

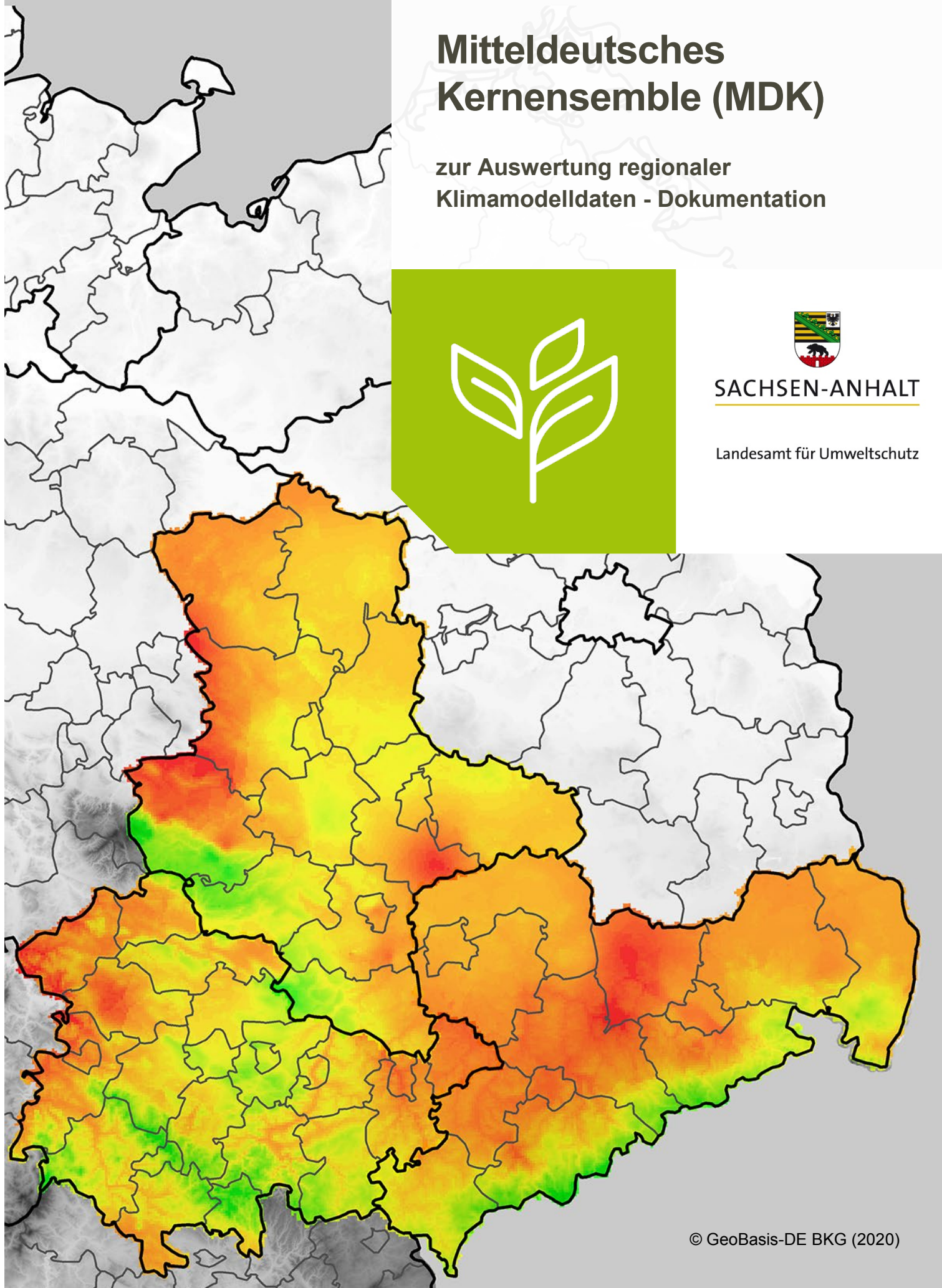
Mitteldeutsches Kernensemble (MDK)

zur Auswertung regionaler
Klimamodelldaten - Dokumentation



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz



Impressum

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Sächsisches Landesamt für Umwelt, Land-
wirtschaft und Geologie (LfULG),
Dr. Johannes Franke



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz

Landesamt für Umweltschutz
Sachsen-Anhalt (LAU),
Stefan Struve, Irene Ehlert, Dr. Marcus Eich-
horn

Freistaat
Thüringen



Landesamt für
Umwelt, Bergbau
und Naturschutz

Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau
und Naturschutz (TLUBN),
Dr. Kai Pfannschmidt, Frank Heyner, Tobias
Neumann



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Technische Universität Dresden, Institut für
Hydrologie und Meteorologie, Professur für
Meteorologie (TU Dresden),
Dr. Rico Kronenberg

Herausgeber:

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU)
Fachgebiet Klima, Erneuerbare Energie, Nachhaltigkeit, Umweltallianz, Geschäftsstelle AG
Klima
Reideburger Straße 47
06116 Halle
Tel.: +49 345 5704 0
Fax: +49 345 5704 505
E-Mail: lau_klima@lau.mlu.sachsen-anhalt.de
Internet: <https://lau.sachsen-anhalt.de>

Zitiervorschlag für diese Dokumentation:

„Struve, Ehlert, Pfannschmidt, Heyner, Franke, Kronenberg, Eichhorn, 2020: Mitteldeutsches
Kernensemble zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten – Dokumentation – Version 1.0
(2020), Halle (Saale), März 2020“

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
1. Hintergrund und Einordnung	7
2. Motivation und Selbstverständnis des Mitteldeutschen Kernensembles	10
3. Zielstellung der Arbeiten am Mitteldeutschen Kernensemble	11
4. Anwendungszweck	12
5. Der Weg zum Mitteldeutschen Referenz- und Kernensemble	14
5.1 Grundsätzliche Überlegungen und Festlegungen	14
5.2 Bestimmung des Referenzensembles	16
5.2.1 Erfassung der Grundgesamtheit an zur Verfügung stehenden Projektionen; Stichtagsregelung	17
5.2.2 Ausschluss von Projektionen aus objektiven Gründen	17
5.2.3 Ausschluss von Projektionen aus anwendungsspezifischen Gründen	20
5.2.4 Ausschluss aufgrund der durchgeführten Qualitätskontrolle	20
5.3 Das Referenzensemble	21
6. Die Reduktionsmethode des DWD	21
7. Das Mitteldeutsche Kernensemble	22
7.1 Mitteldeutsches Kernensemble für das Szenario RCP2.6 (Version 1.0)	22
7.2 Mitteldeutsches Kernensemble für das Szenario RCP4.5 (Version 1.0)	22
7.3 Mitteldeutsches Kernensemble für das Szenario RCP8.5 (Version 1.0)	23
8. Erläuterungen zum Mitteldeutschen Kernensemble	23
8.1 Auswertung und Bias-Adjustierung	23
8.2 Aktualisierung und Nutzungszeitraum	25
Anhang	27
A) Einordnung der Ergebnisse des Mitteldeutschen Kernensembles	27
B) Informationen zu den Modelldaten	29
C) Mitteldeutsche Qualitätskontrolle	30
I. Vorbemerkungen	30
II. Temperatur	33
III. Niederschlag	40
IV. Ergebnis der Qualitätskontrolle	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bevölkerungsentwicklung und Primärenergieverbrauch bis 2100 nach den RCP-Szenarien	8
Abbildung 2:	RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht.....	8
Abbildung 3:	Zeitreihe der globalen jährlichen Lufttemperaturanomalien im Vergleich zu 1986-2005 auf Basis des CMIP5-Ensembles für vier Szenarien	9
Abbildung 4:	Übersicht der verbliebenen Projektionen (exklusive EPISODES und WETTREG18) und Angabe der nach 5.2.2 ausgeschlossenen Projektionen mit Angabe des Ausschlussdatums.	19
Abbildung 5:	Liste der mit EPISODES regionalisierten Klimaprojektionen	20
Abbildung 6:	Boxplot der Temperaturänderung im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 für das Kern- (links) und Referenzensemble (rechts).	27
Abbildung 7:	Boxplot der Niederschlagsänderung im Winter (DJF) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 für das Kern- (links) und Referenzensemble (rechts).....	28
Abbildung 8:	Boxplot der Niederschlagsänderung im Sommer (JJA) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 für das Kern- (links) und Referenzensemble (rechts).....	28
Abbildung 9:	Betrachteter Raum für die Qualitätskontrolle (Mitteldeutscher Raum) Ländergrenzen: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2011	31
Abbildung 10:	Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang der Temperatur (<i>tas</i>) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und der betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX	33
Abbildung 11:	Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang der Temperatur (<i>tas</i>) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und der betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES	34
Abbildung 12:	Taylordiagramm für die Temperatur (<i>tas</i>). Erzeugt aus den langjährig monatlich und räumlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX. Auf der x- und y-Achse ist die Standardabweichung aufgetragen. Der Korrelationskoeffizient ist auf dem äußeren Kreisstück aufgetragen und durch die grauen, gestrichelten Linien ablesbar. Der RMSE wird durch die grauen, durchgezogenen Halbkreise dargestellt.	36
Abbildung 13:	Taylordiagramm für die Temperatur (<i>tas</i>). Erzeugt aus den langjährig monatlich und räumlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES. Auf der x- und y-Achse ist die Standardabweichung aufgetragen. Der Korrelationskoeffizient ist auf dem äußeren Kreisstück aufgetragen und durch die grauen, gestrichelten Linien ablesbar. Der RMSE wird durch die grauen, durchgezogenen Halbkreise dargestellt.	37

Abbildung 14: Taylordiagramm für die Temperatur (<i>tas</i>). Erzeugt aus pro Gitterzelle zeitlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX	38
Abbildung 15: Taylordiagramm für die Temperatur (<i>tas</i>). Erzeugt aus pro Gitterzelle zeitlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES	39
Abbildung 16: Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang des Niederschlags (<i>pr</i>) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX	40
Abbildung 17: Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang des Niederschlags (<i>pr</i>) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES	41
Abbildung 18: Taylordiagramm für den Niederschlag <i>pr</i> , räumlich und langjährig monatlich gemittelt. Dargestellt ist der Zusammenhang des Jahresgangs des Niederschlags anhand des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX. ...	42
Abbildung 19: Taylordiagramm für den Niederschlag <i>pr</i> , räumlich und langjährig monatlich gemittelt. Dargestellt ist der Zusammenhang des Jahresgangs des Niederschlags anhand des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES	43
Abbildung 20: Taylordiagramm für den Niederschlag (<i>pr</i> zeitlich gemittelt). Dargestellt ist der Zusammenhang der räumlichen Struktur der Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX.	45
Abbildung 21: Taylordiagramm für den Niederschlag (<i>pr</i> zeitlich gemittelt). Dargestellt ist der Zusammenhang der räumlichen Struktur der Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES	46
Abbildung 22: Taylordiagramm für <i>pr</i> , langjährig monatlich gemittelt. Dies zeigt den Zusammenhang zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX mit räumlicher und zeitlicher (Jahresgang) Komponente auf	47
Abbildung 23: Taylordiagramm für <i>pr</i> , langjährig monatlich gemittelt. Dies zeigt den Zusammenhang zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES mit räumlicher und zeitlicher (Jahresgang) Komponente auf	48
Abbildung 24: Mittlerer absoluter Fehler (Mean Absolut Error - <i>MAE</i>) für Niederschlag (<i>pr</i>) zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert unten rechts.....	50
Abbildung 25: Mittlerer absoluter Fehler (Mean Absolut Error - <i>MAE</i>) für Niederschlag (<i>pr</i>) zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert unten rechts.....	51

Abbildung 26: Pearson-Korrelationskoeffizient für den Niederschlag pr zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert der Korrelationskoeffizienten ist unten rechts eingetragen.	53
Abbildung 27: Pearson-Korrelationskoeffizient für den Niederschlag pr zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert der Korrelationskoeffizienten ist unten rechts eingetragen.	54
Abbildung 28: Taylordiagramme für Andauerkenngößen Trocken- (cdd , links) und Niederschlagsperioden (cwd , rechts) für die Modelldaten aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX (oben) und EPISODES (unten).....	58
Abbildung 29: Relative Abweichung der Anzahl an Niederschlagstagen (Tagesniederschlag $\geq 1\text{mm}$) in den Modelldaten aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX zur Beobachtung HYRAS.....	59
Abbildung 30: Relative Abweichung der Anzahl an Niederschlagstagen (Tagesniederschlag $\geq 1\text{mm}$) in den Modelldaten aus EPISODES zur Beobachtung HYRAS.....	60
Abbildung 31: Relative Abweichung des 99. Perzentil der Tagesniederschlagsverteilung (Tage mit Tagesniederschlag $< 0,1\text{mm}$ ausgeschlossen) aus Modelldaten aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX zur Beobachtung HYRAS.....	62
Abbildung 32: Relative Abweichung des 99. Perzentil der Tagesniederschlagsverteilung (Tage mit Tagesniederschlag $< 0,1\text{mm}$ ausgeschlossen) aus Modelldaten aus EPISODES zur Beobachtung HYRAS.....	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für die Aufnahme in das Referenzensemble notwendige Klimavariablen und deren Abkürzung.....	15
Tabelle 2: Liste der im Mitteldeutschen Referenzensemble enthaltenen Klimaprojektionen	21
Tabelle 3: Pattern Correlation ($paco$) für zeitlich gemittelten Niederschlag zwischen Modell- und Beobachtungsdaten.....	56

1. Hintergrund und Einordnung

Eine wesentliche Grundlage der Klimaforschung bilden Klimadaten. Für die Untersuchung der Klimaentwicklung der jüngeren Vergangenheit wird auf Beobachtungsdaten, also Messdaten, zurückgegriffen. Analysen einer möglichen zukünftigen Entwicklung des Klimas basieren dagegen auf Klimamodelldaten.

Klimamodelle sind hochkomplexe und dennoch vereinfachte Darstellungen der Realität und beruhen auf physikalischen Gesetzen und chemischen Prozessen, die mit Hilfe mathematischer Gleichungen beschrieben werden. Sie bilden die unterschiedlichen Komponenten des Klimasystems – wie Atmosphäre oder Biosphäre – ab und setzen die sich darin ablaufenden Vorgänge miteinander ins Verhältnis (Wechselwirkung). Dadurch kann die Klimaentwicklung der Zukunft projiziert bzw. der Vergangenheit rekonstruiert werden.

Es wird unterschieden zwischen globalen und regionalen Klimamodellen. *Globalmodelle* bilden anhand eines grob aufgelösten Gittermodells die gesamte Erde ab. *Regionalmodelle* sind dagegen höher aufgelöst und bilden einen Teil der Erde ab. Regionalmodelle werden von den Globalmodellen angetrieben, das heißt, sie verwenden die Ausgabegrößen von Globalmodellen, wie Temperatur- und Niederschlagsentwicklung, als Eingangsgrößen.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen werden **Projektionen** genannt. Diese werden nicht als gesicherte Prognosen angesehen, da Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Klimawandel existieren (z. B. zukünftige Treibhausgasentwicklung). Vielmehr geben sie eine auf dem aktuellen Wissensstand basierende, mögliche zukünftige Entwicklung des komplexen Systems Klima wieder.

Die Projektionen stützen sich auf **Klimaszenarien**. Diese stellen unterschiedliche zukünftige Entwicklungspfade der anthropogenen Einflussfaktoren des Klimas dar und definieren damit die Randbedingungen für die Modellrechnungen. Dazu gehören beispielsweise die Bevölkerungsentwicklung, der Primärenergieverbrauch, die Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen oder dem Umfang von Klimaschutzaktivitäten der Weltgemeinschaft (Abbildung 1).

Im Ergebnis der Modellierung entstehen – je nach verwendeten Globalmodell, Regionalmodell sowie Klimaszenario – differenzierte Ergebnisse, welche die Entwicklung der Klimavariablen (Temperatur, Luftfeuchte, u.v.m.) in der Regel bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fortschreiben.

