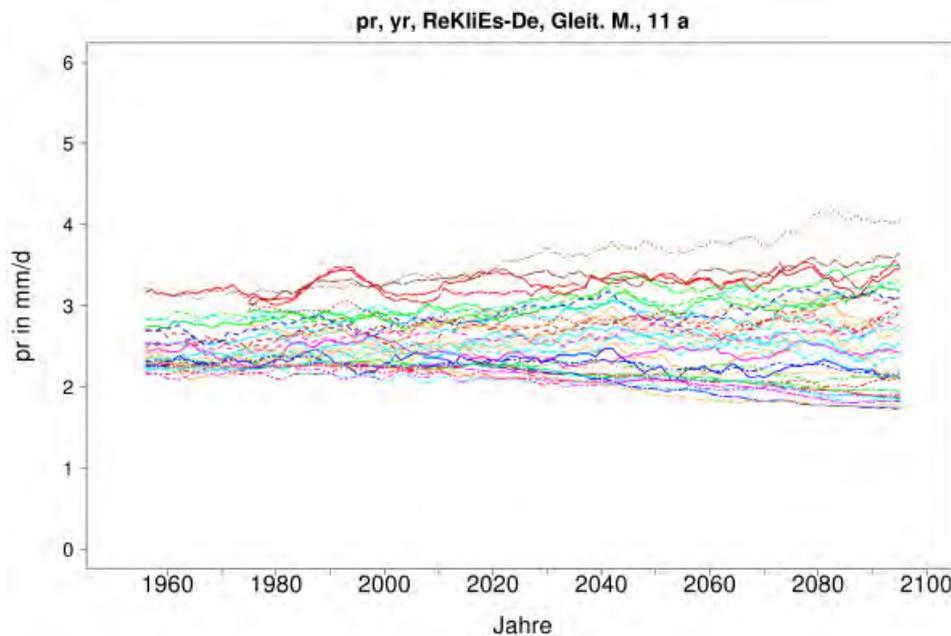


Abbildung 8.4: Die mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel geglättete Zeitreihe der mittleren Niederschlagshöhe (pr). Legenden siehe Abb.8.1a.

Die mittlere Niederschlagshöhe unterliegt starken Einflüssen des Regionalmodells. Abb. 8.4 zeigt, dass alle ESD-Projektionen die geringsten Niederschläge liefern, unabhängig vom GCM-Antrieb. Für die dynamischen Modelle ist aber ein Einfluss des antreibenden GCMs zu sehen, so liegen z.B. die 3 CNRM5-getriebenen RCMs (grün) oder die 5 EC-EARTH-getriebenen RCMs (türkis) beieinander. Abb. 8.5 zeigt, dass alle ESD-Projektionen Abnahmen der mittleren Niederschlagshöhe simulieren, wobei sich jeweils alle STARS3- und WETTREG13-Projektionen nah zusammen befinden. Die dynamischen Modelle liefern vereinzelt leichte Abnahmen aber überwiegend Zunahmen. Der Vergleich der CCLM- und REMO-Projektionen in Abb. 8.5a zeigt, dass sich beide über einen größeren Bereich erstrecken. Gelegentlich liegen CCLM und REMO bei gleichem Antrieb nah beieinander (EC-EARTH oder CNRM5). Alle EC-EARTH angetriebenen Simulationen liegen z.B. im Bereich geringer Abnahme oder geringer bis mittlerer Zunahme. Für CanESM2 Antrieb unterscheiden sich CCLM (geringe Abnahme, kleinstes Signal mit CCLM) und REMO (Zunahme, größtes Signal mit REMO) deutlich. Hier ist der Einfluss des antreibenden GCMs geringer. Das Verhalten zeigt insgesamt eine Mischung aus einer GCM-Clustering und Regionalmodell-Einflüssen, wobei vor allem das abweichende Verhalten der ESDs bedeutend ist.

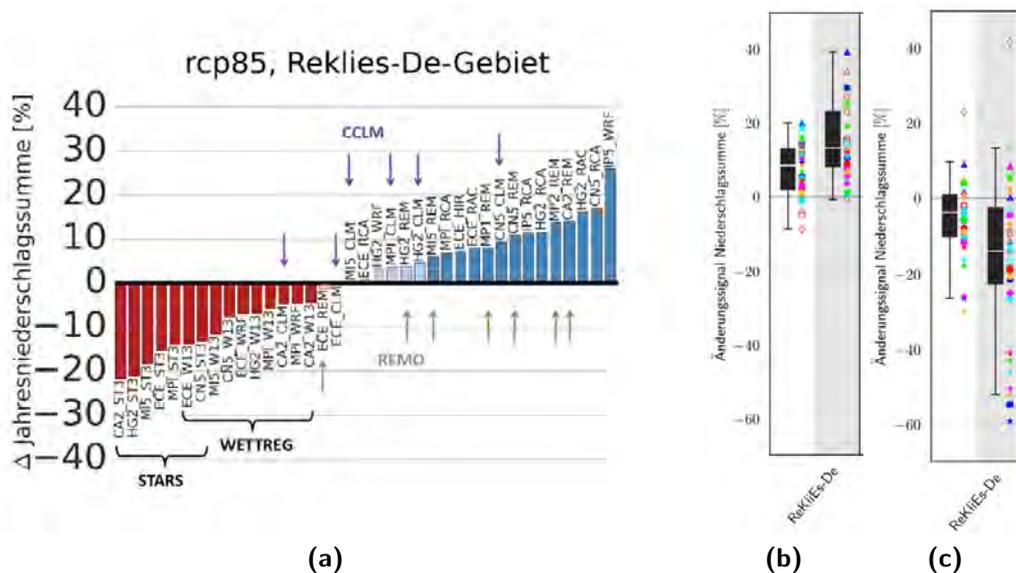


Abbildung 8.5: Mittlere Niederschlagshöhe (pr); a) Balkendiagramm für das Klimaänderungssignal für den Zeitraum 2070–2099 gegen den Referenzzeitraum 1971–2000; b) Boxplot der Klimaänderungssignale für die Zeiträume 2021–2050 (weiß hinterlegt) und 2071–2100 (grau hinterlegt) gegen den Referenzzeitraum 1971–2000, Winter (DJF) und c) Sommer (JJA). Legende siehe Abb. 8.1b.

Der Verlauf der mittleren Niederschlagshöhe im Winter (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 14_pr, Zeitreihen) zeigt für alle dynamischen Modelle eine klare Clustering nach dem antreibenden GCM, CanESM2 und IPSL-CM5A mit viel Niederschlag, EC-EARTH mit wenig. Die beiden ESDs zeigen ein abweichendes Verhalten wie bei der Jahressumme. Im Sommer zeigt sich ein größerer Einfluss des Regionalmodells. Beispielhaft zeigen das z.B. RCA4 und WRF mit IPSL-CM5A-

Antrieb oder CCLM und REMO mit CanEMS2-Antrieb. Beide Paare liegen im Winter eng beieinander und im Sommer weit voneinander entfernt. Offenbar üben die Regionalmodelle über lokal generierte, konvektive Niederschläge im Sommer mehr Einfluss aus als im Winter, wenn großskalige Phänomene dominieren. Dadurch kommt es zu einer weiteren Streuung der Klimaänderungssignale im Sommer als im Winter (Abb. 8.5b). Während alle STARS3-Projektionen sehr starke Abnahmen zeigen, liegt nur eine einzelne CCLM Projektion (CanESM2 Antrieb) im gleichen Bereich. Alle anderen CCLM-Projektionen zeigen deutlich geringere Abnahmen oder eine leichte Zunahme. Die starke Zunahme des Jahresniederschlages für WRF mit IPSL-CM5A Antrieb wird durch eine sehr starke Zunahme im Sommer verursacht. Eine deutlich ausgebildete Clusterung nach Regionalmodell ist nur für die beiden ESDs zu sehen.

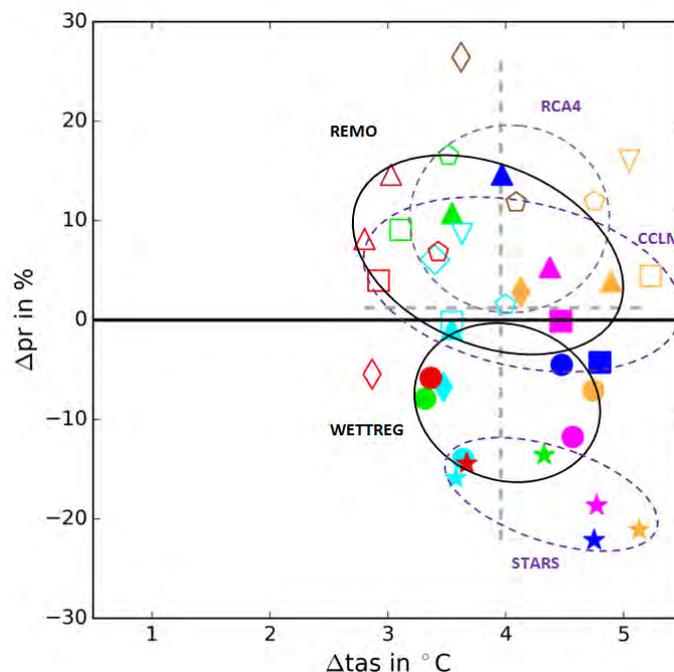


Abbildung 8.6: Streudiagramm für die Klimaänderungssignale (2071–2100 gegen 1971–2000) der bodennahen Lufttemperatur (tas) und der mittleren Niederschlagshöhe (pr). Die Legende ist dieselbe wie in Abb. 8.1b.

Abb. 8.6 zeigt die Änderung der mittleren Niederschlagshöhe und der bodennahen Lufttemperatur zusammengefasst als Streudiagramm. Die klare Clusterung des Temperatursignals der Regionalisierungen mit gleichem antreibendem GCM ist durch die senkrechte Anordnung der gleichfarbigen Symbole zu erkennen. Die Ellipsen zeigen den ungefähren Bereich, in denen ausgewählte Regionalmodelle mit verschiedenen Antrieben liegen (gekennzeichnet sind alle Regionalmodelle mit mindestens fünf verschiedenen antreibenden GCMs). Während die Spannweite des Temperatursignals (in der Horizontalen) mehr oder weniger von allen Regionalmodellen abgedeckt wird, wird für den Niederschlag nur ein geringerer Teil der gesamten Spannweite (vertikal) von den einzelnen Modellen belegt. WETTREG13 und STARS3 befinden sich dabei ausschließlich im negativen Bereich, die

3 dynamischen Modelle weitestgehend im positiven Bereich. Beim Niederschlag ist also ein größerer Einfluss des Regionalmodells zu sehen und insbesondere der Regionalisierungsmethode.

Die Zunahme der starken Niederschlagsmengen (Summe an Tagen mit Niederschlag über dem 95 % Perzentil, r95ptot) zeigt eine Clusterung nach antreibendem GCM, allerdings nur für die dynamischen Modelle (Abb. 8.5a). Die Projektionen der beiden ESDs liegen wieder eng beieinander am unteren Rand des aufgespannten Bereiches. Im Klimaänderungssignal der dynamischen Modelle ist ein Einfluss des GCMs zu sehen (Abb. 8.5b). So zeigen die EC-EARTH angetriebenen Projektionen eine geringe oder mittlere Zunahme, IPSL-CM5A oder HadGEM2 eine mittlere oder große Zunahme. Die beiden ESDs unterscheiden sich auch hier von den dynamischen Modellen. Sie zeigen keinen großen Einfluss des GCM und liegen jeweils nah beieinander mit geringer Abnahme (STARS3) oder geringer Zunahme (WETTREG13).