Die Gesamtheit der sich aus der Kombination von verwendetem Klimamodell und betrachtetem Klimaszenario ergebenden Projektionen wird als **Ensemble** bezeichnet. Die Zusammenfassung aller Ergebnisse der Projektionen des Ensembles beschreibt die **Bandbreite** der zukünftigen Klimaentwicklung. Unterschieden wird zwischen dem **Referenzensemble** (Grundgesamtheit der für einen bestimmten Raum und ein bestimmtes Szenario in Betracht gezogenen Projektionen) und dem **Kernensemble** (repräsentative Auswahl von Projektionen aus dem Referenzensemble).

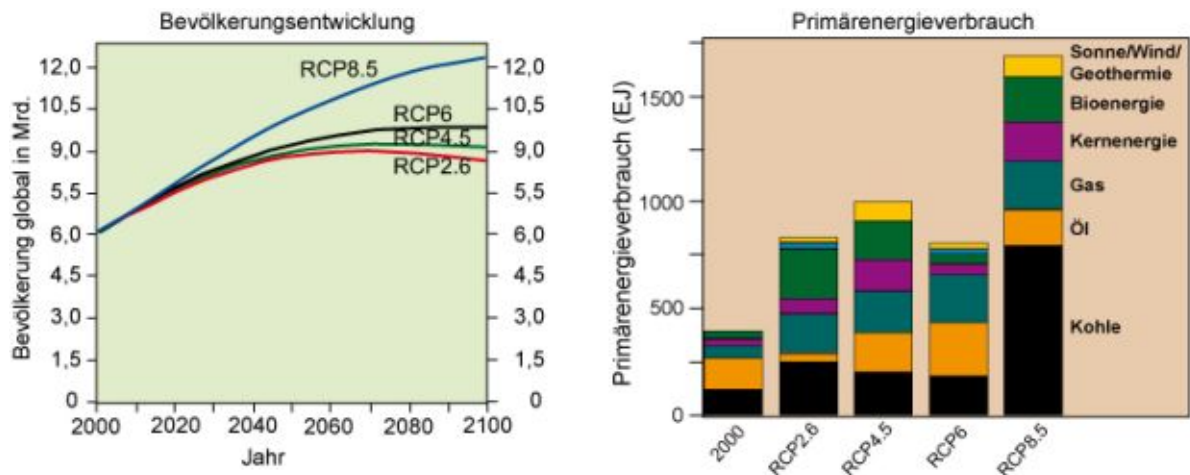


Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung und Primärenergieverbrauch bis 2100 nach den RCP-Szenarien

Für den fünften Sachstandsbericht (AR5) des IPCC wurden vier Klimaszenarien (Representative Concentration Pathways – *RCP-Szenarien*) zur Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung erarbeitet (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 sowie RCP8.5)². Sie vereinen jeweils verschiedene der bereits beschriebenen Annahmen in sich. Im Ergebnis kann jedem der vier RCP-Szenarien eine bestimmte Treibhausgaskonzentration zum Ende des Jahrhunderts zugeordnet werden (Abbildung 2). Aus diesen Treibhausgaskonzentrationen resultiert ein entsprechender zusätzlicher Strahlungsantrieb³ (RCP8.5 entspricht einem zusätzlichen Strahlungsantrieb von 8,5 W/m² gegenüber der natürlichen Strahlungsbilanz der Erde). RCP-Szenarien stellen die aktuelle Generation der Klimaszenarien dar.

RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht				
Bezeichnung	RCP8.5	RCP6.0	RCP4.5	RCP2.6
Treibhausgaskonzentration im Jahre 2100	1370 ppm CO ₂ -äq	850 ppm CO ₂ -äq	650 ppm CO ₂ -äq	400 ppm CO ₂ -äq
Strahlungsantrieb 1850-2100	8,5 W/m ²	6,0 W/m ²	4,5 W/m ²	2,6 W/m ²
Einstufung	sehr hoch	hoch	mittel	sehr niedrig

Abbildung 2: RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht

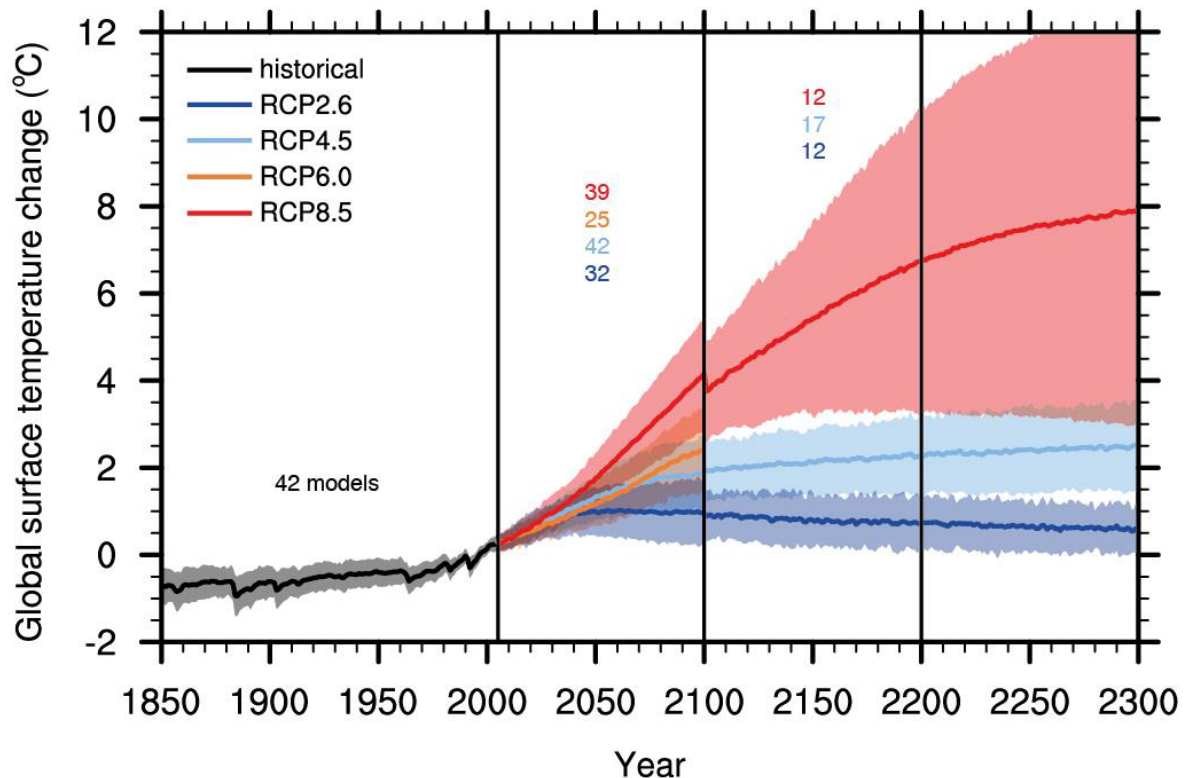
Im Ergebnis der Klimamodellrechnungen können die auf den Szenarien basierenden Treibhausgaskonzentrationen (und dem sich daraus ergebenden Strahlungsantrieb) in zu erwartende Änderungssignale, zum Beispiel für die Temperatur, überführt werden (Abbildung 3).

¹ Kasang, Dieter: RCP-Szenarien, in: Internetseite Hamburger Bildungsserver; URL:

<https://bildungsserver.hamburg.de/unsicherheiten-und-szenarien/4105604/rcp-szenarien/>, abgerufen am 05.11.2019.

² Van Vuuren, D.P., et al. (2011): The representative concentration pathways: an overview, in: Climatic Change 109: 5-31 (2011), S.7-8

³ Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Änderung der Strahlungsbilanz der Erde, verursacht durch Klimafaktoren, wie bspw. Treibhausgase.



4

Abbildung 3: Zeitreihe der globalen jährlichen Lufttemperaturanomalien im Vergleich zu 1986-2005 auf Basis des CMIP5-Ensembles für vier Szenarien

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die resultierenden Temperaturänderungen gegen Ende des Jahrhunderts (2081-2100) deutlich voneinander.

Der aus dem RCP2.6 resultierende globale Anstieg der Lufttemperatur liegt im Mittel über alle verwendeten Projektionen (CMIP5-Ensemble) bei 1,0 Kelvin (K) gegenüber der Periode 1986-2005. Berücksichtigt man die Bandbreite liegt der zu erwartende Temperaturanstieg bei 0,3 K bis 1,7 K⁵.

Für das Szenario RCP4.5 ergibt sich im Mittel ein Temperaturanstieg von 1,8 K (Bandbreite 1,1 K bis 2,6 K).

Das Szenario RCP6.0 weist im Mittel ein Temperaturanstieg von 2,2 K (Bandbreite 1,4 K bis 3,1 K) aus.

Im Mittel ergibt sich für das Szenario RCP8.5 ein Temperaturanstieg in Höhe von 3,7 K (Bandbreite 2,6 K bis 4,8 K).

Das Szenario RCP2.6 wird auch als „Klimaschutz“-Szenario bezeichnet. Im Gegensatz dazu spricht man bei dem Szenario RCP8.5 vom „Weiter-wie-bisher“-Szenario.

⁴ IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., S.89, Figure TS.15

⁵ Vgl. IPCC, 2013: S.90, Table TS.1

2. Motivation und Selbstverständnis des Mitteldeutschen Kernensembles

Die oben gezeigte Klimaentwicklung auf Basis von Globalmodellen eignet sich auf Grund ihrer vergleichsweise geringen räumlichen Auflösung nicht für regionale Betrachtungen. In der jüngeren Vergangenheit gab es umfangreiche Aktivitäten zur Regionalisierung von Klimaprojektionen für die Gebiete Europa und Deutschland. Auf Basis der CMIP5-Globalprojektionen und den Regionalisierungsprojekten EURO-CORDEX⁶, ReKliEs-De⁷ sowie durch die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelte statistische Regionalisierungsmethode EPISODES⁸ liegen erstmals eine für den Anwender kaum zu überschauende Anzahl an regionalisierten Klimaprojektionen vor. Eine umfangreiche Auswertung sämtlicher Projektionen ist ohne eine entsprechend leistungsfähige IT-Infrastruktur nur schwer zu realisieren.

Klimaprojektionen sind keine Prognosen. Sie besitzen keine Eintrittswahrscheinlichkeit und existieren untereinander gleichberechtigt. Das bedeutet, eine Klimaänderung, die nur auf wenigen Projektionen beruht, sollte nicht automatisch als unrealistisch eingestuft werden. Umgekehrt sind Klimaänderungen, die auf verhältnismäßig vielen Projektionen basieren, nicht zwingend zutreffend. Folglich verbietet es sich auf den ersten Blick aus wissenschaftlicher Sicht eine willkürliche Auswahl vorzunehmen, da kein Argument für eine zufällige Berücksichtigung oder Nichtberücksichtigung einer Projektion angeführt werden kann.

Der Zweck eines Kernensembles besteht jedoch darin, eine Auswertung auf Basis weniger ausgesuchter Klimaprojektionen durchzuführen um den notwendigen Rechen- und Zeitaufwand zu minimieren. Die Reduzierung des Ensembleumfangs erfolgt dabei mit der Zielsetzung, den mit ihr verbundenen Informationsverlust so gering wie möglich zu halten und damit die Bandbreite der Änderung der einzelnen Klimavariablen (sowie die Gesamtbandbreite über möglichst alle Klimavariablen) weitestgehend zu erhalten. Die Reduzierung kann daher nicht willkürlich erfolgen (siehe dazu Kapitel 6).

Die Motivation zur Entwicklung eines regionalen Kernensembles basiert neben der oben genannten Erleichterung in der Anwendung auf der Erwartung, regionale Änderungsbandbreiten verlässlicher abbilden zu können, als dies mit generalisierten, deutschlandweiten Ensembles möglich wäre. Vor diesem Hintergrund wurde 2018 im Rahmen des ReKIS-Verbundes – bestehend aus dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), dem Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU), dem Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) sowie der Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie (TU Dresden) – der Beschluss gefasst, ein eigenes Kernensemble zu identifizieren. Im Hinblick auf die Nutzung einer einheitlichen Methodik und Datengrundlage und für eine solide Politikberatung

⁶ <https://euro-cordex.net/>

⁷ <http://reklies.hlnug.de/home/>

⁸

<https://www.dwd.de/DE/leistungen/episodes/episodes.html;jsessionid=2DA646E8B6760510B958573344CA7794.live21073?nn=645608>

innerhalb der jeweiligen Bundesländer ist es angebracht, eine abgestimmte Vorgehensweise zu etablieren.

Das „Mitteldeutsch Kernensemble“ versteht sich dabei ausdrücklich als Empfehlung. Sofern genügend Kapazität zur Verfügung steht, empfehlen die Autoren alle verfügbaren Informationen (Projektionen) auszuwerten. Es ist weiterhin nicht ausgeschlossen, dass bestimmte Fragestellungen eine andere Zusammensetzung der vorliegenden Projektionen rechtfertigen oder eine grundsätzlich andere Herangehensweise an die Zusammenstellung von Klimamodellensembles angebracht sein kann.

3. Zielstellung der Arbeiten am Mitteldeutschen Kernensemble

Im Jahr 2018 veröffentlichte der Deutsche Wetterdienst das „DWD-Kern-Ensemble v2018“⁹ für drei RCP-Szenarien. Dieses Kernensemble wurde für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland entwickelt und gewährleistet, dass – entsprechend der Zielstellung – eine größtmögliche Abdeckung der Bandbreite der Änderungssignale der Projektionen über dieses Gebiet realisiert wird. Eine bundeseinheitliche Auswertung sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Regionen in Deutschland sind damit gegeben.

Verschiedenartige naturräumliche Gegebenheiten und deren unterschiedliche klimatische Ausprägungen – beispielsweise bezüglich des Niederschlagsregimes einer Mittelgebirgsregion und dem mitteldeutschen Trockengebiet – müssen im Mitteldeutschen Kernensemble Berücksichtigung finden und abgebildet werden. Es wird unterstellt, dass naturräumliche Gegebenheiten nicht nur den Istzustand des Klimas beeinflussen, sondern auch in Zukunft maßgeblich für die Ausprägung des Klimas verantwortlich sind: Je unterschiedlicher die betrachteten Naturräume sind, desto größer ist die abzubildende Spannbreite der zukünftigen Änderungen der Klimavariablen.

Dieser Annahme folgend ist die Größe des betrachteten Gebietes (und damit die Auffächerung der Spannbreite aufgrund der Unterschiedlichkeit aller darin vorkommenden Naturräume) ein entscheidender Faktor für die Repräsentativität eines jeden Ensembles. Denn: Ein Ensemble liefert immer nur im Mittel über das gesamte betrachtete Gebiet bestmögliche Ergebnisse. Innerhalb des betrachteten Gebietes können Regionen (oder wenige Gitterzellen) existieren, die von dem Kernensemble vergleichsweise gut repräsentiert werden (hohe Bandbreitenabdeckung). Andere Gebiete wiederum können demgegenüber eine verhältnismäßig schlechtere Bandbreitenabdeckung besitzen.

Der angestrebte möglichst vollständige Bandbreitenerhalt eines Kernensembles gegenüber der Grundgesamtheit an zur Verfügung stehenden Projektionen hängt damit - neben weiteren Faktoren wie bspw. der Reduktionsmethodik – von der Größe und naturräumlichen Spezifik des betrachteten Gebietes ab. Je kleiner das betrachtete Gebiet, desto weniger Verluste der maximal möglichen Bandbreite über alle Projektionen sind zu erwarten, da die Natur-

⁹ o. V.: Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien, in: Internetseite Deutscher Wetterdienst; URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_rcp-datensatz_node.html, abgerufen am 05.11.2019.

räume sich in der Regel weniger stark unterscheiden dürften. Im Umkehrschluss bedeutet das jedoch nicht, dass (theoretisch) ein Kernensemble für jede einzelne Gitterzelle oder lokale Region sinnvoll und zielführend ist. Es handelt sich um Modelle und Projektionen, die bei zu kleinskaliger Betrachtung zu einer Überschätzung der Ergebnissicherheit führen können.

Die Intention bestand daher darin, ein regional fokussiertes Kernensemble zu entwickeln, zukünftig fortzuschreiben und bereitzuhalten, dass sowohl hinsichtlich der Repräsentativität als auch hinsichtlich der Anwendungserfordernisse (siehe dazu 4) aus Sicht der drei beteiligten Landesämter einen Mehrwert gegenüber bisher existierenden Kernensembles bietet. Der regionale Fokus – den die drei Landesämter vorliegend vertreten – verlangt eine für die Region bestmögliche Repräsentativität des Kernensembles im Hinblick auf die regionale Aussagegüte, die keiner bundesweiten Vergleichbarkeit unterliegt. Mit dem vorliegenden Mitteldeutschen Kernensemble soll diese Zielstellung für den Mitteldeutschen Raum realisiert werden.

Eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Mitteldeutschen Kernensembles mit denen anderer Kernensembles (bspw. DWD-Kernensemble) ist aufgrund der nicht übereinstimmenden verwendeten Projektionen (Mitglieder des Ensembles) nicht gegeben und war auch nicht die Intention. Bundesweite Vergleichbarkeit von Ergebnissen der Klimaprojektionen kann bei Verwendung z. B. des Kernensembles des DWD gewährleistet werden.

4. Anwendungszweck

Die Auswertung aller verfügbaren Projektionen gibt die Gewissheit, über alle verfügbaren Informationen hinweg robuste Informationen zu generieren und eventuellen „Ausreißern“ kein übermäßiges Gewicht beizumessen, diese aber auch nicht zu ignorieren. Aus den oben genannten Kapazitätsgründen ist eine Auswertung aller verfügbaren Projektionen jedoch oft nicht möglich.

Lediglich ein Modell auszuwählen, birgt die Gefahr, die Ergebnisse in eine Richtung überzuinterpretieren. Es existiert weltweit eine Vielzahl an Forschungsgruppen, die jeweils mehr oder weniger eigenständig Modelle entwickeln. Folglich besitzt jedes Modell spezifische Stärken und Schwächen.

Die Verwendung eines Kernensembles stellt somit einen Kompromiss aus maximal möglichem Vertrauen in die erlangten Informationen und der Handhabbarkeit dar.

Durch die Auswertung der im Mitteldeutschen Kernensemble vertretenen Klimaprojektionen lassen sich auf Basis des aktuellen Wissensstandes Aussagen über die zukünftige Bandbreite der Entwicklung von Klimavariablen für den Mitteldeutschen Raum treffen. Auf der Grundlage dieses Erkenntnisgewinns können Handlungserfordernisse im Rahmen des Klimaschutzes begründet, sowie im Rahmen der Anpassung an die Folgen des Klimawandels abgeleitet werden.

Das Mitteldeutsche Kernensemble bietet die Möglichkeit vertrauenswürdige Aussagen mit einem vertretbaren Aufwand erzeugen zu können. Hierfür wurde für drei RCP-Szenarien – RCP2.6, RCP4.5 sowie RCP8.5 – eine Auswahl von jeweils sieben repräsentativen Mitgliedern getroffen. Genau genommen besteht das Mitteldeutsche Kernensemble somit aus drei

separaten Kernensembles, je nach verwendetem Szenario. Die darin enthaltenen Mitglieder unterscheiden sich voneinander. Der Rechenaufwand kann aufgrund der überschaubaren Anzahl an auszuwertenden Projektionen erheblich reduziert werden. Das Mitteldeutsche Kernensemble garantiert für jedes der drei Szenarien den größtmöglichen Erhalt der Gesamtbandbreite.

Der geplante Anwendungszweck kann die Zusammenstellung eines Kernensembles beeinflussen. Dieses Kernensemble dient dem Zweck der **allgemeinen klimatologischen Auswertung** der Projektionsergebnisse für die einschlägigen Klimavariablen wie Temperatur, Niederschlag, Feuchte sowie der Sonnenscheindauer. Ebenso dient es der Auswertung abgeleiteter Größen wie Temperaturkenntage, klimatischer Wasserbilanz oder Andauerwerte. Sämtliche Überlegungen im Rahmen der Erarbeitung dieses Kernensembles sind im Hinblick auf diesen Anwendungszweck getroffen worden.

Die Ergebnisse des Kernensembles dienen darüber hinaus für weiterführende Auswertungen im Rahmen der Wirkmodellierung, jedoch mit Einschränkungen.

Wirkmodelle benötigen als Modellinput zwingend ununterbrochene Zustandsgrößen der einzelnen Klimavariablen, in der Regel in hoher zeitlicher Auflösung. Hierfür müssen aber aufgrund der Konzeption von Wirkmodellen zunächst etwaige „Modellfehler“ (Bias = systematische Abweichung der Projektionsergebnisse der Vergangenheit von den Beobachtungsdaten desselben Zeitraums) der Klimamodelle quantifiziert und ggf. so weit wie möglich adjustiert werden (siehe auch 8.1). Der Bias ist dabei nicht als Fehler der Modelle an sich anzusehen. Vielmehr sind die in den Modellen verwendeten naturwissenschaftlichen Grundlagen und Annahmen nicht in der Lage die „Wirklichkeit der Beobachtungsdaten“ identisch abzubilden. Abweichungen zwischen Modell und Wirklichkeit stellen keine Besonderheit von Klimamodellen dar, sondern treffen auf alle Modelle, auch außerhalb der Klimatologie, zu. Im Übrigen sind auch Beobachtungsdaten unsicherheitsbehaftet, dieser Umstand wird nur weniger zur Kenntnis genommen.

Weiterhin können spezifische Fragestellungen (z. B. Wirkmodellierungen) einen anderen Fokus auf die Eigenschaften eines Kernensembles bedingen. Bei Wasserhaushaltsmodellierungen spielen die Kenngrößen Klimatische Wasserbilanz (KWB) und damit Temperatur, Feuchte und potentielle Verdunstung eine große Rolle. Die Bandbreitenabdeckung des Mitteldeutschen Kernensembles für diesen Anwendungszweck wurde nicht geprüft, da vorliegend die Bandbreitenabdeckung entsprechend der Reduktionsmethodik des DWD optimiert wurde (siehe dazu 6).

Auf eine Bias-Adjustierung der Modelldaten wurde verzichtet. Etwaige Modellfehler können für den Zweck einer allgemeinen klimatologischen Auswertung anderweitig berücksichtigt werden (siehe dazu 8).

5. Der Weg zum Mitteldeutschen Referenz- und Kernensemble

5.1 Grundsätzliche Überlegungen und Festlegungen

I. Unterscheidung nach Szenarien

Die vier RCP-Szenarien beschreiben verschiedene denkbare Entwicklungspfade der anthropogenen Einflussfaktoren des Klimas. Die Annahmen, die für das RCP8.5 getroffen wurden, unterscheiden sich teils erheblich von denen des RCP2.6. Grundsätzlich ist daher eine separate Auswertung der Klimaprojektionen pro RCP-Szenario notwendig. Eine Vermischung untereinander ist nicht zielführend.

Eine Vermischung der Szenarien würde keine Aussagen hinsichtlich der Notwendigkeit und Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen erlauben. Eine gesonderte Betrachtung verschiedener Szenarien erlaubt jedoch eine Gegenüberstellung zweier verschiedener Entwicklungspfade (und entsprechender Schlussfolgerungen für das menschliche Handeln).

Es ist daher aus Sicht der Autoren angebracht, die Auswertung der verschiedenen Szenarien separat durchzuführen.

II. Art der Regionalmodelle

Es existieren zwei verschiedene Typen von Regionalisierungsmethoden, die dynamischen Regional Climate Models (RCMs) und das statistische Empirical-Statistical Downscaling (ESD)¹⁰. Die zwei Modelltypen existieren gleichberechtigt nebeneinander, sollten daher in einem Kernensemble auch beide Verwendung finden. Auswertungen des Projektes Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) haben gezeigt, dass die Änderungssignale des Niederschlages einen Zusammenhang mit der Art der verwendeten Regionalmodelle aufweisen.¹¹ Eine Nichtberücksichtigung einer Regionalisierungsmethode hätte damit Auswirkungen auf die Richtung des Ensembles und muss vermieden werden.

III. Anzahl der Ensemblemitglieder

Die Anzahl der Ensemblemitglieder eines Kernensembles bemisst sich in erster Linie an den rechentechnischen Möglichkeiten der Anwender. Auch wenn inhaltliche Überlegungen (bspw. zur Robustheit der Ergebnisse) vorrangig zu berücksichtigen sind, so muss das Kernensemble dennoch handhabbar sein. Andernfalls könnte auf eine Reduzierung gänzlich verzichtet werden. Das Mitteldeutsche Kernensemble besteht aus jeweils sieben Mitgliedern pro Szenario.

IV. Bandbreitenabdeckung

Unterschiedliche Projektionen weisen unterschiedliche Änderungssignale auf, die in Summe die Bandbreite der zukünftigen Klimaänderung bilden. Die zu erwartenden Klimaänderung bewegt sich innerhalb dieser Bandbreiten. Erfolgt eine Reduzierung der Anzahl an Projektionen, so kann dies zu einer Reduzierung der Bandbreite führen. Der (möglichst vollständige) Erhalt dieser Ensemblebandbreite bei der Reduzierung des Referenzensembles auf Kern-

¹⁰ Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm, et al.: Regionale Klimamodellierung, in: Internetseite Klimanavigator, 26.01.2017, URL: <https://www.klimanavigator.eu/dossier/dossiers/033723/index.php>, abgerufen am 05.11.2019

¹¹ Hübner, Heike et al.: ReKliEs-De Ergebnisbericht, in: Internetseite ReKliEs-De/ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, 27.03.2019, URL: <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmp/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>, doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht, S.II, abgerufen am 05.11.2019

semblegröße ist dabei das Ziel. Hierzu wurde vom DWD eine Reduktionsmethode entwickelt und etabliert, die diese Anforderungen erfüllt.¹² Diese Reduktionsmethode kam bei der Erstellung des Mitteldeutschen Kernensembles zur Anwendung.

Sie wurde durch den DWD entsprechend der Aufgabenstellung jeweils für die verschiedenen RCPs durchgeführt, mit dem Ziel pro RCP den möglichst geringsten Informationsverlust hinsichtlich der Bandbreite zu erzielen. Somit ergab sich pro RCP-Szenario ein Kernensemble, wobei jedes Kernensemble verschiedene Modellkombinationen beinhaltet.

- ➔ Kernensemble RCP2.6
- ➔ Kernensemble RCP4.5
- ➔ Kernensemble RCP8.5

Auf ein Kernensemble zum Szenario RCP6.0 musste aufgrund nicht vorliegender Regionalisierungen verzichtet werden.

V. Referenzperiode

Die von der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organisation - WMO) definierte „Referenzperiode für den langfristigen Klimawandel 1961-1990“ gilt als klimatologische Bezugsbasis. Die Vergleichsperiode 1971-2000 hat sich ebenfalls teilweise etabliert. Vor dem Hintergrund der Festlegungen der WMO und der Tatsache, dass ein Großteil aller bisherigen Auswertungen in den drei Bundesländern auf dem Zeitraum 1961-1990 beruht (Vergleichbarkeit), wurde die Abdeckung der Referenzperiode 1961-1990 für die Berücksichtigung im Referenzensemble einer Projektion als Bedingung formuliert.

Projektionen, deren historische Läufe diese Periode nicht abdecken, konnten somit von vornherein keine Berücksichtigung finden und wurden von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

VI. Klimavariablen

Um eine möglichst umfassende Vielfalt an Klimaindikatoren betrachten zu können und um eine Datengrundlage für die Auswertung von Impaktmodellen zu gewährleisten, gilt als Voraussetzung für die Aufnahme in das Referenzensemble – analog zum Vorgehen des DWD – das Vorhandensein folgender Klimavariablen:

Tabelle 1: Für die Aufnahme in das Referenzensemble notwendige Klimavariablen und deren Abkürzung

Klimavariablen	Nomenklatur im Modell	Nomenklatur in ReKIS
Tagessumme des Niederschlags	<i>pr</i>	<i>RRU</i>
Tagesmittel, Tagesminimum und Tagesmaximum der Temperatur in 2m Höhe	<i>tas, tasmin, tas-max</i>	<i>TM0, TN0, TX0</i>
Tagessumme der Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer	<i>rsds, sund</i>	<i>GS0, SD0</i>

¹² Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., Walter, A. (2018): A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble, in: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57 (3), S. 477-491

Klimavariablen	Nomenklatur im Modell	Nomenklatur in ReKIS
Tagesmittel der relativen Feuchte oder spezifischen Feuchte in 2m Höhe	<i>hurs, huss</i>	<i>RF0, ---</i>
Tagesmittel der Windgeschwindigkeit in 10m Höhe	<i>sfcwind</i>	<i>FF0</i>
Tagesmittel des Bodenluftdrucks oder des auf Meereshöhe reduzierten Luftdrucks	<i>ps, psl</i>	<i>PP0</i>

VII. Räumliche Auflösung

„Auf Europa bezogene regionale Klimaprojektionen werden durch EURO-CORDEX koordiniert. Sie liegen in zwei räumlichen Auflösungen ($0,44^\circ = \text{ca. } 50 \text{ km}$ und $0,11^\circ = \text{ca. } 12,5 \text{ km}$) vor. Zusätzlich wurden für Deutschland im Rahmen des ReKliEs-De-Projekts [und durch das Regionalmodell EPISODES] die Anzahl verfügbarer regionaler Klimaprojektionen in einer räumlichen Auflösung von rund 12,5 km für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 erhöht.“⁹

Für das Referenzensemble wurden ausschließlich Regionalisierungen betrachtet, die in einer Auflösung von $0,11^\circ$ vorliegen.

VIII. Zeitliche Auflösung

Die in EURO-CORDEX, ReKliEs-De und durch EPISODES regionalisierten Projektionen liegen in mindestens täglicher Auflösung über alle Klimavariablen vor. Für bestimmte Anwendungszwecke kann auch eine höhere zeitliche Auflösung notwendig sein (Abflussmodellierung usw.). Hier müssen durch die jeweiligen Anwendergruppen eigene Lösungen erarbeitet werden (Stundengenerator o. ä.) bzw. an Modellierergruppen herangetreten werden, um möglicherweise zeitlich höher aufgelöste Daten zur Verfügung gestellt zu bekommen. Als zeitliche Mindestanforderung an die Projektionen für das Mitteldeutsche Referenzensemble wurde eine tägliche Auflösung definiert.

5.2 Bestimmung des Referenzensembles

Unter Umständen kommen nicht alle vorhandenen Projektionen für ein Referenzensemble in Betracht. Die Bestimmung eines Referenzensembles zählt zu den anspruchsvollsten Aufgaben innerhalb dieses Themenkomplexes. Diverse Überlegungen und Entscheidungen sind notwendig, die nicht immer auf rein objektiven Gründen basieren können. Die unter 5.1 beschriebenen Anforderungen an die Mitglieder des Referenzensembles besitzen daher teilweise subjektiven Charakter. Allgemeingültige Vorgaben existieren nicht, sie unterliegen dem jeweiligen Anforderungskatalog des Kernensembles und sind somit (inhaltlich) weder falsch noch richtig sondern zweckgebunden.

Anders verhält es sich mit der Beurteilung einzelner Projektionsergebnisse. Es existieren objektive Gründe, aus denen eine etwaige Nichtberücksichtigung erfolgen kann (siehe 5.2.2). Der Rückzug eines Modells oder Modelllaufes durch die Modellierergruppe selbst ist ein solcher Fall.

Ungleich schwieriger ist jedoch die subjektive Beurteilung, inwiefern ein objektiv nicht zu beanstandendes Modellergebnis für den geplanten Anwendungszweck in Frage kommt oder nicht.

Im vorliegenden Fall ist eine solche Auswahl erfolgt (Qualitätskontrolle). Dazu wurde versucht, subjektive Überlegungen in einen objektiven Bewertungsprozess (Qualitätskontrolle) zu überführen. Die durchgeführte Qualitätskontrolle hatte nicht zum Ziel, die Modelle oder Projektionen selbst zu beurteilen. Die Untersuchungen dienten dazu den Modelloutput hinsichtlich des angestrebten Verwendungszweckes zu bewerten. Untersucht wurde dabei, inwieweit einzelne Projektionen die Vergangenheit für das Untersuchungsgebiet im Vergleich zu einem gegitterten Beobachtungsdatensatz möglichst ähnlich simulieren. Zu beanstandende Abweichungen führten in Einzelfällen in letzter Konsequenz zum Ausschluss aus dem Referenzensemble (siehe dazu C).