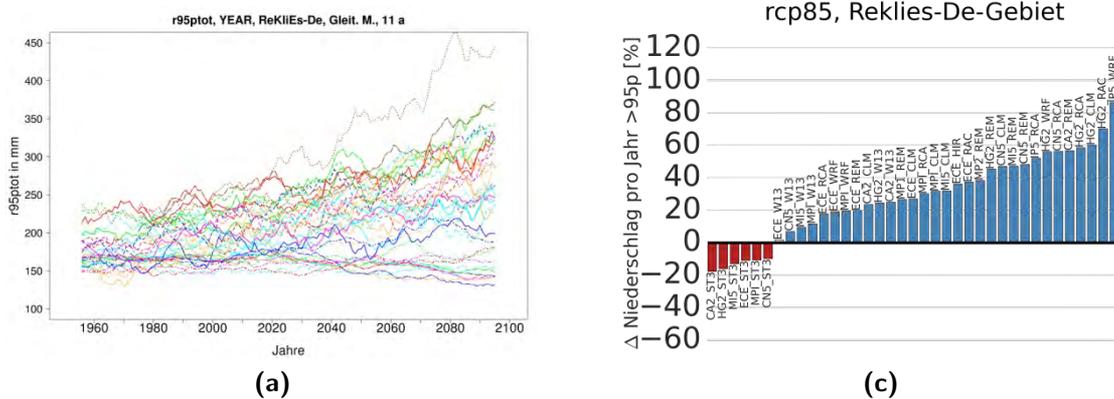


Abbildung 8.7: Starke Niederschlagsmenge (r95ptot); a) Die mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel geglättete Zeitreihe. Legende siehe Abb. 8.1a; b) Balkendiagramm für das Klimaänderungssignal für den Zeitraum 2070–2099 gegen den Referenzzeitraum 1971–2000.

Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die anderen Kennzahlen mit Fokus auf Starkniederschlägen, die extreme Niederschlagsmenge (r99ptot), die Anzahl moderater Niederschlagstage (r10mm) und starker Niederschlagstage (r20mm) (SUPPLEMENT RCP8.5 DATEIEN ZU 17_r10mm, 18_r20mm und 20_r99ptot, Zeitreihen und Balkendiagramme).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Verhalten der bodennahen Lufttemperatur durch das antreibende GCM dominiert wird. Bei einigen Temperaturkennzahlen wie z.B. der Spanne der Tagestemperatur (dtr) ist ein Einfluss des Regionalmodells deutlicher sichtbar. Der Niederschlag ist stärker durch das Regionalmodell beeinflusst, insbesondere im Sommer, wenn die lokale Niederschlagsbildung eine größere Bedeutung hat. Die beiden Regionalisierungsmethoden (dynamisch vs. statistisch) zeigen eine unterschiedliche Neigung dem antreibenden GCM zu folgen. Im Gegensatz zu den dynamischen Modellen produzieren die statistischen Modelle unabhängig vom GCM eine Abnahme sowohl bei der mittleren Niederschlagshöhe als auch bei den Starkniederschlägen.

9

Vergleich von Regionalisierungen mit RCMs und ESDs

Im ReKliEs-De Projekt werden zwei verschiedene Typen von regionalen Downscaling-Verfahren verwendet: Die physikalisch dynamischen Regionalisierungsverfahren (RCM), vertreten durch CCLM, REMO und WRF sowie das statistische Downscaling (ESD), vertreten durch WETTREG13 und STARS3. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der beiden Regionalisierungsverfahren gegenübergestellt werden. Dabei wird primär der ferne Zukunftszeitraum (2071–2100) unter dem RCP8.5-Szenario betrachtet.

Wie im Nutzerhandbuch erwähnt, unterscheiden sich ESDs und RCMs nicht nur durch den Modellierungsansatz, sondern auch in den verwendeten Modelldaten. RCMs operieren vollständig auf der Ebene der Gitterzellen. Dies führt zu Problemen bei der Modellierung von klein-skaligen Ereignissen wie Niederschlagsextremen oder stark von der Parametrisierung oder Modellorographie beeinflussten Größen wie dem bodennahen Wind. Die statistischen Modelle basieren dagegen auf Stationsbeobachtungen, welche mit Hilfe eines geeigneten Interpolationsverfahrens aufs Gitter gebracht wurden. Somit ist die räumliche Struktur der ESD-Felder geprägt vom Interpolationsalgorithmus, der Dichte des Messnetzes und der Qualität der Beobachtungsdaten (Messfehler und/oder -unsicherheit, Fehlwertauffüllung, Niederschlagsunterschätzung, Wärmeinseleffekt, etc.).

Dies muss bei der Interpretation der räumlichen Unterschiede zwischen ESDs und RCMs beachtet werden. Um dennoch einen möglichst fairen Vergleich zu ermöglichen, beziehen sich die folgenden Untersuchungen in der Regel auf Regionsmittel über das gesamte ReKliEs-De Gebiet.

9.1 Temperatur und Temperaturkennzahlen

Für die Temperatur und davon abgeleitete Kennzahlen ergeben sich weitestgehend ähnliche Änderungssignale zwischen den dynamischen und statistischen

..... 9.1 Temperatur und Temperaturkennzahlen

Regionalmodellen. Tab. 9.1 zeigt die Änderungssignale der einzelnen Regionalmodelle für verschiedene Kennzahlen für den Zeitraum 2071 bis 2100 gegenüber 1971 bis 2000 für das RCP8.5-Szenario im Mittel über alle Antriebsmodelle.

Tabelle 9.1: Änderungssignale der fünf im ReKliEs-De Projekt gerechneten Regionalmodelle für den Zeitraum von 2071 bis 2100 gegenüber 1971 bis 2000 unter dem RCP8.5-Szenario für verschiedene Kennzahlen über dem gesamten ReKliEs-De Gebiet. Die Werte repräsentieren Jahresmittel und Mittelwerte über alle verfügbaren Globalmodellantriebe der ReKliEs-De Modellmatrix (CanESM2, CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, MIROC5 und MPI-ESM-LR). Fett gedruckte Werte sind bei einem Signifikanzniveau von 1 % verschieden von Null. Als statistischer Test wurde ein Bootstrap-Resampling verwendet. Aufgrund des Einflusses des Antriebs ist das ermittelte Änderungssignal nur bedingt repräsentativ für das Regionalmodell. Dies gilt insbesondere für das Modell WRF, da bei diesem RCM nicht alle Antriebe gerechnet wurden. Die jeweiligen Farben der Zellen orientieren sich am jeweiligen Wert der betrachteten Kennzahl: Stark positive (dunkelrot) bis stark negative (dunkelblau) Änderungen.

Kennzahl	CCLM	REMO	WRF	WR13	STARS3
<i>tas</i> [K]	4,0	3,5	3,5	4,1	4,5
<i>id</i> [d]	-19	-19	-18	-21	-18
<i>fd</i> [d]	-56	-59	-56	-51	-52
<i>su</i> [d]	45	40	42	54	68
<i>su30</i> [d]	20	17	14	21	31
<i>tr</i> [d]	9	7	3	4	2
<i>dtr</i> [K]	-0,1	-0,3	0,0	1,2	1,9
<i>tx10p</i> [%]	-10	-9	-10	-9	-9
<i>tx90p</i> [%]	28	25	24	30	38
<i>csdi</i> [d]	-7	-7	-6	-4	-3
<i>wsdi</i> [d]	75	60	54	69	103
<i>hddheat17</i> [K]	-1055	-1069	-1001	-1132	-1226
<i>gsl</i> [d]	67	65	65	63	69
<i>pr</i> [%]	1,9	8,2	-5,4	-7,5	-17,3
<i>dd</i> [d]	12	1	16	16	24
<i>r1mm</i> [d]	-12	-1	-16	-16	-24
<i>r10mm</i> [d]	2,5	3,2	0,7	-0,7	-3,5
<i>r20mm</i> [d]	1,2	1,8	0,7	0,4	-0,7
<i>r95ptot</i> [mm]	67	82	43	16	-21
<i>r99ptot</i> [mm]	37	50	27	13	-6
<i>sfcWind</i> [m/s]	-0,04	0,02	-0,07	0,01	-0,11
<i>rsds</i> [W/m ²]	-3,8	-4,8	-26,7	n.v.	n.v.

Generell projizieren alle Modelle einen statistisch signifikanten Anstieg des Jahresmittels der 2 m-Temperatur (*tas*) zwischen 3.5 und 4.5 °C. Dementsprechend zeigen alle Modelle eine Zunahme von Sommertagen (40 bis 68 d), Hitzetagen (14 bis 31 d) und *tx90p* (24 bis 38 %) sowie eine Abnahme von Frosttagen (-51 bis -59 d), Eistagen (-18 bis -21 d) und *tx10p* (-9 bis -10 %). Auffällig ist dabei, dass die ESDs in der Regel den oberen Rand des Änderungssignals repräsentieren.