Diese Bewertung erfordert Entscheidungen in dem nachfolgend beispielhaft aufgeführten Spannungsfeld. Die Begründung für einen etwaigen Ausschluss einer Projektion muss trotz des subjektiven Charakters nachvollziehbar und stichhaltig sein.

Modellkombinationen, die für die Vergangenheit Abweichungen zur beobachteten Realität aufzeigen, sind nicht per se auch in der Zukunftsprojektion als unplausibel einzustufen. Im Gegensatz dazu muss das aus dem Referenzensemble resultierende Kernensemble zweifelsfrei zur Anwendung empfohlen werden können. Die durchgeführte Qualitätskontrolle dient darüber hinaus der Einordnung der Ergebnisse des Modelloutputs.

5.2.1 Erfassung der Grundgesamtheit an zur Verfügung stehenden Projektionen; Stichtagsregelung

Für das Mitteldeutsche Referenzensemble existiert eine Stichtagsregelung für die Berücksichtigung von Projektionen. Alle Projektionen die nach diesem Stichtag zur Verfügung standen, fanden keine Berücksichtigung. Für das Mitteldeutsche Referenzensemble Version 1.0 (2020) wurde der Stichtag auf den

21.06.2019

festgelegt.

Es wurden Projektionen aus den Regionalisierungsprojekten EURO-CORDEX, ReKliEs-De und EPISODES verwendet.

5.2.2 Ausschluss von Projektionen aus objektiven Gründen

Ein Ausschluss von Projektionen erfolgt durch die Modellierergruppen selbst, indem die Modelle oder einzelne Simulationen zurückgezogen bzw. nicht (mehr) zur Anwendung empfohlen werden. Weiterhin kann ein Ausschluss anhand methodisch begründbarer Modellfehler erfolgen. Für diese Entscheidungen konnte dankenswerter Weise auf die Arbeit des DWD¹³

¹³ o. V.: Informationen zu den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen, in: Internetseite Deutscher Wetterdienst; URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/liste-

zurückgegriffen werden. Von den durch den DWD empfohlenen Ausschlüssen fanden die Folgenden Berücksichtigung:

- 14.02.2018 Rückzug der statistischen Regionalmodellsimulationen des Modells PIK-STAR3 für das RCP8.5-Szenario
- 02.03.2018 Rückzug der dynamischen Regionalmodellsimulationen, die auf dem Lauf CNRM-CERFACS-CNRM-CM5(r1) beruhen
- 19.06.2018 Ausschluss der Regionalmodellsimulationen IPSL-INERIS-WRF331F, die auf dem Lauf IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1) beruhen
- 09.08.2018 Ausschluss der Regionalmodellsimulationen "DMI-HIRHAM5"
- 14.02.2019 Ausschluss der Regionalmodellsimulationen "CEC-WETTREG2013" und "PIK-STAR3" ¹³

Für die Regionalmodellsimulationen "CEC-WETTREG2013" wurde die fehlerhafte Gitterung zwischenzeitlich korrigiert und mit einer neuen Versionsnummer versehen (CEC-WETTREG2018). Diese korrigierten Projektionen konnten im Referenzensemble berücksichtigt werden.

Eine Übersicht der schlussendlich verbliebenen Projektionen (exklusive EPISODES und WETTREG18) gibt die nachfolgende Abbildung 4.

Liste der Klimaprojektionen

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E		x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	DMI-HIRHAM5			09.08.2018
NOG-NorESM1-M (r1)	DMI-HIRHAM5		09.08.2018	09.08.2018
ICHEC-EC-EARTH (r3)	DMI-HIRHAM5	09.08.2018	09.08.2018	09.08.2018
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53	02.03.2018	02.03.2018	02.03.2018
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)		19.06.2018	19.06.2018
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	SMHI-RCA4		x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	SMHI-RCA4	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4	x	x	x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI-RCA4		02.03.2018	02.03.2018
CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17			x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17		x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x		x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom-CCLM4-8-17		02.03.2018	02.03.2018
ICHEC-EC-EARTH (r12)	GERICS-REMO2015			x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GERICS-REMO2015			x
CCCma-CanESM2 (r1)	GERICS-REMO2015			x
MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015			x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	GERICS-REMO2015			02.03.2018
ICHEC-EC-EARTH (r12)	UHOH-WRF361H			x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF361H			x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H	x		x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	PIK-STAR53 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2018
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	PIK-STAR53 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2018
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	PIK-STAR53 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2018
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	PIK-STAR53 (v1r1)			14.02.2018
CCCma-CanESM2 (r1)	PIK-STAR53 (v1r1)			14.02.2018
MIROC-MIROC5	PIK-STAR53 (v1r1)			14.02.2018
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	GEC-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
ICHEC-EC-EARTH (r12)	GEC-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GEC-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
CCCma-CanESM2 (r1)	GEC-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
MIROC-MIROC5 (r1)	GEC-WettReg2013 (v1r1)			14.02.2019
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	GEC-WettReg2013 (v1r1)	14.02.2019		14.02.2019
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	x	x	x

CORDEX EUR11 Ensemble (blau),

ReKliEs-De Ensemble (grün),

14

Abbildung 4: Übersicht der verbliebenen Projektionen (exklusive EPISODES und WETTREG18) und Angabe der nach 5.2.2 ausgeschlossenen Projektionen mit Angabe des Ausschlussdatums.

¹⁴ o. V.: Liste der Klimaprojektionen, in: Internetseite Deutscher Wetterdienst; URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/downloads/liste-klimaprojektionen.pdf?__blob=publicationFile&v=5, abgerufen am 05.11.2019.¹⁵ Hübner, Heike et al.: ReKliEs-De Nutzerhandbuch, in: Internetseite ReKliEs-De/ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, 27.03.2019, URL: <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmpl/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Nutzerhandbuch.pdf>, doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch, S. 68 ff, abgerufen am 05.11.2019

Weiterhin fanden sämtliche mit EPISODES regionalisierten Projektionen Eingang in das Referenzensemble (Abbildung 5).

Liste der Klimaprojektionen

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CCCma-CanESM2 (r1)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM2 (r2)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM2 (r3)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM2 (r4)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM2 (r5)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r2)	DWD-EPISODES2018		x	x
ICHEC-EC-EARTH (r9)	DWD-EPISODES2018		x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r3)	DWD-EPISODES2018	x	x	x
NCC-NorESM1-M (r1)	DWD-EPISODES2018	x	x	x

EPISODES-Projektionen (orange) zum Stichtag 30. 4. 2018.

9

Abbildung 5: Liste der mit EPISODES regionalisierten Klimaprojektionen

5.2.3 Ausschluss von Projektionen aus anwendungsspezifischen Gründen

Aufgrund der unter 5.1 getroffenen Festlegungen erfolgt keine Berücksichtigung von Projektionen, deren historische Läufe den Zeitraum 1961-1990 nicht abdecken. Das betrifft im Einzelnen:

- Regionalisierungen, die mit dem Modell WRF361H erfolgt sind.
- Regionalisierungen, die mit dem Modell RCA4 erfolgt sind.

5.2.4 Ausschluss aufgrund der durchgeführten Qualitätskontrolle

Im Ergebnis der Qualitätskontrolle (siehe dazu Anhang C) fanden folgende Projektionen keine Berücksichtigung in dem Referenzensemble:

- alle Regionalisierungen, die mit REMO2015 und REMO2009 durchgeführt worden sind.
- die beiden Modellkombinationen CCCma-CanESM2/CLMcom-CCLM4-8-17 und MOHC-HadGEM2-ES/CLMcom-CCLM4-8-17.

5.3 Das Referenzensemble

Unter Berücksichtigung der Kapitel 5.2.1 bis 5.2.4 ergibt sich das in Tabelle 2 dargestellte Referenzensemble.

Tabelle 2: Liste der im Mitteldeutschen Referenzensemble enthaltenen Klimaprojektionen

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E		x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR(r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x		x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)			x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CEC-WettReg2018 (v1r1)			x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)			x
CCCma-CanESM2 (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)			x
MIROC-MIROC5 (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)			x
MPI-M-MPI-ESM-LR(r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)	x		x
CCCma-CanESM (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM (r2)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM (r3)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM (r4)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
CCCma-CanESM (r5)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r2)	DWD-EPIISODES2018		x	x
ICHEC-EC-EARTH (r9)	DWD-EPIISODES2018		x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r3)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
NCC-NorESM1-M (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x	x
Anzahl		17	18	25

6. Die Reduktionsmethode des DWD

Da das Mitteldeutsche Kernensemble aus den bereits geschilderten Gründen pro Szenario sieben Mitglieder aufweisen soll, ist es notwendig, aus der Vielzahl der im Referenzensemble enthaltenen Modellkombinationen eine Reduktion durchzuführen.

Diese Reduktion wurde mit Hilfe der bereits angesprochenen entwickelten Methodik nach Dalelane et al.¹² durch den DWD realisiert. Die Ergebnisse dieser Methode erfüllen im Wesentlichen die Forderungen, dass die Bandbreite des Referenzensembles für verschiedene Variablen möglichst erhalten bleiben soll und die Modellergebnisse sich untereinander möglichst unähnlich sein sollen.

7. Das Mitteldeutsche Kernensemble

7.1 Mitteldeutsches Kernensemble für das Szenario RCP2.6 (Version 1.0)

Das Kernensemble für das Szenario RCP2.6 umfasst eine Auswahl von 7 Modellläufen aus einer Grundgesamtheit von 17 Modellläufen und beinhaltet folgende Modellkombinationen:

Antreibendes Globalmodell

CCCma-CanESM2_r2i1p1
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1
MIROC-MIROC5_r1i1p1
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1
CCCma-CanESM2_r4i1p1
MPI-M-MPI-ESM-LR_r3i1p1

Regionales Klimamodell

DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1
KNMI-RACMO22E_v2
CLMcom-CCLM4-8-17_v1
CEC-WETTREG2018_v1-r1
CLMcom-CCLM4-8-17_v1
DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1
DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1

Die Bandbreitenabdeckung der Änderungssignale (2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990) für die verschiedenen Variablen des Kernensembles gegenüber dem Referenzensemble beträgt:

- 2m-Temperatur	0.856
- Niederschlagssumme	0.794
- Extremniederschlag	0.887
- Niederschlag Persistenz	0.772
- Mittelwind	0.914
- Gesamt über alle o. g. Kenngrößen	0.845

7.2 Mitteldeutsches Kernensemble für das Szenario RCP4.5 (Version 1.0)

Das Kernensemble für das Szenario RCP4.5 umfasst eine Auswahl von 7 Modellläufen aus einer Grundgesamtheit von 18 Modellläufen und beinhaltet folgende Modellkombinationen:

Antreibendes Globalmodell

ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1
NCC-NorESM1-M_r1i1p1
ICHEC-EC-EARTH_r2i1p1
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1
CCCma-CanESM2_r5i1p1
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1

Regionales Klimamodell

KNMI-RACMO22E_v1
KNMI-RACMO22E_v2
DWD-EPIISODES2018_v1-r1
DWD-EPIISODES2018_v1-r1
CLMcom-CCLM4-8-17_v1
DWD-EPIISODES2018_v1-r1
CLMcom-CCLM4-8-17_v1

Die Bandbreitenabdeckung der Änderungssignale (2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990) für die verschiedenen Variablen des Kernensembles gegenüber dem Referenzensemble beträgt:

- 2m-Temperatur	0.950
- Niederschlagssumme	0.979

- Extremniederschlag	0.978
- Niederschlag Persistenz	0.982
- Mittelwind	0.883
- Gesamt über alle o. g. Kenngrößen	0.954

7.3 Mitteldeutsches Kernensemble für das Szenario RCP8.5 (Version 1.0)

Das Kernensemble für das Szenario RCP8.5 umfasst eine Auswahl von 7 Modellläufen aus einer Grundgesamtheit von 25 Modellläufen und beinhaltet folgende Modellkombinationen:

Antreibendes Globalmodell

MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1
 MIROC-MIROC5_r1i1p1
 MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1
 MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1
 ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1
 CCCma-CanESM2_r4i1p1
 ICHEC-EC-EARTH_r2i1p1

Regionales Klimamodell

CEC-WETTREG2018_v1-r1
 CLMcom-CCLM4-8-17_v1
 DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1
 KNMI-RACMO22E_v2
 CEC-WETTREG2018_v1-r1
 DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1
 DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1

Die Bandbreitenabdeckung der Änderungssignale (2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990) für die verschiedenen Variablen des Kernensembles gegenüber dem Referenzensemble beträgt:

- 2m-Temperatur	0.901
- Niederschlagssumme	0.913
- Extremniederschlag	0.790
- Niederschlag Persistenz	0.724
- Mittelwind	0.836
- Gesamt über alle o. g. Kenngrößen	0.833

8. Erläuterungen zum Mitteldeutschen Kernensemble

8.1 Auswertung und Bias-Adjustierung

In der Klimatologie wird unter Bias die systematische Abweichung der Projektionsergebnisse für die Vergangenheit von den Beobachtungsdaten desselben Zeitraums verstanden. Unter Bias-Adjustierung wird die Angleichung der Modelldaten an die Beobachtungsdaten verstanden. Man unterscheidet zwischen verschiedenen Verfahren, die sich grundsätzlich in zwei Klassen einteilen lassen.

Bei der ersten Methode wird der Modelloutput in Richtung der Beobachtungsdaten derart adjustiert, dass der Bias möglichst klein wird. Die Projektionsergebnisse werden modifiziert und spiegeln im Anschluss die Beobachtungsdaten in Höhe und Verlauf möglichst wider. Damit kann im Anschluss eine Adjustierung der Projektionsergebnisse für die Zukunft erfolgen. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass der Bias auch für Zukunftsprojektionen die gleiche Größenordnung aufweist wie für die historischen Modellläufe, also zeitlich konstant ist.

Derzeit sind keine Verfahren zur Bias-Adjustierung bekannt, welche kritiklos Anwendung finden könnten. Ein Hauptkritikpunkt dabei ist, dass die Adjustierung nicht elementübergreifend stattfindet, sondern wird für jede Klimavariablen separat durchgeführt. Diese separate Betrachtung führt zur Entkopplung der den Projektionsergebnissen zu Grunde liegenden Modellphysik (siehe hierzu auch Seite 11 des Ergebnisberichtes zum Projekt ReKliEs-De). Eine elementübergreifende Bias-Adjustierung, der dieses Problem nicht eigen ist, ist den Autoren nicht bekannt. Wie bereits geschildert, erfolgte für die im Mitteldeutschen Kernensemble verwendeten Projektionen im Hinblick auf den verfolgten Anwendungszweck keine Bias-Adjustierung. Einzelnen Anwendergruppen, die zwingend Bias-korrigierte Modellausgabedaten benötigen, steht natürlich frei, diese Daten zu generieren.

Die zweite Methode verfolgt einen anderen Ansatz. Hierbei bleibt der Modelloutput unverändert, die Adjustierung erfolgt im Anschluss an die Auswertung der Projektionsergebnisse. Die beschriebene Entkopplung der Klimavariablen untereinander und damit eine „Zerstörung“ der Modellphysik treten dabei nicht auf. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass im Rahmen der Klimafolgenforschung oftmals Zustandsgrößen benötigt werden (z. B. als Input für Wirkmodelle). Ohne die Bias-Adjustierung des Modelloutputs pflanzt sich der systematische Fehler in den Wirkmodellen fort bzw. können Wirkmodelle die Daten nicht verarbeiten. Die hier nachfolgend beschriebene Adjustierung der Ergebnisse des Modelloutputs kann diese Problematik nicht beheben. Für klimatologische Auswertungen kommt dieses Verfahren jedoch in Betracht.