9 Vergleich von Regionalisierungen mit RCMs und ESDs

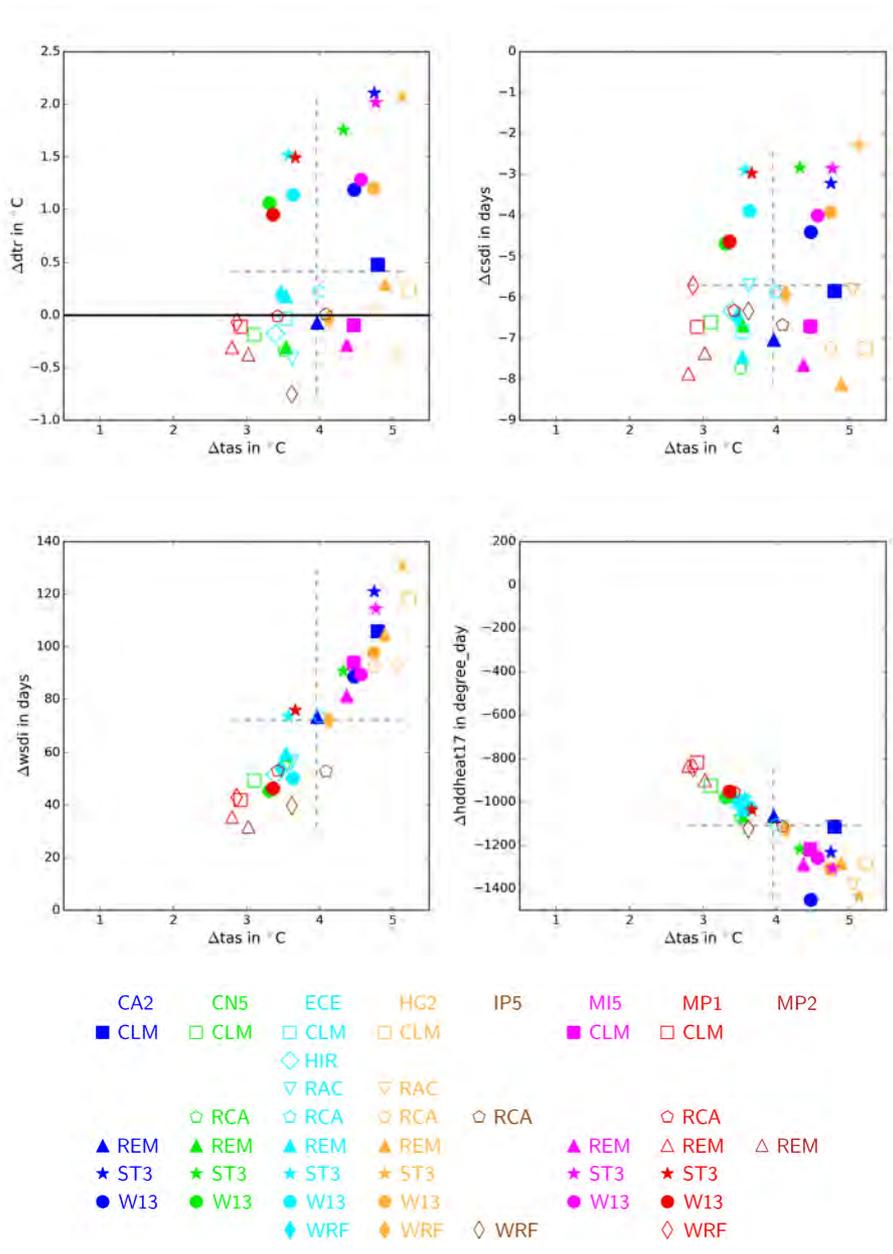


Abbildung 9.1: Änderung der täglichen Temperaturspannweite (dtr), Andauer von Kälteperioden (csdi), Andauer von Hitzeperioden (wsdi) und der Heizgradtage (hddheat17) gegenüber der Temperaturänderung (tas) für verschiedene RCM/ESD-Globalmodell-Kombinationen. Gezeigt sind Jahresmittel über der gesamten ReKliEs-De Region für die Änderungen 2071 bis 2100 gegenüber 1971 bis 2000 unter dem RCP8.5 Szenario.

So zeigt beispielsweise das Modell STARS3 mit 68 Sommertagen und 31 Hitzetagen einen deutlich stärkeren Anstieg als alle RCMs. Das statistische Modell WETTREG13 zeigt ebenfalls dieses Verhalten, die Differenz zu den RCMs ist jedoch geringer.

Für kälte-assoziierte Kennzahlen wie bspw. der Anzahl der Eistage und tx10p oder aber Kennzahlen wie der Länge des Vegetationszeitraums (63 bis 69 d) ergibt

sich hingegen kein klarer Unterschied zwischen RCMs und ESDs. Erklären lässt sich dieses Verhalten mit dem verwendeten Modellierungsansatz der ESDs. WETTREG13 und STARS3 nutzen einen komplexen Algorithmus, um eine Beobachtungszeitreihe zeitlich neu umzuordnen. Die neu geordnete Zeitreihe soll dabei ein vorgegebenes Änderungssignal (in Temperatur oder Wetterlagenhäufigkeit) erfüllen. Im vorliegenden Fall einer zunehmenden 2 m-Temperatur entspricht dies einer häufigen Nutzung von warmen Tagen aus der Beobachtungszeitreihe und damit einer Erhöhung von wärme-assoziierten Kennzahlen wie Sommertagen oder tx90p. Da die ESDs einen Schutzmechanismus gegen eine zu häufige Nutzung von einzelnen Tagen aus der Beobachtungszeitreihe sowie eine zu starke saisonale Verschiebung besitzen, fällt der Unterschied bei den kälte-assoziierten Kennzahlen (Eistage, Frosttage, tx10p) geringer aus.

Eine besondere Stellung hat das Änderungssignal für die Anzahl der Tropennächte. Die Beobachtungszeitreihe weist hier nur eine sehr geringe Anzahl auf, so dass eine zeitliche Neuordnung durch die ESDs nur geringe Änderungen bewirken kann. Entsprechend zeigen WETTREG13 und STARS3 eine Änderung um 4 und 2 Tage, während CCLM und REMO einen deutlichen Anstieg von bis zu 9 Tagen projizieren. Die geringere Änderung von WRF resultiert aus der (im Vergleich zu CCLM und REMO) geringeren Anzahl von verwendeten Antrieben, da hier Rechnungen mit den GCMs CanESM2, MIROC5 und CNRM-CM5 fehlen.

Ein deutlicher Unterschied zwischen ESDs und RCMs ergibt sich auch für die Änderung der täglichen Temperaturspannweite (dtr). Hier zeigen die statistischen Modelle einen statistisch signifikanten Anstieg zwischen 1,2 und 1,9 °C, während die dynamischen Modelle einen leichten Rückgang um bis zu -0,3 °C simulieren. Die Trennung zwischen RCM und ESD kann man deutlich in Abb. 9.1 (oben links) erkennen. Die statistischen Modelle zeigen unabhängig vom Antrieb einen Anstieg in dtr. Für die RCMs ergeben sich einzelne Antriebskombinationen mit positiver Änderung. Der Großteil der RCM-Globalmodellkombinationen weist jedoch einen Rückgang auf. Abb. 9.1 zeigt zudem eine Zunahme der Spannweite bei weiterem Anstieg der Jahresmitteltemperatur. Ein vergleichbarer Zusammenhang lässt sich bei WETTREG13 oder den RCMs nicht erkennen.

Der systematische Unterschied zwischen ESDs und RCMs beim Änderungssignal der Häufigkeiten von warmen und kalten Tagen (Sommertage, Eistage, etc.) setzt sich insbesondere bei STARS3 auch für das Änderungssignal von Andauern besonders heißer oder kalter Ereignisse fort. So zeigt das Modell einen Anstieg von 103 Tagen mit andauernder Hitze (wsdi, mindestens 6 aufeinanderfolgende Tage mit Tagesmaximumtemperatur über dem 10 % Perzentil (Abb. 9.1, unten links) gegenüber 54 bis 75 Tagen der anderen Modelle. Für die Kälteperioden (csdi, Abb. 9.1, oben rechts) und Heizgradtage (hddheat17, Abb. 9.1, unten rechts) lässt sich ebenfalls ein Unterschied zwischen ESDs und RCMs beobachten, er fällt jedoch deutlich geringer aus. Unabhängig von den Differenzen der Änderungssignale lassen sich anhand von Abb. 9.1 auch Ähnlichkeiten im Verhalten von ESDs und RCMs ablesen. So zeigen beide Modelltypen ein übereinstimmendes Änderungsverhalten bei einem Anstieg der mittleren Temperatur (tas) für die Kennzahlen wsdi und hddheat17. Für die

Andauer von Kälteperioden ist zwar die Trennung zwischen ESDs und RCMs klar erkennbar, allerdings zeigen beide eine relative Unabhängigkeit von der mittleren Temperatur.

9.2 Niederschlag und Niederschlagskennzahlen

Im Unterschied zur Temperatur zeigen sich beim Niederschlag und den abgeleiteten Kennzahlen deutlichere Unterschiede zwischen den dynamischen und statistischen Modellen. In der Regel ergibt sich für die RCMs ein positives Änderungssignal, während die ESDs meist geringe positive (WETTREG13) oder deutlich negative (STARS3) Änderungen für die verschiedenen Niederschlagskennzahlen zeigen. Für das Jahresmittel des Niederschlags simulieren die Modelle eine Änderung zwischen $-17,3$ und $8,2$ % für den Zeitraum von 2071 bis 2100 unter dem RCP8.5-Szenario. Anhand von Abb. 9.2 kann man erkennen, dass die Änderungssignale der einzelnen RCM/ESD-Globalmodell Kombinationen eine klare Saisonalität aufweisen. Für den Winter simulieren beispielsweise fast alle Modelle einen Anstieg des Niederschlags. Dementgegen ergibt sich für den Großteil der Modelle ein Rückgang des Sommerniederschlags. Für die statistischen Modelle fällt dieser Rückgang mit bis zu 60 % am stärksten aus. Anhand von Abb. 9.2 kann man auch erkennen, dass das Änderungssignal des Niederschlags stärker vom Regionalmodell beeinflusst wird. Eine leichte Gruppierung nach Globalmodellen lässt sich nur im Winter beobachten. Hier weisen Modellkombinationen mit CNRM-CM5 und CanESM2 die höchsten Niederschlagszunahmen auf. Dies ist auch eine Erklärung für die relative Abnahme des Jahresniederschlags im Regionalmodell WRF (siehe Tab. 9.1), da hier die Rechnungen mit diesen beiden Globalmodellen fehlen.

Anhand der Häufigkeiten für einzelne Niederschlagsereignisse (r1mm, r10mm und r20mm) lässt sich sowohl bei den statistischen als auch bei den dynamischen Modellen eine Deformation der Häufigkeitsverteilung feststellen. So zeigen CCLM, WRF und WETTREG13 eine deutliche Reduktion von Niederschlagsereignissen (r1mm) zwischen -12 und -16 Tagen, wohingegen Niederschlagsereignisse über 20 mm (r20mm) zwischen 0,4 und 1,8 % zunehmen. Bereits für Niederschlagsereignisse über 10 mm zeigen die Modelle CCLM und REMO einen statistisch signifikanten Anstieg. Das Modell WETTREG13 simuliert hier nur eine geringe, statistisch nicht-signifikante Abnahme. Für das Modell REMO ergibt sich zwar keine Reduktion von Niederschlagsereignissen über 1 mm, aber eine mit CCLM und WRF vergleichbare Zunahme von Niederschlägen über 10 und 20 mm. Das statistische Modell STARS3 unterscheidet sich in diesem Punkt von den übrigen Modellen, denn es zeigt eine statistisch signifikante Abnahme aller Niederschlagsereignisse. Trotz dieses Unterschiedes ist in Abb. 9.3 erkennbar, dass alle Modelle ein systematisch ähnliches Verhalten von r10mm und r20mm bei einer Änderung des mittleren Jahresniederschlags (pr) zeigen.

Insbesondere für moderate Niederschlagsereignisse (r10mm) simulieren alle Modelle eine übereinstimmende Änderungsrate. Die leichte Abweichung von

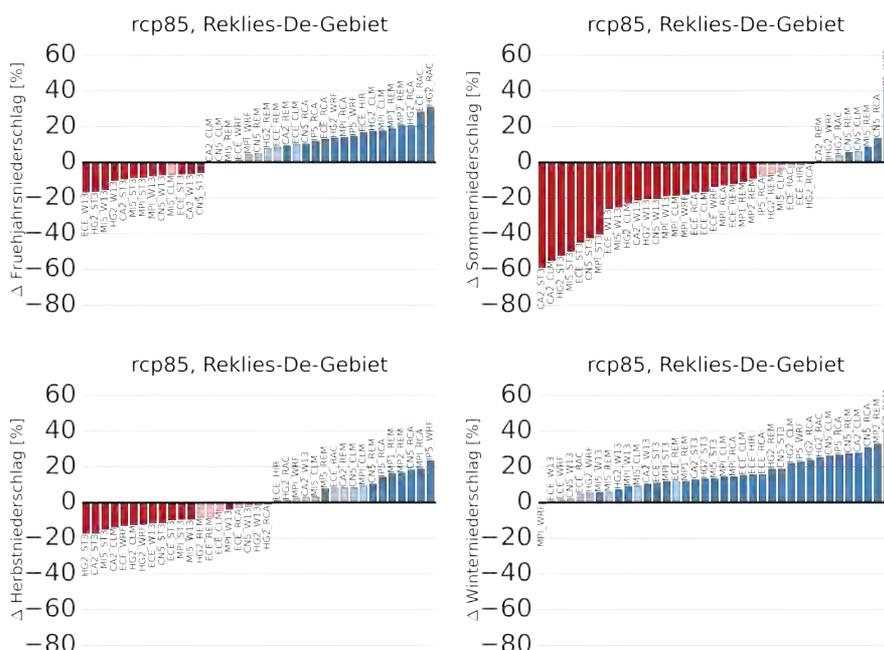


Abbildung 9.2: Niederschlagsänderung von verschiedenen RCM/ESD-Globalmodell-Kombinationen für den Zeitraum 2070 bis 2099 gegenüber 1971 bis 2000 unter dem RCP8.5 Szenario. Die Niederschlagsänderung ist in vier verschiedene Jahreszeiten zerlegt.

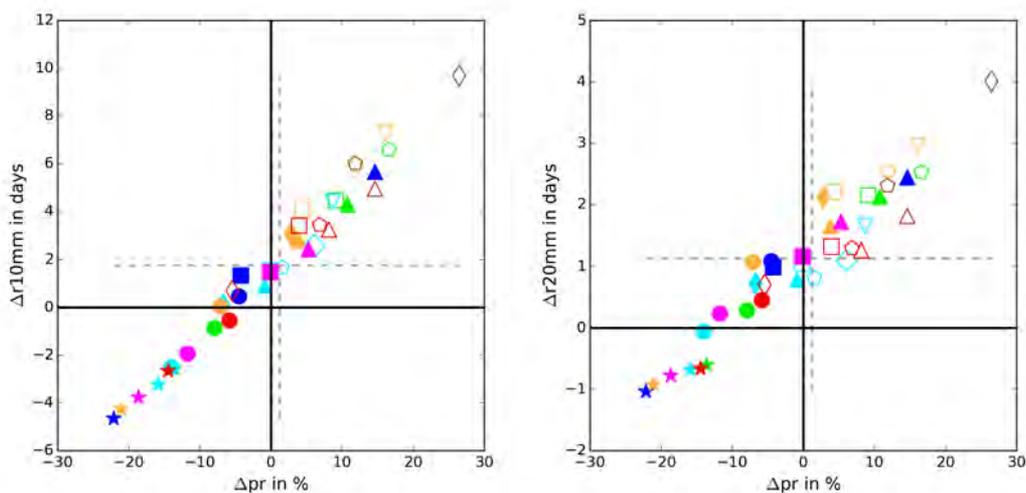


Abbildung 9.3: Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlag über 10 mm ($r_{10\text{mm}}$) und über 20 mm ($r_{20\text{mm}}$) gegenüber der Niederschlagsänderung (pr) für verschiedene RCM/ESD-Globalmodell-Kombinationen. Gezeigt sind Jahresmittel über der gesamten ReKliEs-De Region für die Änderungen 2071 bis 2100 gegenüber 1971 bis 2000 unter dem RCP8.5 Szenario. Die Legende findet sich in Abb. 9.1.

STARS3 bei Niederschlagsereignissen über 20 mm lässt sich durch die geringe Anzahl solcher Ereignisse in der Beobachtungsreihe erklären. Analoge Aussagen lassen sich auch für die perzentil-basierten Kennzahlen für Niederschlagsextreme

r95ptot und r99ptot treffen. Unterschiede zwischen den dynamischen und statistischen Modellen sind hier jedoch klarer erkennbar.

9.3 Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung

Für Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung ergeben sich nicht nur Unterschiede zwischen den dynamischen und statistischen Modellen, sondern auch Unterschiede innerhalb der RCMs. Bis auf das Modell STARS3 zeigt kein anderes Modell ein statistisch signifikantes Änderungssignal der bodennahen Windgeschwindigkeit (sfcWind) auf Jahresbasis. Auf saisonaler Ebene zerlegt sich das Änderungssignal für das gesamte Ensemble in eine Zunahme im Winter und eine Abnahme in den übrigen Jahreszeiten. Die statistischen Modelle finden sich dabei in der Regel am Rand der Ensembleverteilung, ebenso wie die mit MPI-ESM-LR angetriebenen dynamischen Modelle.

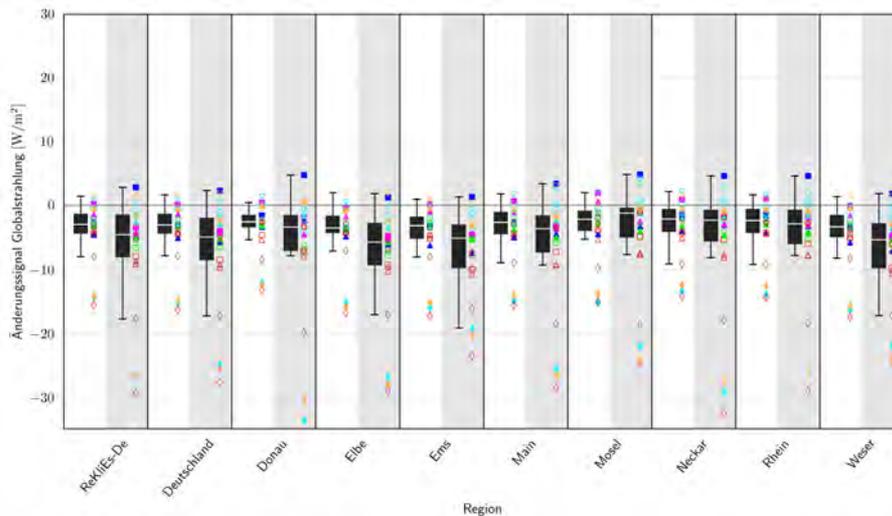


Abbildung 9.4: Änderungssignal der Globalstrahlung für verschiedene Regionen und Flusseinzugsgebiete. Die Symbole entsprechen den Festlegungen in Abb. 9.1. Boxplots und Symbole über weißem Hintergrund beziehen sich auf den Zeitraum 2021 bis 2050 relativ zu 1971 bis 2000. Der graue Hintergrund bezieht sich auf den Zeitraum 2071 bis 2100. Aufgrund mangelnder Beobachtungen wurden keine Änderungssignale für die statistischen Modelle ermittelt.

Wie man an Abb. 9.4 erkennen kann, ergibt sich die deutliche Abnahme der Globalstrahlung im Modell WRF ($-26,7 \text{ W/m}^2$) unabhängig vom jeweiligen Antrieb. Die übrigen RCMs zeigen ebenfalls eine Abnahme, wenn auch weniger drastisch. Die Abnahme tritt primär im Winter und Frühling auf. Für die ferne Zukunft ergibt sich relativ zur nahen Zukunft eine Vergrößerung der Schwankungsbreite und nur im geringen Maße eine Verstärkung der Abnahme. Auch räumlich lassen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Flusseinzugsgebieten erkennen.

10

Robustheit

Klimaprojektionen mit unterschiedlichen Modellen führen in der Regel zu Unterschieden in den simulierten Klimaänderungen. Dadurch entsteht eine Streuung des gesuchten Klimaänderungssignals. Diese Streuung wird durch eine Bandbreite erfasst. Um Ensemble-Ergebnisse für die Klimafolgenforschung und die Politikberatung besser nutzbar zu machen, wird hier ein Ansatz geliefert um abzuschätzen, wie viele verschiedene zufällig ausgewählte Projektionen ausreichen, um die Bandbreite des betrachteten Klimaänderungssignals dieses Ensembles adäquat (d.h. mit einer geforderten Genauigkeit) zu erfassen.

Für diese Untersuchung wird die Bandbreite durch einen Quantilsbereich dargestellt. In Anlehnung an die IPCC-Nomenklatur „likely“, bei 66-prozentiger Übereinstimmung, wird eine Abdeckung von 66 % der Spannweite des Gesamtensembles als Bandbreite verwendet, also der Bereich, in dem 66 % der Klimaänderungssignale liegen. Diese wird durch das obere und das untere Quantil (17 %-Quantil: Q17 und 83 %-Quantil: Q83) erfasst, welche die mittleren 66 % der Änderungssignale umschließen. Das bedeutet nicht, dass die Änderungssignale innerhalb dieses Bereiches eine besonders hohe Eintrittswahrscheinlichkeit haben, sondern lediglich, dass 66 % (also zwei Drittel) der Klimaänderungssignale in diesem Bereich anzutreffen sind und damit jeweils ein Sechstel der Simulationen höhere bzw. niedrigere Änderungssignale liefert.

Diese Bandbreite gilt als robust, wenn sich diese Grenzen (Q17 und Q83) bei Vergrößerung der Anzahl der verwendeten Projektionen nur noch unwesentlich ändern, also konvergieren. Ab welchem Umfang die Bandbreite mit einer ausreichenden Genauigkeit erfasst wird, entscheidet ein Konvergenzkriterium ϵ . Als Gesamtensemble wird das ReKliEs-Ensemble der RCP8.5 Simulationen verwendet. Im Nutzerhandbuch in Kapitel 5.2 wird das Verfahren detailliert beschrieben.

Für die Änderung der mittleren bodennahen Lufttemperatur (t_{as}) zeigt Abb. 10.1a, dass die Bandbreite ab einer Anzahl von 9 Projektionen robust ist (Untergrenze Q17 ab 8 Projektionen bzw. Obergrenze Q83 ab 9 Projektionen). D.h., ein zufällig gezogenes Ensemble mit mindestens 9 Mitgliedern erhält, innerhalb der angenommenen Toleranz von $\epsilon=0,19K$, in 90 % der Fälle die Bandbreite des

Gesamtensembles. Die Kennzahlen Anteil kalter Tage (cold days, tx10p), Frosttage (frost days – fd), Eistage (ice days – id) und die Länge der Vegetationsperiode (growing season length – gsl) zeigen ein ähnliches Verhalten mit einer robusten Bandbreite bei einer Teilensemblegröße zwischen 5 und 8 Projektionen. Die Kennzahlen Andauer von Kälteperioden (cold spell duration index – csdi), Andauer von Wärmeperioden (warm spell duration index – wsd), Anteil warmer Tage (warm days – tx90p), Heizgradtage (hddheat17) und Sommertage (summerdays – su) zeigen ein robustes Verhalten bei Werten zwischen 10 und 25 Projektionen.

Die Kennzahlen Hitzetage (su30) und tropische Nächte (tropical night – tr) zeigen für den unteren Grenzwert Q17 ein robustes Verhalten, für den oberen Grenzwert Q83 aber (unter den ausgewählten Konvergenzbedingungen) keine Konvergenz bis zur vollen Ensemblegröße, wie das Beispiel für die tropischen Nächte in Abb. 10.1b zeigt. Das unterschiedliche Konvergenzverhalten erklärt sich durch die unterschiedliche Verteilung der Klimaänderungssignale im jeweiligen Gesamtensemble. Während z.B. die Klimaänderungssignale von tas einen ungefähr gleichmäßig mit Projektionen gefüllten Schlauch zeigen (Abb. 10.2a, SUPPLEMENT RCP8.5 DATEI ZU 01_tas, Zeitreihen), zeigen su30 und vor allem tr eine sehr unsymmetrische Verteilung der Klimaänderungssignale (Abb. 10.2b, SUPPLEMENT RCP8.5 DATEIEN ZU 05_su30 und 06_tr, Zeitreihen und Boxplots).