Folgende Vorgehensweise wird im Rahmen der Auswertung empfohlen¹⁵:

- 1) Bias unabhängige Kenngrößen bedürfen keiner Korrektur. Das betrifft *tx90p*, *tx10p*, *wsgi*, *csdi* und zumindest teilweise *r95ptot*, *r99ptot*¹⁶.
- 2) Schwellwert-basierte Kenngrößen, die an den Bias angepasst sind (z. B. Sommertage), werden rasterzellenbeisierend mittels der Methode des Histogramm-Matching¹⁷ (Anpassung der Schwellwerte der Projektionen auf Beobachtungszeitraum) angepasst.
- 3) Alle restlichen Variablen (*tas*, *dtr*, *pr*, *ddp*, *wdp*, *sfcwind*, *rsds*, *rf*) bleiben unkorrigiert. Ggfs. müssen durch die Anwender eigene Lösungsmöglichkeiten entwickelt werden. Diese sind oftmals aufgabenbezogen und können daher nicht generalisiert empfohlen werden.

¹⁵ Hübner, Heike et al.: ReKliEs-De Nutzerhandbuch, in: Internetseite ReKliEs-De/ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, 27.03.2019, URL: <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmpl/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Nutzerhandbuch.pdf>, doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch, S. 68 ff, abgerufen am 05.11.2019

¹⁶ o. V.: ETCCDI/CRD Climate Change Indices, in: Internetseite Expert Team on Climate Change Detection and Indices, 15.09.2009, URL: http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml, abgerufen am 05.11.2019

¹⁷ Die Berechnung der Klimasignale von Schwellwert-basierten Kenngrößen ist aufgrund der Abweichung der Absolutwerte (Bias) der Klimamodelle von den gemessenen Werten nicht über das reine Änderungssignal („Delta-Change“) möglich. Ein Schwellwert von beispielsweise 25 °C für einen Sommertag aus den Beobachtungsdaten würde in einem „zu kalten Modelllauf“ zu einer Unterschätzung und in einem „zu warmen Modelllauf“ zu einer Überschätzung der Anzahl der jährlichen Sommertage führen. Somit ist eine Anpassung des Schwellwertes für den jeweiligen Klimamodelldatensatz zwingend erforderlich. Dies geschieht mittels der Methode des „Histogram-Matching“. Diese ist für jede Rasterzelle und jede Zeitreihe separat anzuwenden. Dabei wird das Perzentil des Grenzwertes aus den Beobachtungsdaten bestimmt und auf den historischen Lauf der Klimamodellkette mit gleichem Zeitbezug übertragen. Der sich aus dem vorgegebenen Perzentil ergebende Grenzwert wird als neue Schwelle zur Bestimmung der Kenngröße verwendet.

Die o. g. Vorgehensweise wird als praktikabel angesehen, lässt gleichzeitig aber mindestens zwei Fragen offen:

- a) Wie hoch ist der Bias?
- b) Was passiert mit den unkorrigierten Variablen?

Für die Einschätzung der Ergebnisse ist es von immenser Bedeutung den Bias zumindest zu kennen, auch wenn die systematische Abweichung nicht adjustiert werden soll. Die jeweilige Abweichung der Vergangenheitssimulation der Modelle zur Beobachtung, wurde durch die ReKIS-Gemeinschaft für die Projektionen, die dem Referenzensemble angehören, für die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag mit Hilfe verschiedener statistischer Auswertungen untersucht und ist unter Anhang C) beigefügt (Qualitätskontrolle). Diese Prüfung verfolgt den Zweck, den Anwender in die Lage zu versetzen, die Ergebnisse der Projektionen einordnen zu können. Sie stellt aber keine Bewertung der jeweiligen Modellphysik und -parametrisierung dar.

Für die Auswertung der unter 3) genannten Variablen kann die Methode „Delta-Change-Approach“ genutzt werden. Dabei wird das Klimaänderungssignal zwischen zwei Zeiträumen bestimmt. Für die Einordnung des Änderungssignals können die entsprechenden Beobachtungsdaten (also der Ausgangspunkt auf der die Änderung beruht) in Beziehung gesetzt werden. Wenn nötig (zum Beispiel weil zwingend Zustandsgrößen benötigt werden) kann ein „Aufsatteln“ des Änderungssignal auf die Beobachtungsdaten erfolgen. Auch bei dieser Methodik wird vereinfacht angenommen, dass der Bias zeitlich konstant ist.

Der hier dargestellte Umgang mit dem Bias sowie die aufgezeigte Möglichkeit einer Auswertung der Projektionsergebnisse stellt lediglich eine Empfehlung der drei beteiligten Landesämter dar. Jede andere Vorgehensweise durch die Nutzer bleibt unbenommen.

Für die Interpretation und Auswertung von Klimaprojektionen sei an dieser Stelle weiterführend auf die Leitlinien des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ (BLFG IrKmd)¹⁸ verwiesen.

8.2 Aktualisierung und Nutzungszeitraum

Die Klimatologie ist eine sehr dynamische Wissenschaft und unterliegt insbesondere durch die Arbeit der einschlägigen internationalen und nationalen Gremien einem ständigen Fortschritt. Die kontinuierliche Weiterentwicklung von Klimamodellen und Neukonzeption von Szenarien führt dazu, dass ein Kernensemble, sowie die Herangehensweise an die Auswertung der Projektionen, nicht als statisches Konstrukt aufgefasst werden darf. Ein Kernensemble kann und wird also nicht von grenzenloser Dauer sein. Mit dem für 2021/22 angekündigten 6. IPCC-Sachstandsbericht wird bereits eine neue Generation von Szenarien erwartet.

¹⁸ Linke, C. et al. (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Essen, Okt. 2017 (http://141.30.160.224/fdm/htm/de/752_12421p10120.html)

Gleichzeitig muss eine gewisse Beständigkeit gewährleistet sein, um Anwendern die Möglichkeit der Nutzung des Kernensembles zu geben und Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen ableiten zu können. Daher sollte der Nutzungszeitraum nicht zu kurz sein. Bis zu dessen Ablauf können evtl. vorliegende Ergänzungen von Klimamodelldaten vorerst nicht berücksichtigt werden. Auch vor dem Hintergrund einer schlüssigen Kommunikation gegenüber den Nutzern und den Adressaten der Ergebnisse ist es notwendig, eine gewisse Stabilität in dem Anwendungsprozess des Kernensembles zu gewährleisten.

Diesem Umstand soll für das Mitteldeutsche Kernensemble durch eine Stichtagsregelung bzgl. der im Referenzensemble zu verwendenden Modelle Rechnung getragen werden. Alle Modellläufe, die nach dem u. g. Stichtag zur Verfügung gestellt werden, werden bis zur nächsten Aktualisierung des Mitteldeutschen Kernensembles nicht betrachtet. Die Autoren sind sich darüber einig, dass eine Aktualisierung nur für den Fall von substantiellen Veränderungen in Frage kommt. Eine Aktualisierung des Mitteldeutschen Kernensembles ist im Rahmen der Etablierung und einer anschließenden noch zu erfolgenden Regionalisierung der neuen SSP-Szenarienfamilie (CMIP6) angedacht.

Eine Ausnahme stellen Rückzüge von Modellen durch Modellentwickler dar. Solche Ereignisse müssen im Hinblick auf die Qualität der zu treffenden Aussagen Beachtung finden und dementsprechend aus der aktuellen Ensembleversion entfernt werden (unabhängig von Stichtag).

Stichtag für das Mitteldeutsche Kernensemble - Version 1.0 (2020): 21.06.2019

Anhang

A) Einordnung der Ergebnisse des Mitteldeutschen Kernensembles

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen für das RCP8.5 und RCP2.6 eine Gegenüberstellung des Kern- (links) und Referenzensembles (rechts) für das in der Qualitätskontrolle betrachtete Gebiet der drei Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen, für die Variablen Temperatur und Niederschlag und die beiden Zeiträume „Nahe Zukunft“ (2021-2050) und „Ferne Zukunft“ (2071-2100).

Das Referenzensemble umfasst für das Szenario RCP8.5 insgesamt 25 Modellläufe. Das Referenzensemble für das RCP2.6 beinhaltet 17 Modellläufe. Beide Kernensembles umfassen daraus jeweils 7 Modellläufe.

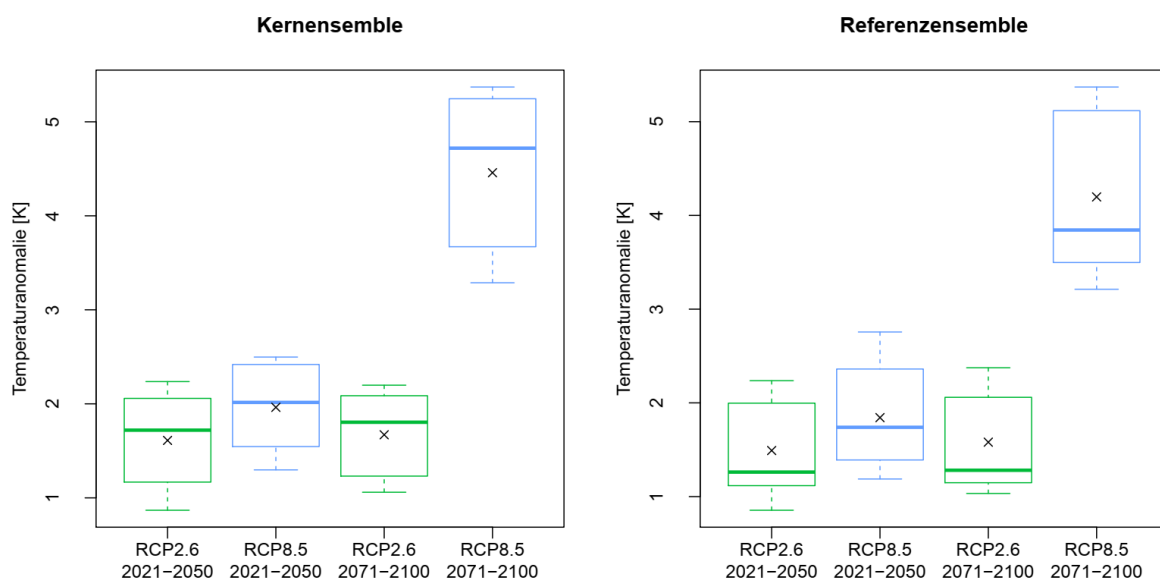


Abbildung 6: Boxplot der Temperaturänderung im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 für das Kern- (links) und Referenzensemble (rechts).

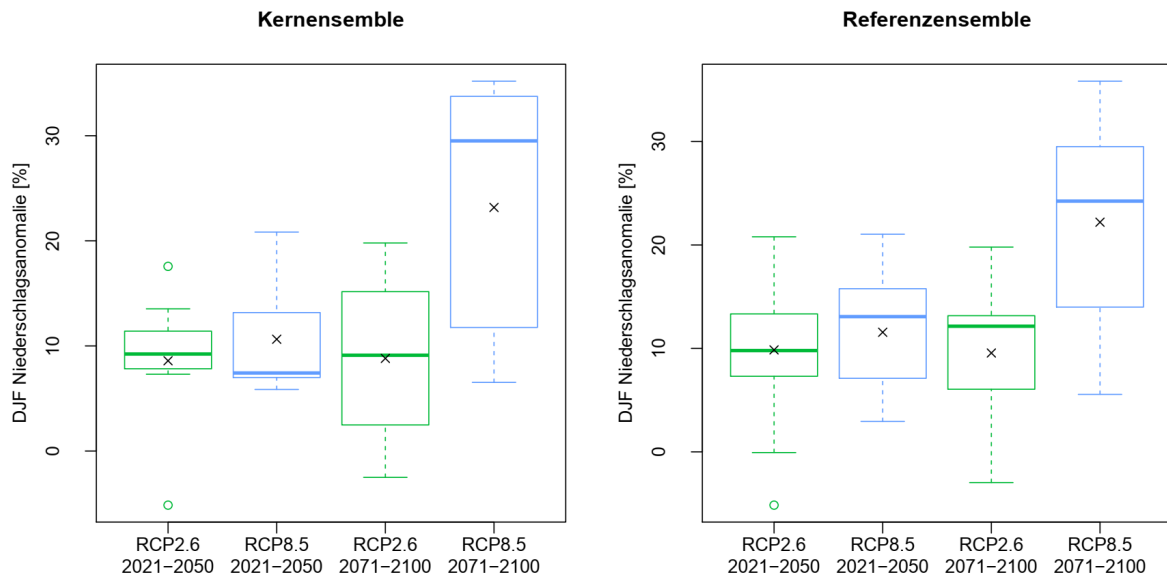


Abbildung 7: Boxplot der Niederschlagsänderung im Winter (DJF) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 für das Kern- (links) und Referenzensemble (rechts).

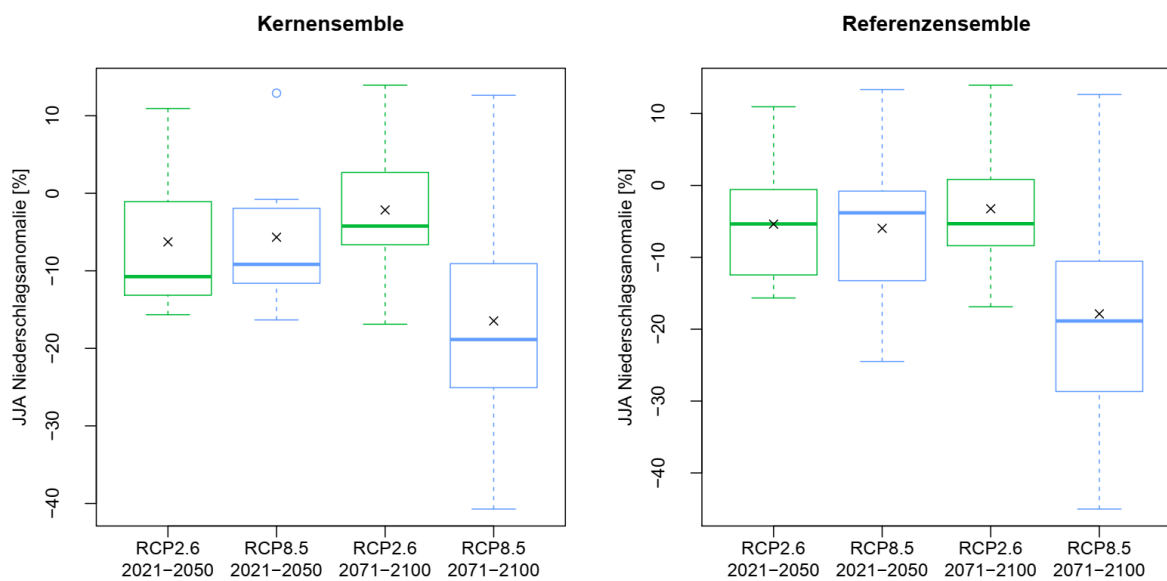


Abbildung 8: Boxplot der Niederschlagsänderung im Sommer (JJA) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 für das Kern- (links) und Referenzensemble (rechts).

B) Informationen zu den Modelldaten

Die in EURO-CORDEX und ReKliEs-De angetriebenen Modelle nutzen unterschiedliche Kalender:

- Alle vom GCM MOHC-HadGEM2-ES angetriebenen regionalisierten Modellläufe besitzen einen **360-Tages-Kalender**. D. h. jeder Monat hat genau 30 Tage.
- Weiterhin betrachten die Modellkombinationen CCCma-CanESM2/ CLMcom-CCLM4-8-17 sowie MIROC-MIROC5 /CLMcom-CCLM4-8-17 einen **365-Tages-Kalender**, d. h. es gibt keine Schaltjahre.
- Alle weiteren Modellläufe berechnen ihre Daten auf dem **gregorianischen Kalender** (365 Tage/Jahr und alle 4 Jahre ein Schaltjahr).

Diese unterschiedlichen Zeitachsen sind in Auswertungen und Nutzung der Modelldaten zu beachten!

Die Originaldaten der Regionalisierungsprojekte EURO-CORDEX und ReKliEs-De werden auf den Earth System Grid Federation (ESGF) - Datenzentren bereitgestellt.

Die EPISODES-Daten sollen laut DWD zeitnah auf dem o. g. Datenknoten nachgeführt werden.⁸

C) Mitteldeutsche Qualitätskontrolle

I. Vorbemerkungen

Zur Erstellung des Referenzensembles wurde, wie in Kapitel 5.2 erwähnt, eine Qualitätskontrolle vorangestellt.

Referenz- und Kernensemble sollen sowohl dem Zweck der klimatologischen Auswertung als auch zu Impaktbetrachtungen (und der damit verbundenen Nutzung der Klimamodelldaten in Impaktmodellen) dienen. Der Anwendungsbereich in der Wirkmodellierung stellt dabei höhere Anforderungen an die Klimamodelldaten als die Mehrzahl der klimatologischen Auswertungen. Da jedoch beide Anwendungen durch Referenz- und Kernensemble abgedeckt werden sollen, wurde eine Qualitätskontrolle durchgeführt, die versucht, allen Anforderungen gerecht zu werden. Anhand der Abweichungen der klimatologischen Hauptparameter der historical-Läufe zur beobachteten Vergangenheit erfolgte eine Einordnung des zu erwartenden Fehlers der Modelldaten und eine Ableitung, wie mit diesem bei der Nutzung der Modelldaten umzugehen ist. Im Ergebnis der Qualitätskontrolle wurden durch die Autoren ebenfalls Ausschlüsse von Modellkombinationen beschlossen. Dies gewährleistet, dass der Fehler der Modelldaten für die Handhabbarkeit in der Weiternutzung nicht zu groß ist.

Die Qualitätskontrolle wurde für die im Referenzensemble vertretenen Regionalisierungen durchgeführt. Sie fußt auf einem Vergleich der historical-Läufe der Modelldaten mit dem gitterten Beobachtungsdatensatz HYRAS^{19,20} für den Referenzzeitraum. Alle nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich demnach auf den langjährigen Zeitraum 1961 - 1990. Die räumliche Auflösung beider Datensätze ist identisch (0,11°). Für diesen Vergleich wurden die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag herangezogen.

Der in der Qualitätskontrolle untersuchte Betrachtungsraum umfasst das Gebiet der drei Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen und ist in Abbildung 9 dargestellt. Er besitzt eine Nord-Süd-Ausdehnung von 53,1 - 50,1°N und eine Ost-West-Ausdehnung von 9,7 - 15,1 °E. Der größte Teil dieses Gebietes ist durch Flachland charakterisiert. Die Mittelgebirge der Länder Sachsen-Anhalt und Thüringen (Harz, Thüringer Wald) sind vollständig im Untersuchungsraum enthalten. Für das Erzgebirge (Sachsen) standen hingegen nur Daten auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung.

¹⁹ C. Frick, H. Steiner, A. Mazurkiewicz, U. Riediger, M. Rauthe, T. Reich, A. Gratzki, 2014: Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. - Meteorologische Zeitschrift, Vol. **23**, No. 1, 15–32, (June 3, 2014)

²⁰ M. Rauthe, H. Steiner, U. Riediger, A. Mazurkiewicz, A. Gratzki, 2013: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). - Meteorologische Zeitschrift, Vol. **22**, No. 3, 235–256 (October 2013)



Abbildung 9: Betrachteter Raum für die Qualitätskontrolle (Mitteldeutscher Raum)
Ländergrenzen: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2011

Die nachfolgenden Betrachtungen sind zweigeteilt.

In einem ersten Schritt werden die Modellkombinationen, welche in ReKliEs-De und EURO-CORDEX berechnet wurden, betrachtet. Diese Darstellungen beinhalten auch Auswertungen für die Regionalisierungsmethode STARS3. Diese Projektionen wurden aufgrund einer fehlerhaften Gitterung des Luftdrucks (vgl. 5.2.2) im Nachgang dieser Qualitätskontrolle aus dem Referenzensemble ausgeschlossen. Bis zum finalen Stichtag war nicht klar, ob eine Korrektur – ähnlich wie bei WETTREG2018 – bereitgestellt werden kann. Da dies nicht der Fall war, konnten die mit STARS3 regionalisierten Projektionen für das Kernensemble nicht berücksichtigt werden.

In einem zweiten Schritt erfolgt die gesonderte Darstellung der äquivalenten Auswertungen zu EPISODES. Da es sich bei EPISODES um ein statistisches Regionalisierungsverfahren (empirical statistical downscaling-Methode (ESD-Methode)) handelt, liegen die historical-Läufe erwartungsgemäß nah an den Beobachtungsdaten.

ESD-Methoden nutzen Beobachtungsdaten, um regionalisierte Daten zu produzieren. Dabei werden bspw. Zusammenhänge zwischen den großskaligen Wetterlagen und den daraus

resultierenden kleinräumigen Wetterbedingungen genutzt. Dieses „Entlanghängeln“ an der beobachteten Realität führt zu einer Darstellung der Vergangenheit, die näher an den Beobachtungsdaten liegt, als das bei RCMs der Fall ist. Dies bedeutet aber nicht, dass auch die Zukunftsprojektion der ESD-Methoden realistischer ist, als die Projektionen der RCMs. Es ist durchaus möglich, dass klimatologische Zusammenhänge in der Zukunft anders wechselwirken als in der Vergangenheit. Im Ergebnis könnten ESDs diese in Zukunft möglicherweise veränderten Zusammenhänge schlechter abbilden als RCMs.

Zusammengefasst: Projektionen auf Basis von ESD-Methoden liegen für die Abbildung der Vergangenheit näher an den Beobachtungsdaten. Für die Projektion der Zukunft bedeutet dies jedoch nicht, dass die auf ESD-Methoden basierenden Klimaprojektionen gegenüber denen, die auf RCMs basieren, per se belastbarer sind. Eine Überinterpretation zur Güte der auf der ESD-Methode basierenden Projektionen soll mit diesem Hinweis vorgebeugt werden. Unabhängig davon bestehen auch für die Ergebnisse dieser Projektionen Unterschiede zur Beobachtung.

II. Temperatur

Jahresgang

Einen ersten Eindruck der Modelldaten liefert der in den Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellte räumlich und langjährig monatlich gemittelte Jahresgang der Temperatur (*tas*).

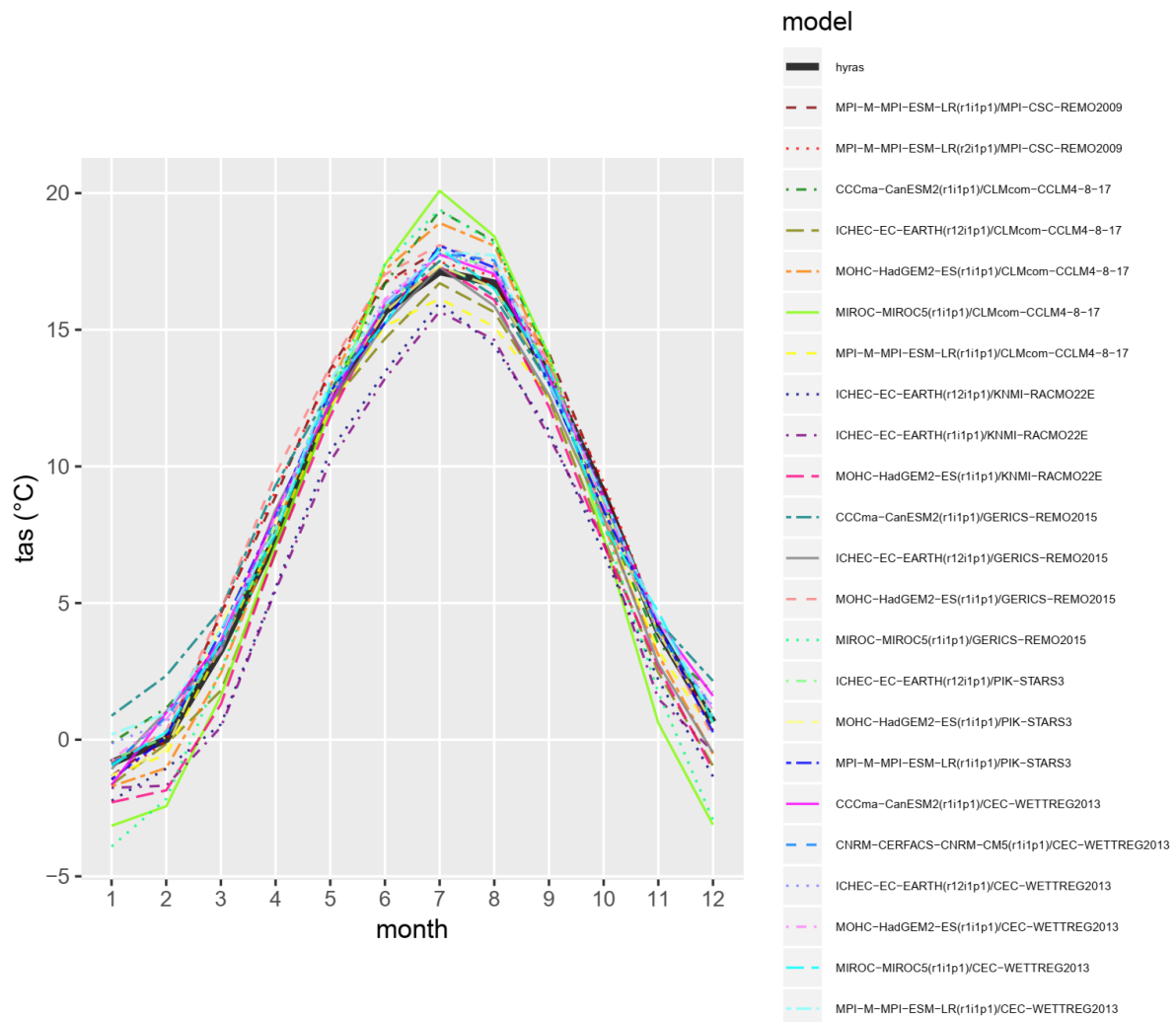


Abbildung 10: Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang der Temperatur (*tas*) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und der betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX

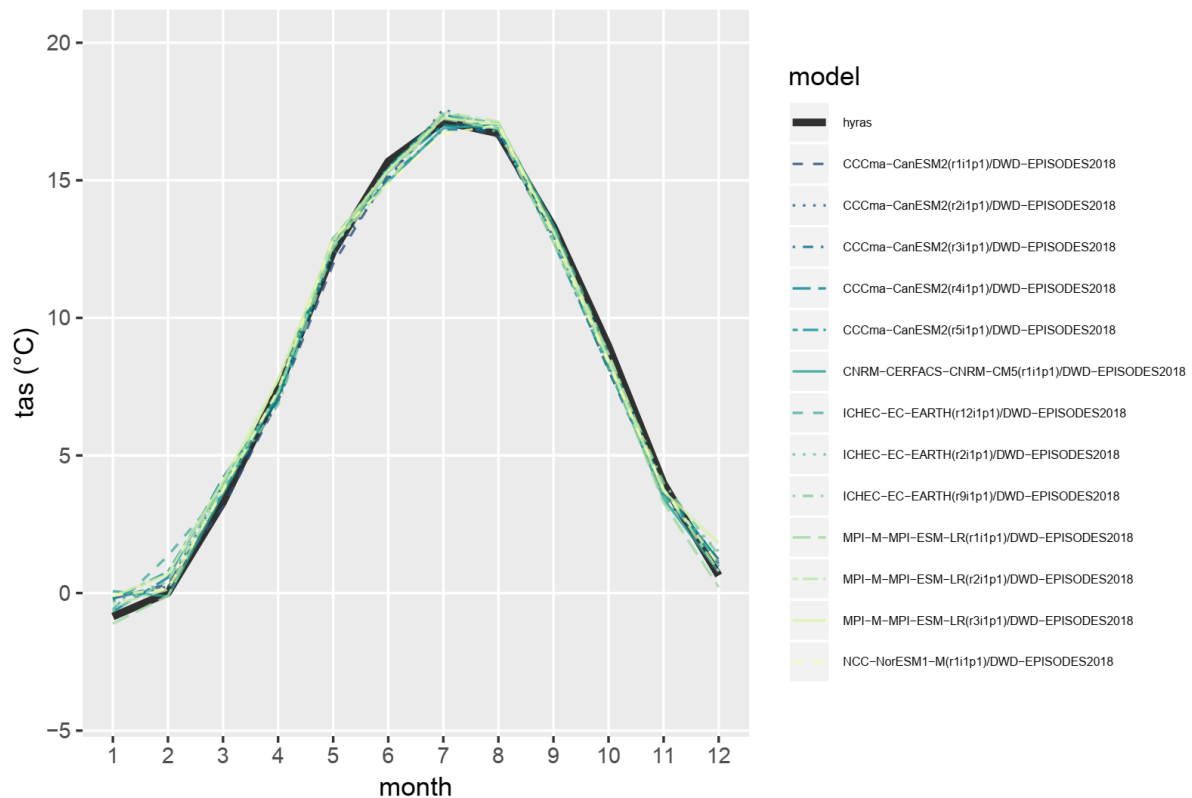


Abbildung 11: Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang der Temperatur (*tas*) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und der betrachteten Modellkombinationen aus EPI-SODES

Alle Modelle folgen grundsätzlich dem Jahresgang der Beobachtung. Dabei zeigt sich, dass die Klimamodelle in der Lage sind, die zeitliche Struktur der Temperaturverhältnisse der Vergangenheit gut nachzubilden. Es kommt zu verschiedenen Stärken der monatlichen absoluten Abweichung.

Taylordiagramme

Zur genaueren statistischen Betrachtung wurden sog. Taylordiagramme erzeugt. Taylordiagramme stellen folgende verschiedene statistische Maße zwischen einem oder mehreren Datensätzen (hier: Modelldaten) zu einem Referenzdatensatz (hier: Beobachtungsdatensatz HYRAS) dar:²¹

- den **Korrelationskoeffizient r** nach Pearson (Correlation - am äußeren Kreisstück aufgetragen),
- den **Root-Mean-Square Error (RMSE)**, Maß des Fehlers des Modells zur Beobachtung; dargestellt durch die grauen, durchgezogenen Halbkreise), und
- die **Standardabweichung** (standard deviation - sd ; auf x- und y-Achse aufgetragen und mit Hilfe der blauen, gestrichelten Linien ablesbar) der Modell- und Beobachtungsdaten.

Vereinfacht zusammengefasst beschreibt die Lage im Diagramm die Nähe der Modelldaten zur Realität der Beobachtung. Je näher der Markierungspunkt eines Modells am Punkt der Beobachtung liegt (vorliegend ein leerer Kreis auf der x-Achse), desto näher liegt dessen historical-Lauf an dem HYRAS-Datensatz.

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die Taylordiagramme für die Temperatur (*tas* – langjährig monatlich und räumlich gemittelt). Sie geben den Zusammenhang zwischen monatlichem Jahresgang von Modell zu Beobachtung wieder (zeitliche Betrachtung).

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Taylordiagramme für die Temperatur (*tas* - zeitlich gemittelt pro Gitterzelle). Sie geben den Zusammenhang zwischen der räumlichen Struktur der Modelle zur Beobachtung wieder.