Beim Beispiel der tropischen Nächte liegen nur wenige Projektionen im oberen Bereich (7 Projektionen zwischen +10 und +20), die zudem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts weit streuen, während im unteren Bereich viele Projektionen dicht beieinander liegen (20 Projektionen zeigen Änderungssignale zwischen

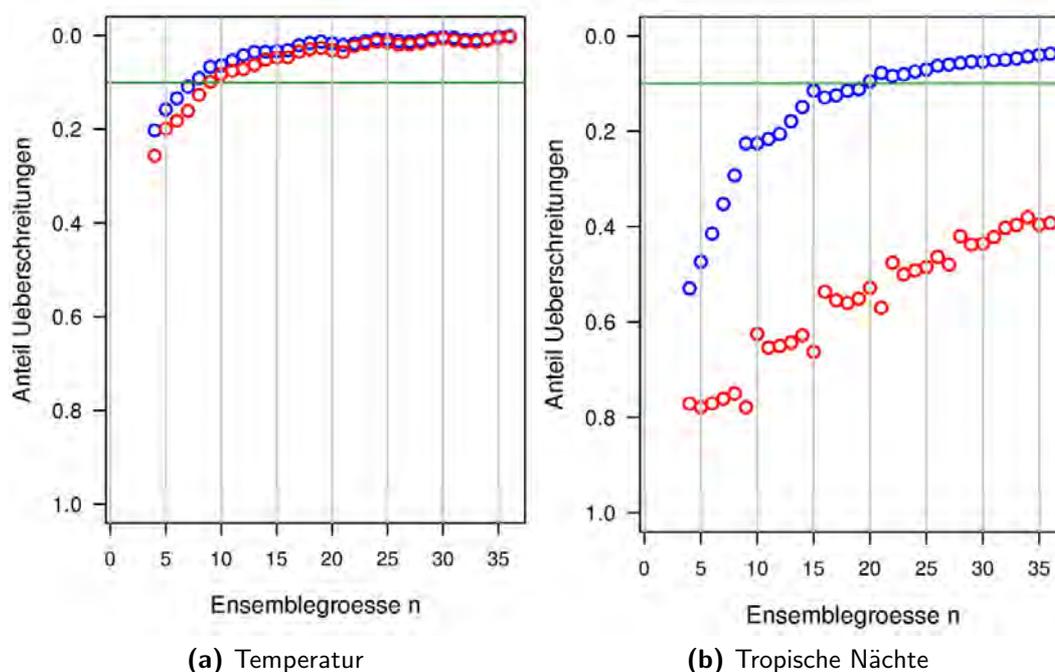


Abbildung 10.1: Relativer Anteil der Verletzungen des Konvergenzkriteriums für beide Quantilsgrenzen Q17 und Q83 für a) mittlere bodennahe Lufttemperatur. b) tropische Nächte.

0 und +5). Diese Verteilung erleichtert das Auffinden einer Untergrenze, wohingegen die Unsicherheit bei der Bestimmung der Obergrenze größer ist. Während bei zufälligem Ziehen die Untergrenze (Q17) schon mit wenigen Projektionen gut erfasst werden kann, variieren die Q83-Werte sehr stark, je nachdem ob und welche der Projektionen aus dem oberen Bereich gezogen wird. Daher konvergiert die Untergrenze des Quantilbereiches, während die Obergrenze das geforderte Robustheitsmaß nicht erreicht. Das sprunghafte Verhalten, wie es das Q83-Quantil der tropischen Nächte in Abb. 10.1b zeigt, hängt mit der Berechnung der Quantile bei kleinen Stichproben und der Anzahl von Fällen zusammen, die dabei außerhalb der Quantilsgrenzen liegen.

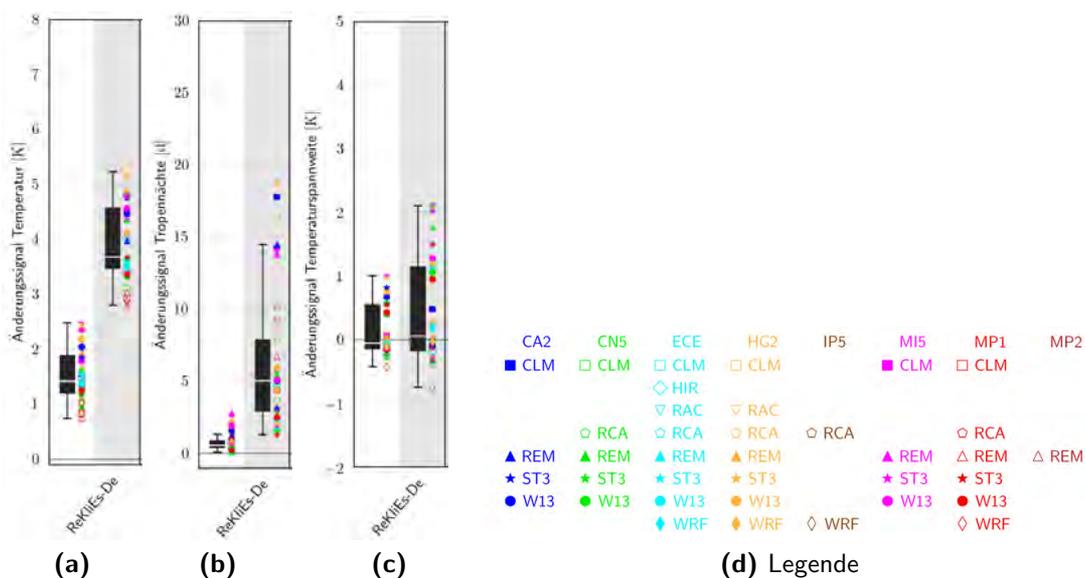


Abbildung 10.2: Boxplot der Klimaänderungssignale für die Zeiträume 2021-2050 (weiß hinterlegt) und 2071-2100 (grau hinterlegt) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 für a) mittlere bodennahe Lufttemperatur (tas), b) Tropische Nächte (tr) und c) Spanne der Tagestemperatur.

Die mittlere Windgeschwindigkeit (near surface wind speed – sfcWind) zeigt bereits ab einem Stichprobenumfang von 6 (Abb. 10.3a) eine robuste Bandbreite. Die Bandbreite der Klimaänderung wird bei einer geforderten Genauigkeit von 0,03 m/s schnell robust wiedergegeben. Für die Spanne der Tagestemperatur (diurnal temperature range – dtr) in Abb. 10.3b ist die Untergrenze Q17 ab 13 Projektionen robust, die Obergrenze Q83 wird nicht robust. Hierbei handelt es sich um ein unsymmetrisch strukturiertes Klimaänderungssignal (vgl. Abb.10.2c) mit vielen Änderungssignalen im Bereich zwischen $-0,5\text{ °C}$ und $0,5\text{ °C}$ und wenigen Simulationen oberhalb von $+2\text{ °C}$.

Die mittlere Niederschlagshöhe (pr) wird für die Unter- und Obergrenze erst ab 32 Projektionen robust (Abb. 10.4a), wobei beide Grenzen ein ähnliches Konvergenzverhalten zeigen. Die Bandbreite der Anzahl moderater Niederschlagstage (Tage mit mindestens 10 mm/d, r10mm) wird unter den gewählten Vorraussetzungen nicht robust (Abb. 10.4b).

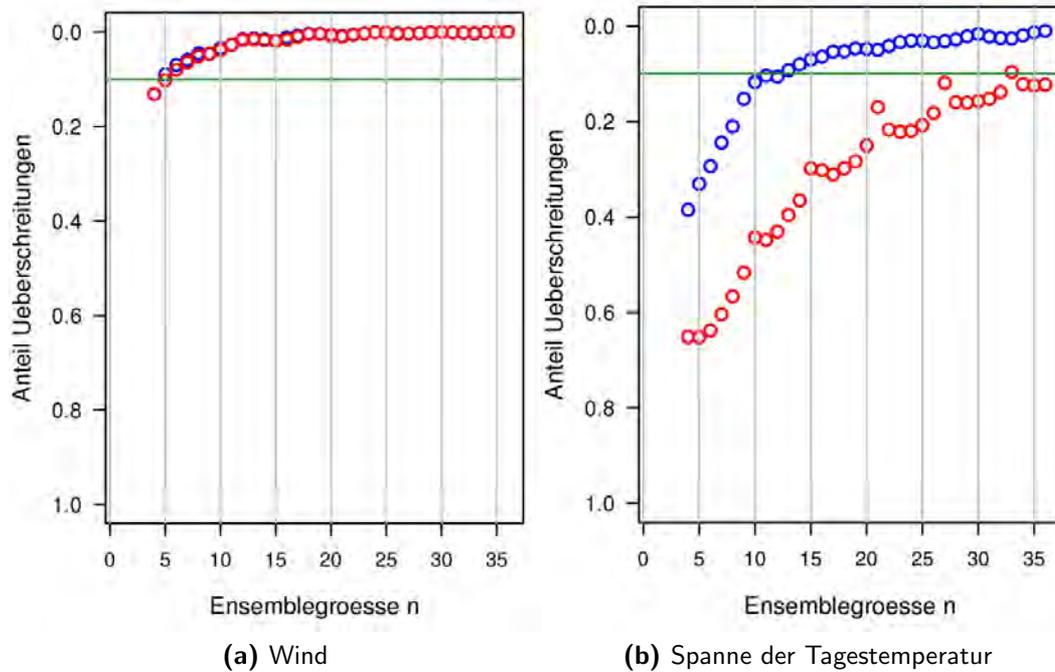


Abbildung 10.3: Relativer Anteil der Verletzungen des Konvergenzkriteriums für beide Quantilsgrenzen Q17 und Q83 für a) Mittlere bodennahe Windgeschwindigkeit (sfcWind) und b) Spanne der Tagestemperatur (dtr).