²¹ Taylor, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, in: Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. D7, S. 7183-7192

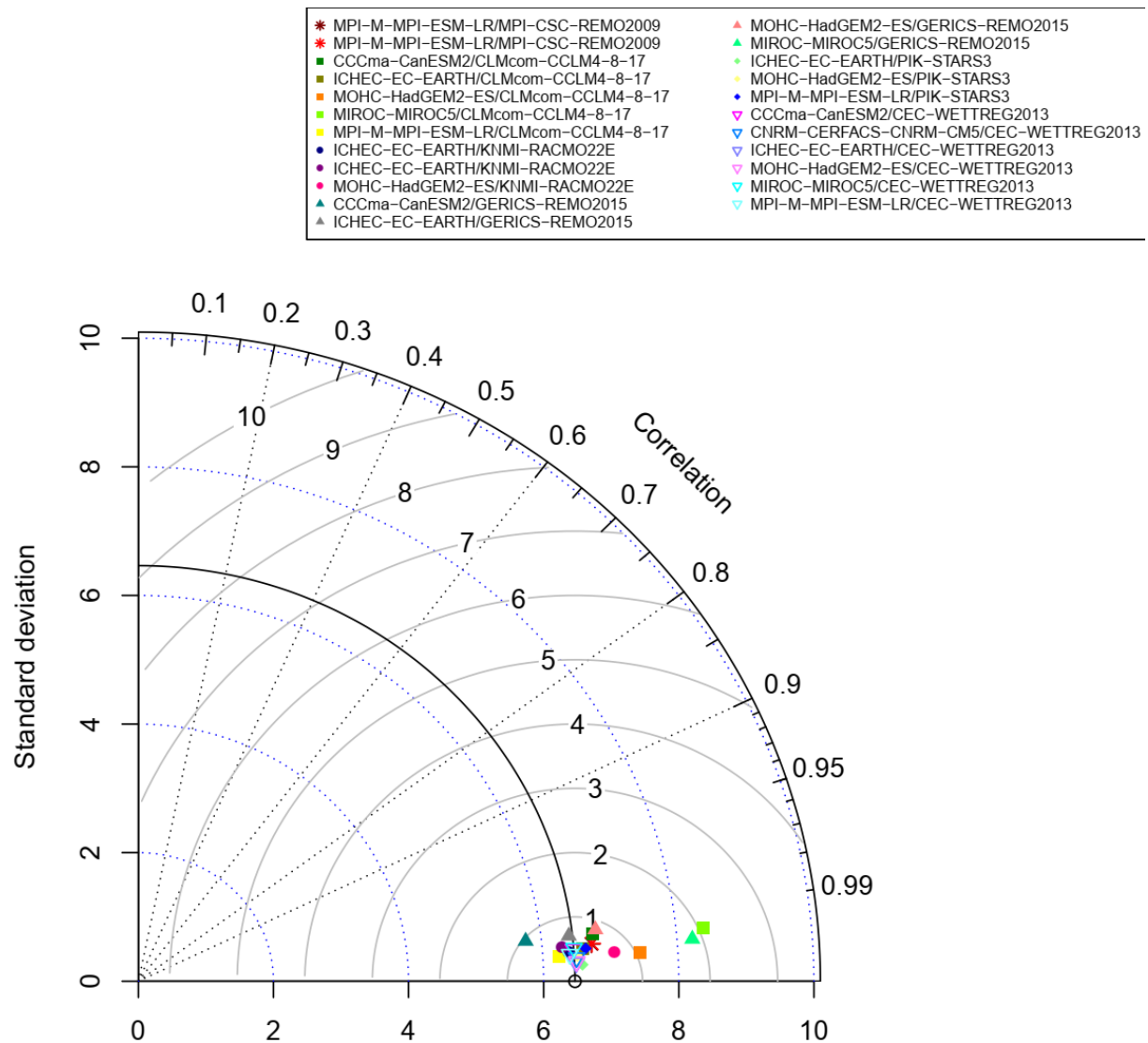


Abbildung 12: Taylordiagramm für die Temperatur (*tas*). Erzeugt aus den langjährig monatlich und räumlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX. Auf der x- und y-Achse ist die Standardabweichung aufgetragen. Der Korrelationskoeffizient ist auf dem äußeren Kreisstück aufgetragen und durch die grauen, gestrichelten Linien ablesbar. Der RMSE wird durch die grauen, durchgezogenen Halbkreise dargestellt.

- | | |
|---|--------------------------------------|
| * CCCma-CanESM2/DWD-EPIISODES2018 | • ICHEC-EC-EARTH/DWD-EPIISODES2018 |
| * CCCma-CanESM2/DWD-EPIISODES2018 | • ICHEC-EC-EARTH/DWD-EPIISODES2018 |
| * CCCma-CanESM2/DWD-EPIISODES2018 | ▲ MPI-M-MPI-ESM-LR/DWD-EPIISODES2018 |
| * CCCma-CanESM2/DWD-EPIISODES2018 | ▲ MPI-M-MPI-ESM-LR/DWD-EPIISODES2018 |
| * CCCma-CanESM2/DWD-EPIISODES2018 | ▲ MPI-M-MPI-ESM-LR/DWD-EPIISODES2018 |
| ■ CNRM-CERFACS-CNRM-CM5/DWD-EPIISODES2018 | ● NCC-NorESM1-M/DWD-EPIISODES2018 |
| • ICHEC-EC-EARTH/DWD-EPIISODES2018 | |

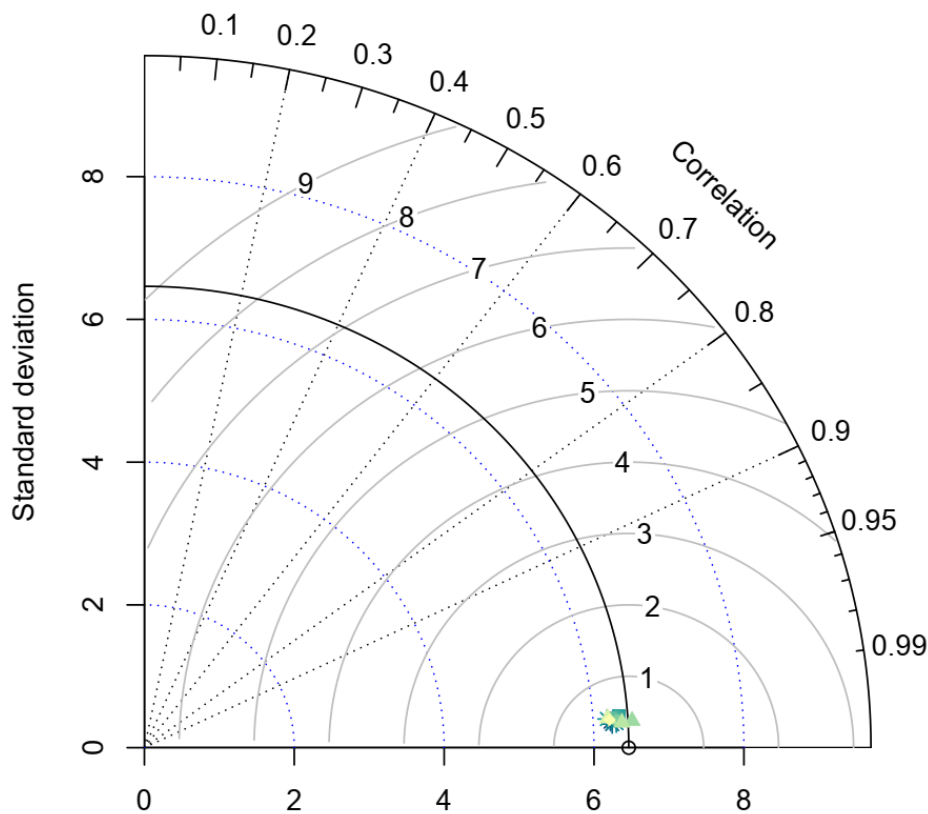


Abbildung 13: Taylordiagramm für die Temperatur (*tas*). Erzeugt aus den langjährig monatlich und räumlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPIISODES. Auf der x- und y-Achse ist die Standardabweichung aufgetragen. Der Korrelationskoeffizient ist auf dem äußeren Kreisstück aufgetragen und durch die grauen, gestrichelten Linien ablesbar. Der RMSE wird durch die grauen, durchgezogenen Halbkreise dargestellt.

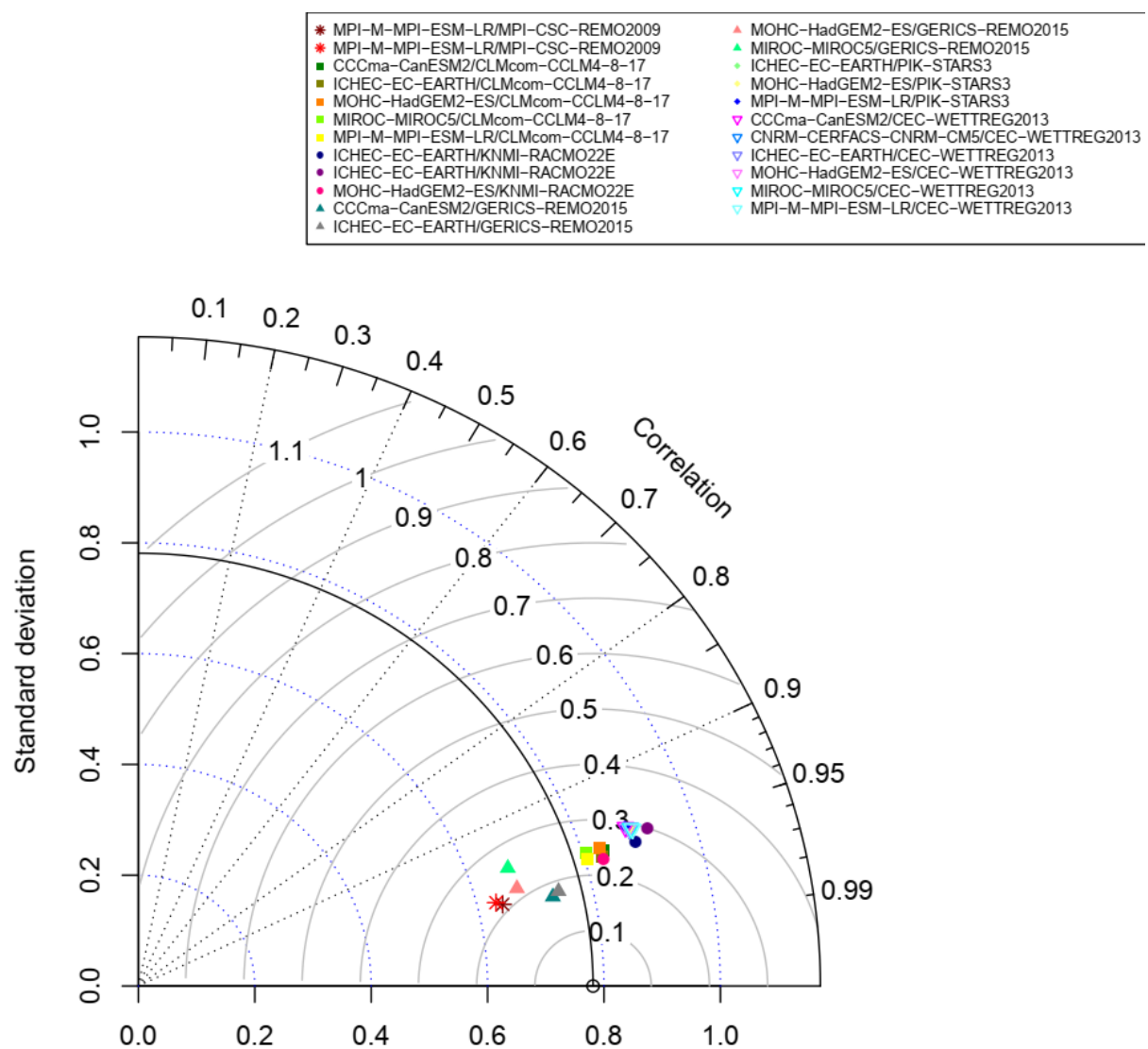


Abbildung 14: Taylordiagramm für die Temperatur (*tas*). Erzeugt aus pro Gitterzelle zeitlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX

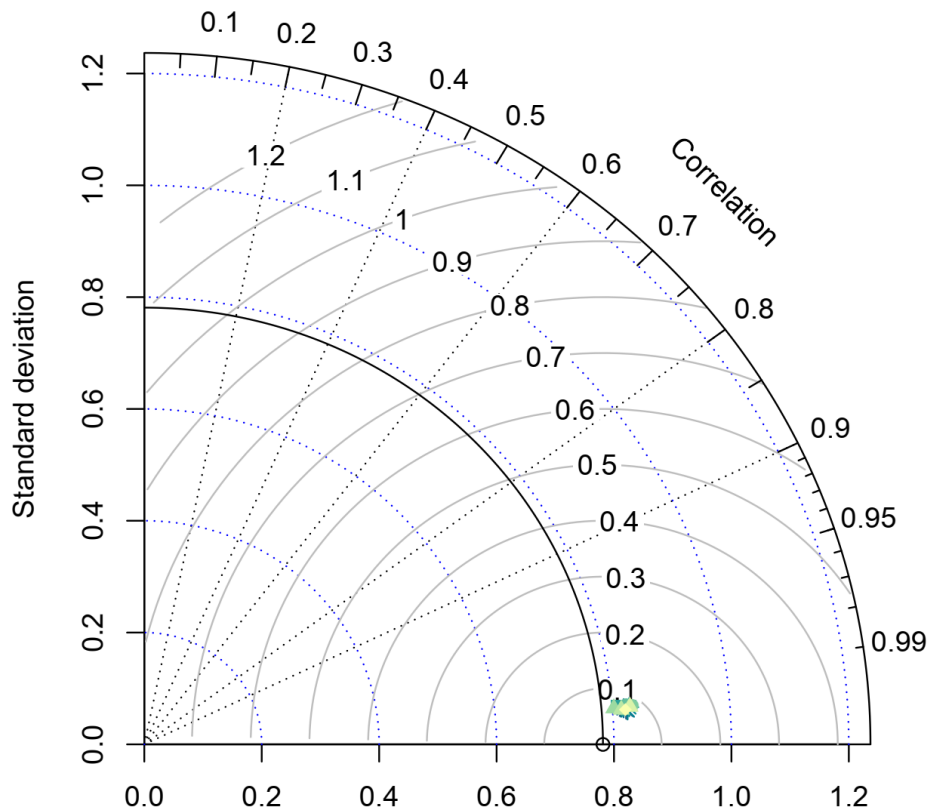


Abbildung 15: Taylordiagramm für die Temperatur (*tas*). Erzeugt aus pro Gitterzelle zeitlich gemittelten Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPIISODES

Aus den Taylordiagrammen wird deutlich: Sowohl für den räumlichen als auch für den zeitlichen Zusammenhang gruppieren sich sämtliche Modelldaten im Taylordiagramm nah an den Beobachtungsdaten. Sie geben den Referenzzeitraum somit gut wieder.

Der Korrelationskoeffizient ist zufriedenstellend hoch ($> \sim 0.95$) und der *RMSE* zwischen Beobachtung und Modell kleiner als die Standardabweichung der Beobachtung.

III. Niederschlag

Äquivalent zur Temperatur erfolgt auch der Vergleich zwischen Modelldaten und den Beobachtungsdaten für den Niederschlag. Erfahrungsgemäß ist die Modellierung des Niederschlags mit größeren Unsicherheiten verbunden, als dies bei der Temperatur der Fall ist. Die Unterschiede zwischen Modelloutput und Beobachtungsdaten werden also erwartungsgemäß größer sein.

Jahresgang

In Abbildung 16 und Abbildung 17 wird der räumlich und langjährig monatlich gemittelte Jahresgang des Niederschlags (pr) dargestellt.