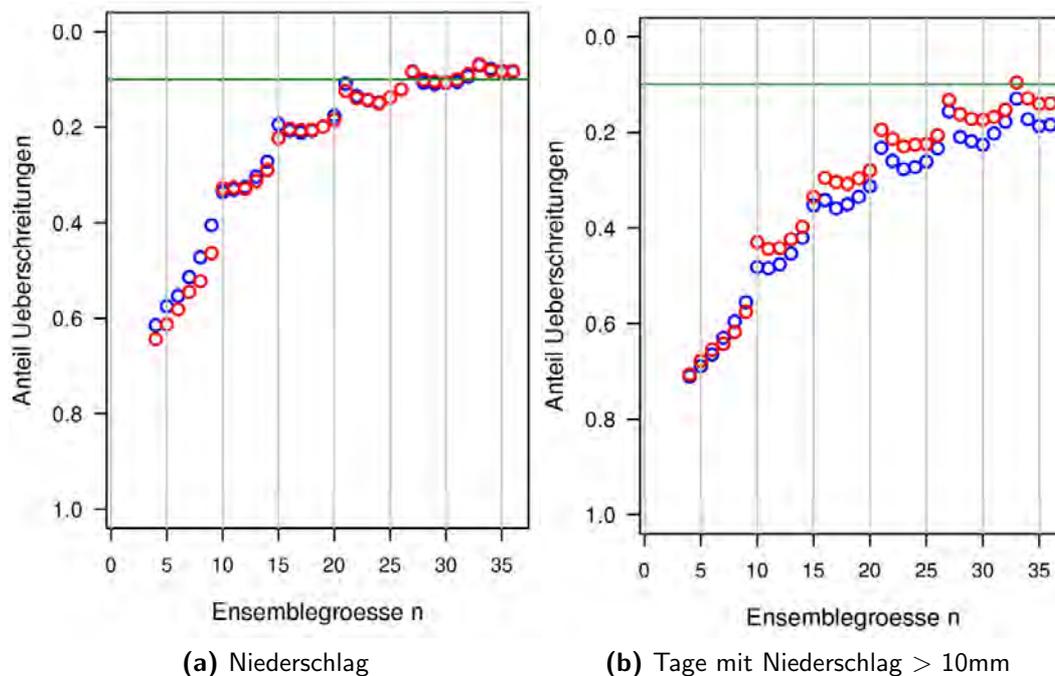


Abbildung 10.4: Relativer Anteil der Verletzungen des Konvergenzkriteriums für beide Quantilsgrenzen Q17 und Q83 für a) Mittlere Niederschlagshöhe (pr). b) Anzahl moderater Niederschlagstage (r10mm).

Für die starke Niederschlagsmenge (Niederschlagssumme an Tagen mit Niederschlag über dem 95 % Perzentil, r_{95ptot}) wird die Bandbreite ebenfalls nicht robust. Bei der geforderten Genauigkeit von 1,8 mm konvergieren die Quantilsgrenzen nicht. Auch für die anderen Kennzahlen mit dem Fokus auf extremen Niederschlägen, die Anzahl starker Niederschlagstage (r_{20mm}) und die extreme Niederschlagsmenge (r_{99ptot}) wird die Bandbreite nicht robust.

Für die meisten Temperaturkennzahlen und die mittlere Niederschlagshöhe wird unter den ausgewählten Konvergenzbedingungen die Bandbreite robust. Kennzahlen mit geringer Eintrittshäufigkeit im Referenzzeitraum wie z.B. die tropischen Nächte oder Kennzahlen für extreme Niederschläge (r_{10mm} , r_{20mm} , r_{95ptot} , r_{99ptot}) liefern keine robusten Signale. Während die Bandbreite der mittleren Signale des ReKliEs-Gesamtensembles mit weniger Projektionen wiedergegeben werden kann als im Gesamtensemble vorliegen, gelingt das für viele Extrem-Kennzahlen nicht. Bei diesen erhöht sich die Bandbreite innerhalb der Mitglieder der ReKliEs-Ensembles immer weiter, je mehr Projektionen hinzukommen.

Für die Auswertung des vorliegenden Ensembles kann aus diesen Untersuchungen ein – unter einer vorgegebenen Genauigkeit – für die Abschätzung der Bandbreite notwendiger minimaler Simulationsumfang abgeleitet werden. Dieser kann auch für zukünftige Szenarienrechnungen über Deutschland als Orientierung dienen, wie viele Mitglieder ein Ensemble mindestens haben sollte, um für bestimmte Klimaparamter ein robustes Änderungssignal ermitteln zu können. Er ist abhängig von der Kennzahl und kann für Obergrenze und Untergrenze verschieden sein. Die Genauigkeit wurde hier an das Klimamittel oder die Klimaänderung gekoppelt (siehe Erläuterungen der Methode im Nutzerhandbuch Kapitel 5.2).

11

Fazit

Das Projekt ReKliEs-De hat für die Klimafolgenforschung und die Politikberatung in Deutschland eine bisher einmalige Informationsbasis erstellt, die systematische Untersuchungen für die im Projekt verwendeten Kombinationen aus globalen und regionalen Modellen erlaubt. Die in diesem Projekt durchgeführten und ausgewerteten regionalen Klimasimulationen erfolgen auf Basis der aktuellen Szenarien und der aktuellen globalen Klimasimulationen. Mit der Gegenüberstellung der beiden Szenarien Weiter-wie-bisher (RCP8.5) und Klimaschutz (RCP2.6) bieten die Projektergebnisse zentrale Informationen für Entscheidungsträger in Deutschland, um ihre Entscheidungen zu Klimaschutz und Klimaanpassung auf den besten wissenschaftlichen Erkenntnissen aufzubauen.

Zentrale Ergebnisse für die Klimafolgenforschung und Politikberatung aus dem Projekt sind:

- a) Die zu erwartenden Klimaänderungen unter dem Weiter-wie-bisher-Szenario stellen einen Klimazustand dar, in dem heutige Extremereignisse (z.B. Hitzesommer oder Starkregenereignisse) künftig der Normalfall werden könnten. Die in Zukunft weiterhin zu erwartenden Extremereignisse würden unseren heutigen Erfahrungshorizont übersteigen.
- b) Unter dem Klimaschutz-Szenario würde sich das Klima zwar immer noch ändern, jedoch deutlich weniger als unter dem Weiter-wie-bisher-Szenario. Die zu erwartenden Änderungen liegen für das Klimaschutz-Szenario überwiegend in einem Bereich, der noch innerhalb der heute bereits zu beobachtenden Jahr-zu-Jahr-Schwankung liegt.
- c) Für viele meteorologische Größen lässt sich auf dieser Basis die zu erwartende Klimaänderung unter den beiden Szenarien belastbar abschätzen. Damit stehen der Klimafolgenforschung und der Politikberatung wichtige Informationen zur Verfügung, welche bei Entscheidungen mit Bezug zum Klima Berücksichtigung finden können.

- d) Eine genaue Abschätzung der Stärke zukünftiger Extremereignisse (z.B. Anzahl besonders heißer Nächte oder starker Stürme) ist jedoch selbst mit diesem großen Ensemble noch nicht abschließend möglich. Hier muss weiterhin dem Vorsorge-Prinzip Rechnung getragen werden.

Der vorliegende Ergebnisbericht stellt die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus dem Projekt ReKliEs-De vor. Für den interessierten Nutzer sind sämtliche Ergebnisse sowohl als Daten als auch in graphisch aufbereiteter Form verfügbar. Damit bieten wir den Anwendern der Ergebnisse erstmals einen solch umfassenden Einblick und Zugriff auf alle im Projekt erzeugten Ergebnisse.

12

Abkürzungen

AR5	5. Sachstandsbericht des IPCC (Assessment Report 5)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BTU	Brandenburgische Technische Universität
CanESM	Canadian Earth System Model (globales Klimamodell)
CCLM	COSMO-CLM (dynamisches regionales Klimamodell)
CLIPC	Climate Information Portal: www.clipc.eu
CMIP5	Climate Model Intercomparison Project – Phase 5
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques – Climate Model, Version 5
CORDEX	Coordinated Downscaling Experiment
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
DWD	Deutscher Wetterdienst
EC-EARTH	European Centre – Earth System model
ECHAM	European Center Hamburg Model – Entwicklungsbeginn am European Center for Medium Range Weather Forecasting (ECWMF), Fortführung in Hamburg am MPI für Meteorologie
ESD	Empirical Statistical Downscaling, auch: statistische Regionalisierung
ESGF	Earth System Grid Federation (Datenportal)
EURO-CORDEX	Coordinated Downscaling Experiment – European Domain
EURO-CORDEX/ ReKliEs-De Ensemble	Alle Simulationen mit 12 km Auflösung, die zum Stichtag 31.05.2017 verfügbar waren

EUR11-Gebiet	Coordinated Downscaling Experiment – European Domain mit Gitterweite von 0,11° (12 km)
GERICS	Climate Service Center Germany
HadGEM	Hadley Centre Global Environment Model (globales Klimamodell)
HIRHAM	Dynamisches Regionales Klimamodell des Dänischen Meteorologischen Instituts, entstanden aus Teilen der Modelle HIRLAM und ECHAM
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
IPSL-CM5A	Institute Pierre Simon Laplace – Climate Model Version 5A (globales Klimamodell)
IS92a	Sozioökonomisches Szenario des IPCC von 1992
MIROC	Model for Interdisciplinary Research On Climate. Globales Klimamodell von Universität Tokio und Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut, Earth System Model, Low Resolution. Globales Klimamodell des deutschen MPI für Meteorologie, Hamburg
PIK	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
Q17	17. Perzentil einer Verteilung: Untergrenze der mittleren 66 % aller Ergebnisse
Q83	83. Perzentil einer Verteilung: Obergrenze der mittleren 66 % aller Ergebnisse
RACMO	Dynamisches Regionales Klimamodell des Königlich Niederländischen Meteorologischen Instituts zusammen mit dem Dänischen Meteorologischen Institut. Baut auf Vorgängermodell HIRLAM auf.
RCA4	Rosby Centre Regional Atmospheric Model Version 4. Dynamisches Regionales Klimamodell des Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts
RCM	Regionales Klimamodell, meist (und in diesem Projektbericht immer) ausschließlich für dynamische Regionale Klimamodelle verwendet, nicht für statistische
RCP	Representative Concentration Pathway (repräsentativer Konzentrationsverlauf)

12 Abkürzungen

ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
ReKliEs-De Gebiet	Deutschland und nach Deutschland entwässernde Flusseinzugsgebiete
REMO	Dynamisches Regional-Modell, entwickelt vom MPI für Meteorologie in Hamburg, aktuell weiterentwickelt von GERICS
SRES	Special Report on Emission Scenarios: Spezialreport des IPCC von 2000, in dem sozioökonomische Szenarien, sog. SRES-Szenarien, definiert wurden
STARS3	Statistisches Regionalisierungsmodell, Version 3, betrieben vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
UHOH	Universität Hohenheim
VALUE	Validating and Integrating Downscaling Methods for Climate Change Research, EU-COST-Projekt für statistische Regionalisierungsmethoden
WR13	WETTREG2013: Wetterlagen-basiertes Regionalisierungsverfahren von CEC-Potsdam GmbH, statistisches Regionalmodell
WRF	Weather Research and Forecast Model, dynamisches Regionales Klimamodell



Nomenklatur für Modell-Läufe in ReKliEs-De

Die Bezeichnung benötigt drei Zeichengruppen: **<gm>** für das Globalmodell, **<rm>** für das Regionalmodell und **<sz>** für das Szenario. Die Übersicht umfasst die jeweils in der Spalte *Abkürzung* von Tab. A.1 bis A.3 eingetragenen Zeichen.

Dabei ist zu beachten: Manche Modell-Kombinationen enthalten implizite, nicht in der Kurzform dargestellte Informationen. Dies umfasst

- + die Laufnummer von EC-EARTH,
- + der Versionsname von WRF,
- + der Versionsname von REMO,
- + die neu aufgesetzte Versionsnummer 2 von RACMO in der Kombination HG2 → RACMO und
- + die neu aufgesetzte Versionsnummer 1a von RCA4 in der Kombination MPI-ESM → RCA4.

Namensteil gm

Tabelle A.1: In den Analysen von ReKliEs-De verwendete Globalmodelle

<i>Institution</i>	<i>Langform</i>	<i>Mittellangform</i>	<i>Abkürzung</i>
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CCCMA-CanESM2	CanESM2	CA2
Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-CM5	CM5
Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A	IP5
EC-EARTH Consortium	ICHEC-EC-EARTH ¹	EC-EARTH	E01 E03 E12
Met Office Hadley Centre	MOHC-HadGEM2-ES	HadGEM2	HG2
Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC-MIROC5	MIROC5	MI5
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-M-MPI-ESM-LR ²	MPI-ESM	MP1 MP2

¹ Von diesem Modell werden die Läufe 1, 3 und 12 in den CORDEX-Regionalisierungen eingesetzt.

² Von diesem Modell werden die Läufe 1 und 2 in den Regionalisierungen mit REMO2009 eingesetzt.

Namensteil rm

Tabelle A.2: In den Analysen von ReKliEs-De verwendete Regionalmodelle

<i>Langname</i>	<i>Mittellangname</i>	<i>Abkürzung</i>
CCLM 4-8-17	CCLM	CLM
DMI-HIRHAM5	HIRHAM	HIR
KNMI-RACMO22E	RACMO	RAC
SMHI-RCA4	RCA4	RCA
REMO ¹	REMO	REM
STARS3	STARS	ST3
WETTREG2013	WETTREG	W13
IPSL-INNERIS-WRF ²	WRF	WRF

¹ Es werden unterschiedliche Versionen von REMO in ReKliEs-De und CORDEX eingesetzt.

² Es werden unterschiedliche Versionen von WRF in ReKliEs-De und CORDEX eingesetzt.

Namensteil sz

Tabelle A.3: In den Analysen von ReKliEs-De verwendete Szenario-Abkürzungen

<i>Langname</i>	<i>Abkürzung</i>
RCP2.6	R26
RCP8.5	R85
Historical Data, 20C-Simulationen	HIS

Modell-Nomenklatur

Die Synthese befindet sich in Tab A.4 – es ist die Auflistung der Laufs-Benennungen zur Verwendung in ReKliEs-De. Anmerkung: Für alle Modelle existieren auch Historical Data (HIS), diese sind in der Tabelle nicht extra aufgeführt; dort sind lediglich die vorhandenen Szenario-Läufe enthalten.

Tabelle A.4: Abkürzungen der in ReKliEs-De verwendete Globalmodell-Regionalmodell-Kombinationen.

<i>GCM Name</i>	<i>Lauf</i>	<i>RCM Name</i>	<i>Version</i>	<i>Szenario</i>	<i>Abkürzung</i>
CanESM2	1	CCLM	1	RCP85	CA2.CLM.R85
		REMO2015	1	RCP85	CA2.REM.R85
		STARS ¹	3	RCP85	CA2.ST3.R85
		WETTREG ²	13	RCP85	CA2.W13.R85
CNRM-CM5	1	CCLM	1	RCP85	CM5.CLM.R85
		RCA4	1	RCP85	CM5.RCA.R85
		REMO2015	1	RCP85	CM5.REM.R85
		STARS ¹	3	RCP85	CM5.ST3.R85
		WETTREG ²	13	RCP85	CM5.W13.R85
IPSL-CM5A	1	RCA4	1	RCP85	IP5.RCA.R85
		WRF331F	1	RCP85	IP5.WRF.R85
EC-EARTH	12	CCLM	1	RCP85	E12.CLM.R85
	3	HIRHAM	1	RCP85	E03.HIR.R85
	12 ³	RACMO	1	RCP26	E12.RAC.R26
	13	RACMO	1	RCP85	E01.RAC.R85
	12	RCA4	1	RCP26	E12.RCA.R26
	12	RCA4	1	RCP85	E12.RCA.R85
	12	REMO2015	1	RCP85	E12.REM.R85
	12	STARS ¹	3	RCP85	E12.ST3.R85
	12	WETTREG ²	13	RCP85	E12.W13.R85
	12	WRF361H	1	RCP85	E12.WRF.R85

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Anhang A Nomenklatur für Modell-Läufe

<i>Fortsetzung</i>					
<i>GCM Name</i>	<i>Lauf</i>	<i>RCM Name</i>	<i>Version</i>	<i>Szenario</i>	<i>Abkürzung</i>
HadGEM2	1	CCLM	1	RCP85	HG2_CLM_R85
		RACMO	2	RCP85	HG2_RAC_R85
		RCA4	1	RCP85	HG2_RCA_R85
		REMO2015	1	RCP85	HG2_REM_R85
		STARS ¹	3	RCP85	HG2_ST3_R85
		WETTREG ²	13	RCP85	HG2_W13_R85
		WRF361H	1	RCP85	HG2_WRF_R85
MIROC5	1	CCLM	1	RCP85	MI5_CLM_R85
		REMO2015	1	RCP85	MI5_REM_R85
		STARS ¹	3	RCP85	MI5_ST3_R85
		WETTREG ²	13	RCP85	MI5_W13_R85
		WRF361H	1	RCP85	MI5_WRF_R85
MPI-ESM ⁴	1	CCLM	1	RCP26	MP1_CLM_R26
	1	CCLM	1	RCP85	MP1_CLM_R85
	1	RCA4	1a	RCP85	MP1_RCA_R85
	1	REMO2009	1	RCP26	MP1_REM_R26
	1	REMO2009	1	RCP85	MP1_REM_R85
	2	REMO2009	1	RCP26	MP2_REM_R26
	2	REMO2009	1	RCP85	MP2_REM_R85
	1	STARS ¹	3	RCP26	MP1_ST3_R26
	1	STARS ¹	3	RCP85	MP1_ST3_R85
	1	WETTREG ²	13	RCP26	MP1_W13_R26
	1	WETTREG ²	13	RCP85	MP1_W13_R85
	1	WRF361H	1	RCP26	MP1_WRF_R26
	1	WRF361H	1	RCP85	MP1_WRF_R85

¹ Für die gegitterten Daten aller 10 Elemente wurde das PIK-Verfahren angewandt

² Für die gegitterten Daten der Elemente Niederschlag und relative Feuchte wurde das HYRAS-Verfahren angewandt; für die gegitterten Daten der Elemente, Maximumtemperatur, Mitteltemperatur, Minimumtemperatur, Luftdruck, Dampfdruck, Sonnenscheindauer, Bedeckung und Wind wurde das PIK-Verfahren angewandt.

³ Bei der Modellkette EC-EARTH → RACMO gibt es eine sonst nirgends auftretende Besonderheit: Es wurden die HIST-Simulationen für das Klima der Gegenwart unter Antrieb sowohl von Lauf 1 als auch Lauf 12 von EC-EARTH gerechnet. Die Projektionen erfolgten dann mit dem Lauf 1 für RCP85 und mit dem Lauf 12 für RCP26.

⁴ Nur für REMO2009 wurden sowohl die Läufe 1 als auch 2 von MPI-ESM eingesetzt; bei allen anderen RCMs erfolgte der Antrieb mit Lauf 1 von MPI-ESM.



Namen und Kurzdefinitionen der in ReKliEs-De berechneten Kennzahlen

Tabelle B.1: Liste der in ReKliEs-De berechneten Kennzahlen

Nr.	Variablenname	Kennzahl-Name	Auswertzeitraum	Bemerkungen
Temperatur				
1	tas	Mittlere bodennahe Lufttemperatur	monatlich, saisonal, jährlich	mittlere Tagestemperatur T_{mittel} in °C
2	id	Eistage	jährlich	Anzahl der Tage mit $T_{\text{max}} < 0^{\circ}\text{C}$
3	fd	Frosttage	jährlich	Anzahl der Tage mit $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$
4	su	Sommertage	jährlich	Anzahl der Tage mit $T_{\text{max}} > 25^{\circ}\text{C}$
5	su30	Hitzetage	jährlich	Anzahl der Tage mit $T_{\text{max}} \geq 30^{\circ}\text{C}$
6	tr	Tropische Nächte	jährlich	Anzahl der Tage mit $T_{\text{min}} > 20^{\circ}\text{C}$
7	dtr	Spanne der Tagestemperatur (diurnal temperature range)	monatlich, saisonal, jährlich	mittlere Differenz maximaler und minimaler Tagestemperatur (T_{max} minus T_{min})
8	tx10p	Anteil kalter Tage pro Jahr	jährlich	Definition ETCCDI: Prozent der Tage, an denen die Maximumtemperatur $T_{\text{max}} < T_{x10}$ ist. T_{x10} ist das 10. Perzentil der Tagesmaximumtemperatur im Referenzzeitraum (1971–2000).
9	tx90p	Anteil warmer Tage pro Jahr	jährlich	Definition ETCCDI: Prozent der Tage, an denen die Maximumtemperatur $T_{\text{max}} > T_{x90}$ ist. T_{x90} ist das 90. Perzentil der Tagesmaximumtemperatur im Referenzzeitraum (1971–2000).
10	csdi	Andauer von Kälteperioden	jährlich	Definition ETCCDI: Summe der zusammenhängenden Tage (mindestens 6), an denen das Tagesminimum $T_{\text{min}} < T_{n10}$ ist. T_{n10} ist das 10. Perzentil der Tagesminimumtemperatur im Referenzzeitraum (1971–2000).
11	wydi	Andauer von Wärmeperioden	jährlich	Definition ETCCDI: Summe der zusammenhängenden Tage (mindestens 6), an denen die Tagesmaximumtemperatur $T_{\text{max}} > T_{x90}$ ist. T_{x90} ist das 90. Perzentil der Tagesmaximumtemperatur im Referenzzeitraum (1971–2000).
12	hddheat17	Heizgradtage	jährlich	Summe der Differenz ($17^{\circ}\text{C} - T_{\text{mittel}}$) über alle Tage mit $T_{\text{mittel}} < 17^{\circ}\text{C}$; Einheit: Gradtag
13	gsl	Länge der Vegetationsperiode (growing season length)	jährlich	Anzahl der Tage zwischen der ersten Phase mit mindestens 6 Tagen $T_{\text{mittel}} > 5^{\circ}\text{C}$ und erster Phase nach dem 1.6. mit mindestens 6 Tagen $T_{\text{mittel}} < 5^{\circ}\text{C}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Anhang B Kennzahlen

Fortsetzung				
Nr.	Variablenname	Kennzahl-Name	Auswertezeitraum	Bemerkungen
Niederschlag				
14	pr	mittlere Niederschlagshöhe	monatlich, saisonal, jährlich	mittlerer Tagesniederschlag in mm
15	dd	Anzahl der Trockentage	saisonal, jährlich	Tage mit Niederschlag < 1mm
16	r1mm	Anzahl der Niederschlagstage	saisonal, jährlich	Tage mit Niederschlag \geq 1mm
17	r10mm	Anzahl moderater Niederschlagstage	saisonal, jährlich	Tage mit Niederschlag > 10mm
18	r20mm	Anzahl starker Niederschlagstage	saisonal, jährlich	Tage mit Niederschlag > 20mm
19	r95ptot	starke Niederschlagsmenge	jährlich	Definition ETCCDI: akkumulierte Niederschlagsmenge aller Tage mit Tagesniederschlag oberhalb des 95% Schwellwertes, also der 5% niederschlagsreichsten Tage im Referenzzeitraum (1971–2000)
20	r99ptot	extreme Niederschlagsmenge	jährlich	Definition ETCCDI: akkumulierte Niederschlagsmenge aller Tage mit Tagesniederschlag oberhalb des 99% Schwellwertes, also der 1% niederschlagsreichsten Tage im Referenzzeitraum (1971–2000)
21	ddp	Anzahl von Trockenperioden	saisonal, jährlich	Häufigkeit von Perioden mit ununterbrochen aufeinander folgenden Trockentagen (dd) für die Klassen: 4–5, 6–7, 8–9, . . . 12–13, \geq 14 Tage
22	wdp	Anzahl von Regenperioden	saisonal, jährlich	Häufigkeit von Perioden mit ununterbrochen aufeinander folgenden Niederschlagstagen (wd) für die Klassen: 4–5, 6–7, 8–9, . . . 12–13, \geq 14 Tage
Weitere				
23	sfcWind	mittlere bodennahe Windgeschwindigkeit	monatlich	mittlere Windgeschwindigkeit berechnet aus Tagesmittelwerten in 10m über Grund in m/s
24	rsds	mittlere Globalstrahlung	monatlich, saisonal, jährlich	mittlere Globalstrahlung berechnet aus Tagesmittelwerten am Boden in W/m^2

Grafikdateien für Ensembleabbildungen und Einzelmodelle

Im Rahmen des Projekts ReKliEs-De wurden eine umfangreiche Galerie von Grafiken für die Nutzer erarbeitet und zur Verfügung gestellt. Diese sind im so genannten Supplement enthalten. Der Link zum Supplement findet sich auf der Projekt-Webseite <http://reklies.hlnug.de/startseite/>. Beispiele für die Grafik-Arten sind im Benutzerhandbuch aufgeführt.

Das Supplement hat die folgenden Gliederungsebenen/Unterverzeichnisse:

- Info
- RCP26
- RCP85
- Einzelbilder

Das Unterverzeichnis `Info` enthält erläuterndes und ergänzendes Material, wie beispielsweise eine Anleitung zur Nutzung der Einzelbilder.

Das Unterverzeichnis `RCP26` enthält für die 24 im Rahmen von ReKliEs-De ausgewählten Kennzahlen zusammenfassende Bilddateien in Form von pdfs. Diese teilen sich in zwei Gruppen auf:

(i) im Verzeichnis `Ensembleabbildung` sind für jede Kennzahl die verfügbaren Linienplots, Balkendiagramme, Ensemble-Karten, Boxplots und Streudiagramme enthalten;

(ii) im Verzeichnis `Einzelmodelle` sind die gruppierten Karten der einzelnen, in ReKliEs-De untersuchten Modell-Kombinationen enthalten.

Das Unterverzeichnis `RCP85` enthält die analogen Dateien für die Projektionen mit dem Antrieb RCP8.5.

Das Unterverzeichnis `Einzelbilder` enthält alle Grafiken im Format jpg bzw. png.

Anhang C Grafikdateien für Ensembleabbildungen und Einzelmodelle

Tabelle C.1: Inhalt der Verzeichnisse .../.../Ensembleabbildungen und .../.../Einzelmodelle

Kennzahl	Szenario	Filename	Größe (MB)
tas	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/01_ReKliEs_Plots_tas_RCP26.pdf	22
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/01_ReKliEs_Plots_tas_RCP85.pdf	29
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/01_ReKliEs_Panels_tas_RCP26.pdf	118
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/01_ReKliEs_Panels_tas_RCP85.pdf	310
id	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/02_ReKliEs_Plots_id_RCP26.pdf	7
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/02_ReKliEs_Plots_id_RCP85.pdf	10
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/02_ReKliEs_Panels_id_RCP26.pdf	21
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/02_ReKliEs_Panels_id_RCP85.pdf	59
fd	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/03_ReKliEs_Plots_fd_RCP26.pdf	6
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/03_ReKliEs_Plots_fd_RCP85.pdf	9
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/03_ReKliEs_Panels_fd_RCP26.pdf	24
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/03_ReKliEs_Panels_fd_RCP85.pdf	64
su	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/04_ReKliEs_Plots_su_RCP26.pdf	6
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/04_ReKliEs_Plots_su_RCP85.pdf	10
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/04_ReKliEs_Panels_su_RCP26.pdf	23
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/04_ReKliEs_Panels_su_RCP85.pdf	64
su30	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/05_ReKliEs_Plots_su30_RCP26.pdf	6
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/05_ReKliEs_Plots_su30_RCP85.pdf	10
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/05_ReKliEs_Panels_su30_RCP26.pdf	21
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/05_ReKliEs_Panels_su30_RCP85.pdf	58
tr	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/06_ReKliEs_Plots_tr_RCP26.pdf	5
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/06_ReKliEs_Plots_tr_RCP85.pdf	8
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/06_ReKliEs_Panels_tr_RCP26.pdf	21
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/06_ReKliEs_Panels_tr_RCP85.pdf	57
dtr	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/07_ReKliEs_Plots_dtr_RCP26.pdf	21
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/07_ReKliEs_Plots_dtr_RCP85.pdf	30
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/07_ReKliEs_Panels_dtr_RCP26.pdf	97
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/07_ReKliEs_Panels_dtr_RCP85.pdf	254
tx10p	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/08_ReKliEs_Plots_tx10p_RCP26.pdf	6
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/08_ReKliEs_Plots_tx10p_RCP85.pdf	9
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/08_ReKliEs_Panels_tx10p_RCP26.pdf	25
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/08_ReKliEs_Panels_tx10p_RCP85.pdf	59
tx90p	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/09_ReKliEs_Plots_tx90p_RCP26.pdf	6
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/09_ReKliEs_Plots_tx90p_RCP85.pdf	9
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/09_ReKliEs_Panels_tx90p_RCP26.pdf	22
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/09_ReKliEs_Panels_tx90p_RCP85.pdf	58
csdi	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/10_ReKliEs_Plots_csdi_RCP26.pdf	6
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/10_ReKliEs_Plots_csdi_RCP85.pdf	9
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/10_ReKliEs_Panels_csdi_RCP26.pdf	22
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/10_ReKliEs_Panels_csdi_RCP85.pdf	54

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung

<i>Kennzahl</i>	<i>Szenario</i>	<i>Filename</i>	<i>Größe (MB)</i>
wsdi	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/11_ReKliEs.Plots_wsdi_RCP26.pdf	5
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/11_ReKliEs.Plots_wsdi_RCP85.pdf	9
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/11_ReKliEs.Panels_wsdi_RCP26.pdf	22
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/11_ReKliEs.Panels_wsdi_RCP85.pdf	57
hddheat17	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/12_ReKliEs.Plots_hddheat17_RCP26.pdf	5
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/12_ReKliEs.Plots_hddheat17_RCP85.pdf	8
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/12_ReKliEs.Panels_hddheat17_RCP26.pdf	22
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/12_ReKliEs.Panels_hddheat17_RCP85.pdf	57
gsl	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/13_ReKliEs.Plots_gsl_RCP26.pdf	6
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/13_ReKliEs.Plots_gsl_RCP85.pdf	10
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/13_ReKliEs.Panels_gsl_RCP26.pdf	26
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/13_ReKliEs.Panels_gsl_RCP85.pdf	65
pr	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/14_ReKliEs.Plots_pr_RCP26.pdf	30
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/14_ReKliEs.Plots_pr_RCP85.pdf	42
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/14_ReKliEs.Panels_pr_RCP26.pdf	104
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/14_ReKliEs.Panels_pr_RCP85.pdf	271
dd	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/15_ReKliEs.Plots_dd_RCP26.pdf	14
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/15_ReKliEs.Plots_dd_RCP85.pdf	17
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/15_ReKliEs.Panels_dd_RCP26.pdf	123
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/15_ReKliEs.Panels_dd_RCP85.pdf	309
r1mm	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/16_ReKliEs.Plots_r1mm_RCP26.pdf	14
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/16_ReKliEs.Plots_r1mm_RCP85.pdf	16
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/16_ReKliEs.Panels_r1mm_RCP26.pdf	110
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/16_ReKliEs.Panels_r1mm_RCP85.pdf	276
r10mm	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/17_ReKliEs.Plots_r10mm_RCP26.pdf	23
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/17_ReKliEs.Plots_r10mm_RCP85.pdf	31
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/17_ReKliEs.Panels_r10mm_RCP26.pdf	122
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/17_ReKliEs.Panels_r10mm_RCP85.pdf	306
r20mm	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/18_ReKliEs.Plots_r20mm_RCP26.pdf	23
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/18_ReKliEs.Plots_r20mm_RCP85.pdf	31
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/18_ReKliEs.Panels_r20mm_RCP26.pdf	108
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/18_ReKliEs.Panels_r20mm_RCP85.pdf	272
r95ptot	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/19_ReKliEs.Plots_r95ptot_RCP26.pdf	8
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/19_ReKliEs.Plots_r95ptot_RCP85.pdf	13
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/19_ReKliEs.Panels_r95ptot_RCP26.pdf	23
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/19_ReKliEs.Panels_r95ptot_RCP85.pdf	62
r99ptot	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/20_ReKliEs.Plots_r99ptot_RCP26.pdf	7
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/20_ReKliEs.Plots_r99ptot_RCP85.pdf	11
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/20_ReKliEs.Panels_r99ptot_RCP26.pdf	22
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/20_ReKliEs.Panels_r99ptot_RCP85.pdf	57

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Anhang C Grafikdateien für Ensembleabbildungen und Einzelmodelle

Fortsetzung

<i>Kennzahl</i>	<i>Szenario</i>	<i>Filename</i>	<i>Größe (MB)</i>
ddp	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/21_ReKliEs_Plots_ddp_RCP26.pdf	5
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/21_ReKliEs_Plots_ddp_RCP85.pdf	5
wdp	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/22_ReKliEs_Plots_wdp_RCP26.pdf	5
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/22_ReKliEs_Plots_wdp_RCP85.pdf	5
sfcWind	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/23_ReKliEs_Plots_sfcWind_RCP26.pdf	20
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/23_ReKliEs_Plots_sfcWind_RCP85.pdf	27
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/23_ReKliEs_Panels_sfcWind_RCP26.pdf	85
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/23_ReKliEs_Panels_sfcWind_RCP85.pdf	218
rsds	RCP2.6	rcp26/Ensembleabbildungen/24_ReKliEs_Plots_rsds_RCP26.pdf	19
	RCP8.5	rcp85/Ensembleabbildungen/24_ReKliEs_Plots_rsds_RCP85.pdf	27
	RCP2.6	rcp26/Einzelmodelle/24_ReKliEs_Panels_rsds_RCP26.pdf	74
	RCP8.5	rcp85/Einzelmodelle/24_ReKliEs_Panels_rsds_RCP85.pdf	165

ReKliEs-De-Projektbegleitgruppe

Prof. Dr. Thomas Schmid

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Prof. Dr. Daniela Jacob

Climate Service Center Germany

Dr. Paul Becker

Deutscher Wetterdienst

PD Dr. Achim Daschkeit

Umweltbundesamt, KomPass

Vertreter des Bund-Länder-Fachgesprächs „Klimafolgen und Anpassung“

Carsten Linke

Landesamt für Umwelt Brandenburg

Vertreter des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler
Klimaprojektionen“

Dr. Heike Hübener

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