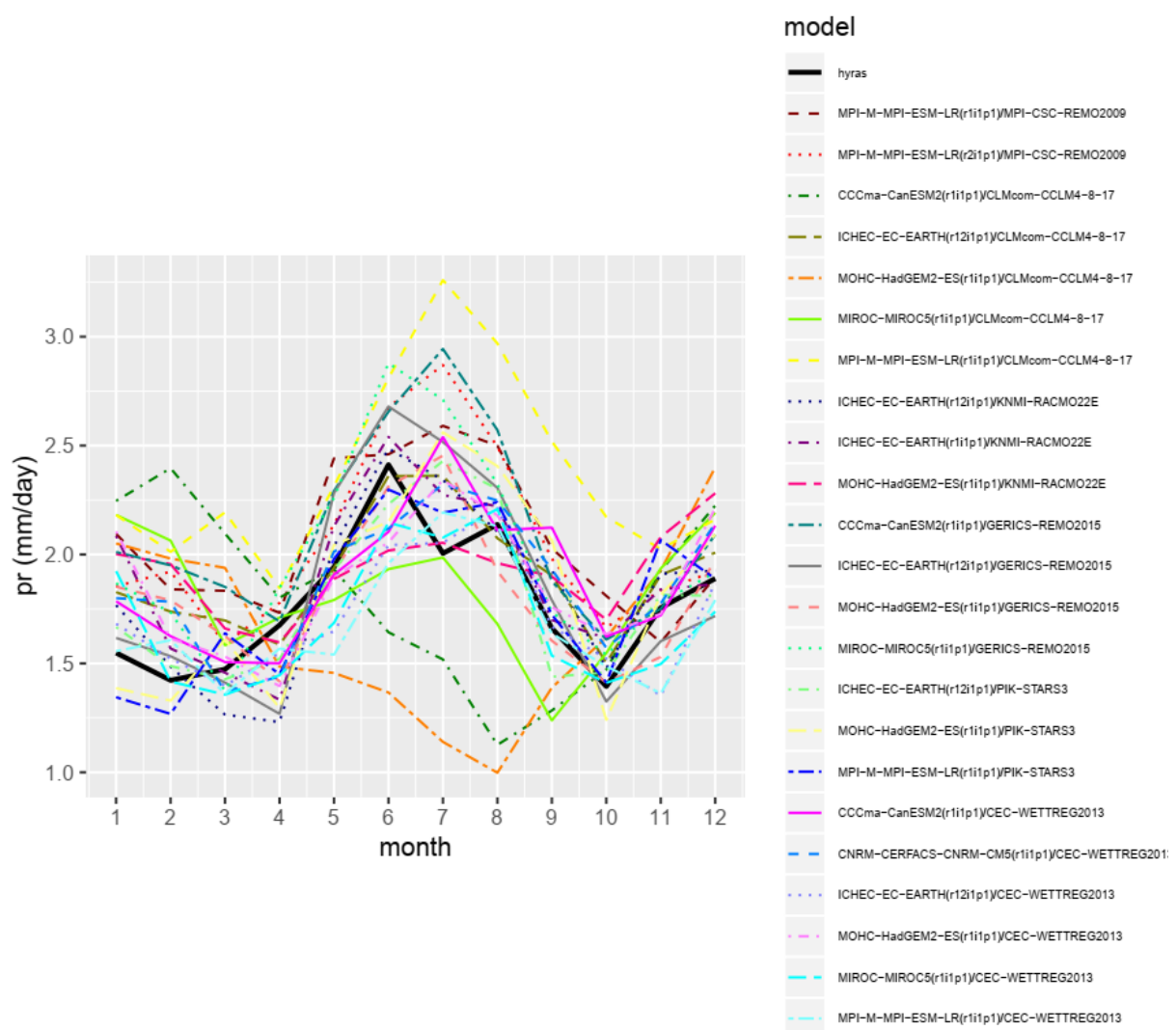


Abbildung 16: Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang des Niederschlags (pr) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX

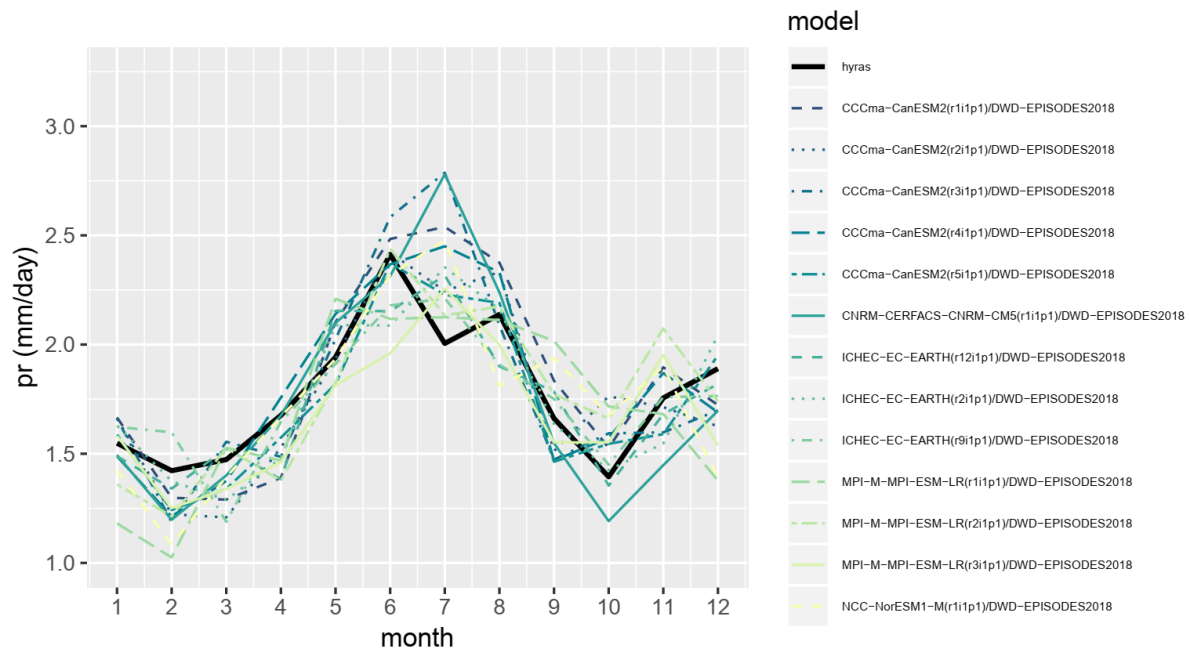


Abbildung 17: Räumlich und langjährig monatlich gemittelter Jahresgang des Niederschlags (*pr*) des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPI-SODES

Es zeigen sich für die Modelldaten unterschiedlich große Abweichungen über die einzelnen Monate.

Besonders auffallend sind hier die beiden Modellkombinationen

- CCCma-CanESM2/CLMcom-CCLM4-8-17 und
- MOHC-HadGEM2-ES/CLMcom-CCLM4-8-17,

die nahezu einen inversen Jahresgang des Niederschlags im Vergleich zur Beobachtung zeigen.

Weiterhin fällt auf, dass

- MPI-M-MPI-ESM-LR(r1i1p1)/CLMcom-CCLM4-8-17

den Niederschlag in nahezu allen Monaten deutlich überschätzt.

Taylordiagramme

Äquivalent zur Temperatur werden nachfolgend die Taylordiagramme für den Niederschlag (pr) dargestellt. Erneut beschreibt die Lage im Diagramm die Nähe der Modelldaten zu den Beobachtungsdaten. Je näher der Markierungspunkt eines Modells am Punkt der Beobachtung liegt (vorliegend ein grünes Viereck bzw. ein leerer Kreis auf der x-Achse), desto näher liegt dessen historical-Lauf an dem HYRAS-Datensatz.

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die Taylordiagramme für den Zusammenhang des räumlich und langjährig monatlich gemittelten Niederschlags aus den Modellen zur Beobachtung (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17).

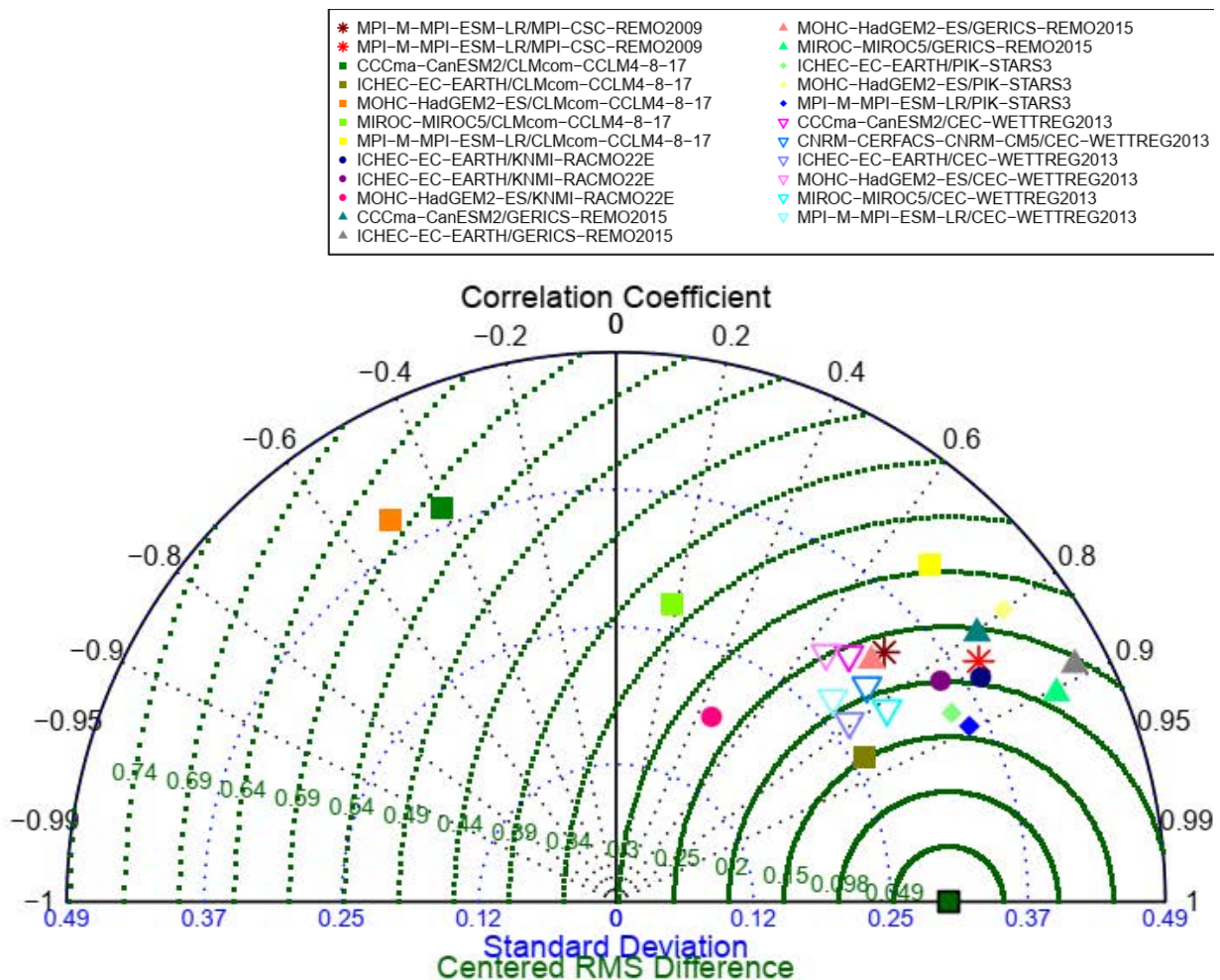


Abbildung 18: Taylordiagramm für den Niederschlag pr , räumlich und langjährig monatlich gemittelt. Dargestellt ist der Zusammenhang des Jahresgangs des Niederschlags anhand des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKIIes-De und EURO-CORDEX.

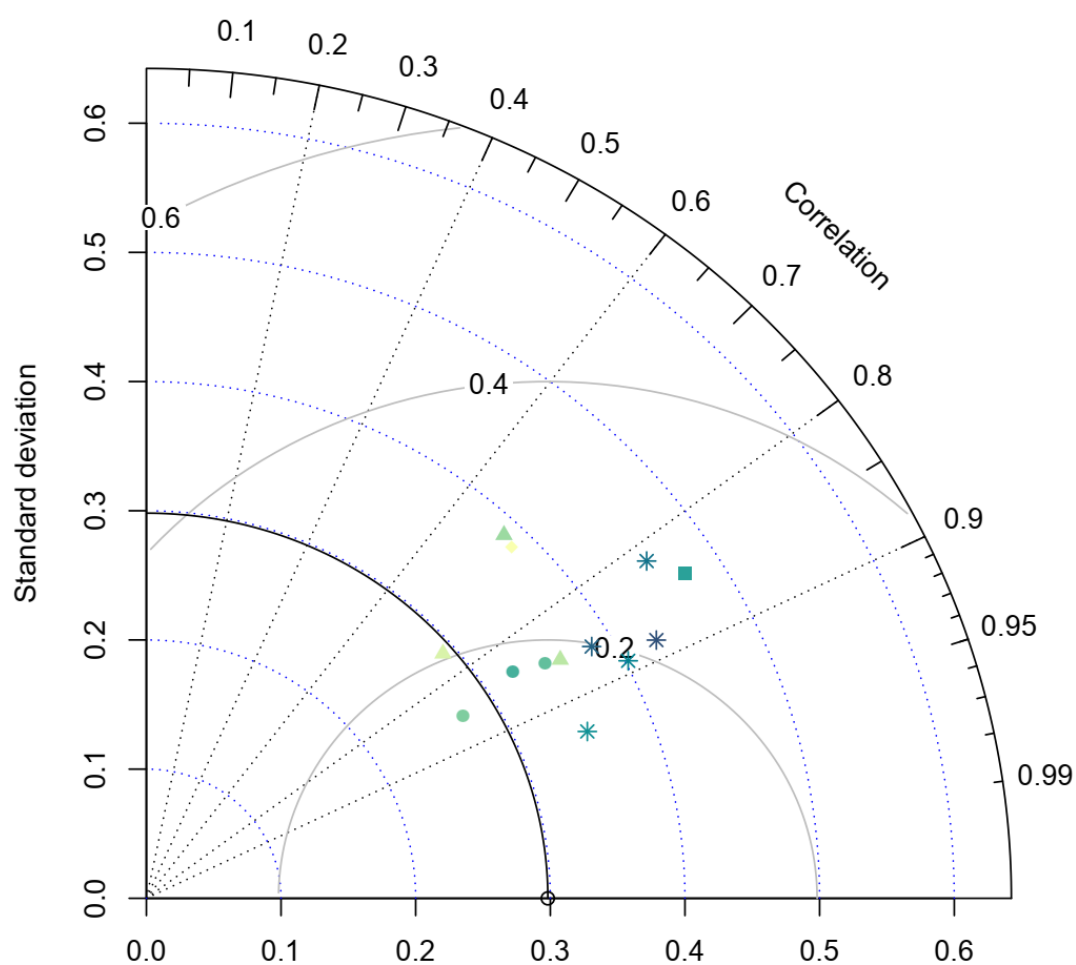
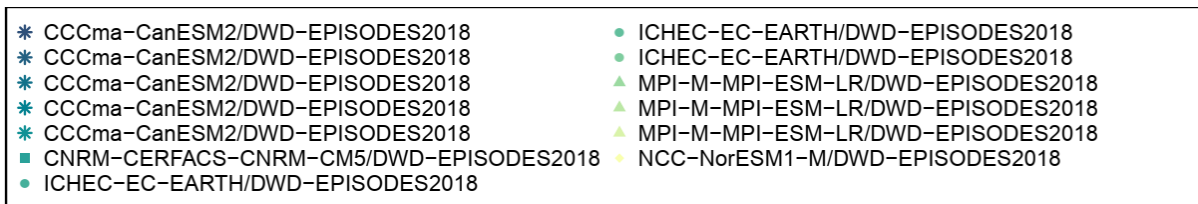


Abbildung 19: Taylordiagramm für den Niederschlag *pr*, räumlich und langjährig monatlich gemittelt. Dargestellt ist der Zusammenhang des Jahresgangs des Niederschlags anhand des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPIISODES

Es zeigt sich, dass sich der Zusammenhang zwischen langjährigem Monatsmittel für die beiden Modellkombinationen

- CCCma-CanESM2/CLMcom-CCLM4-8-17 und

- MOHC-HadGEM2-ES/CLMcom-CCLM4-8-17

aus Anwendersicht und nach Auffassung der Autoren nicht zufriedenstellend darstellt. Der Korrelationskoeffizient ist negativ, der *RMSE* rund doppelt so groß wie die Standardabweichung der Beobachtung. Diese beiden Modellkombinationen fallen auch in Abbildung 16 auf.

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen das Taylordiagramm für die pro Gitterzelle zeitlich gemittelten Niederschlagsdaten. Sie geben den Zusammenhang zwischen der räumlichen Struktur der Modelldaten und Beobachtung wieder.

Auffallend sind hierbei die REMO2009- und REMO2015-Modellierungen. Die Korrelationskoeffizienten sind deutlich schwächer als bei den anderen Modellierungen. REMO2009 und REMO2015 zeigen besonders in den Mittelgebirgsregionen Schwierigkeiten in der Darstellung des Niederschlags (hier nicht gezeigt, darauf wird im Folgenden noch eingegangen).

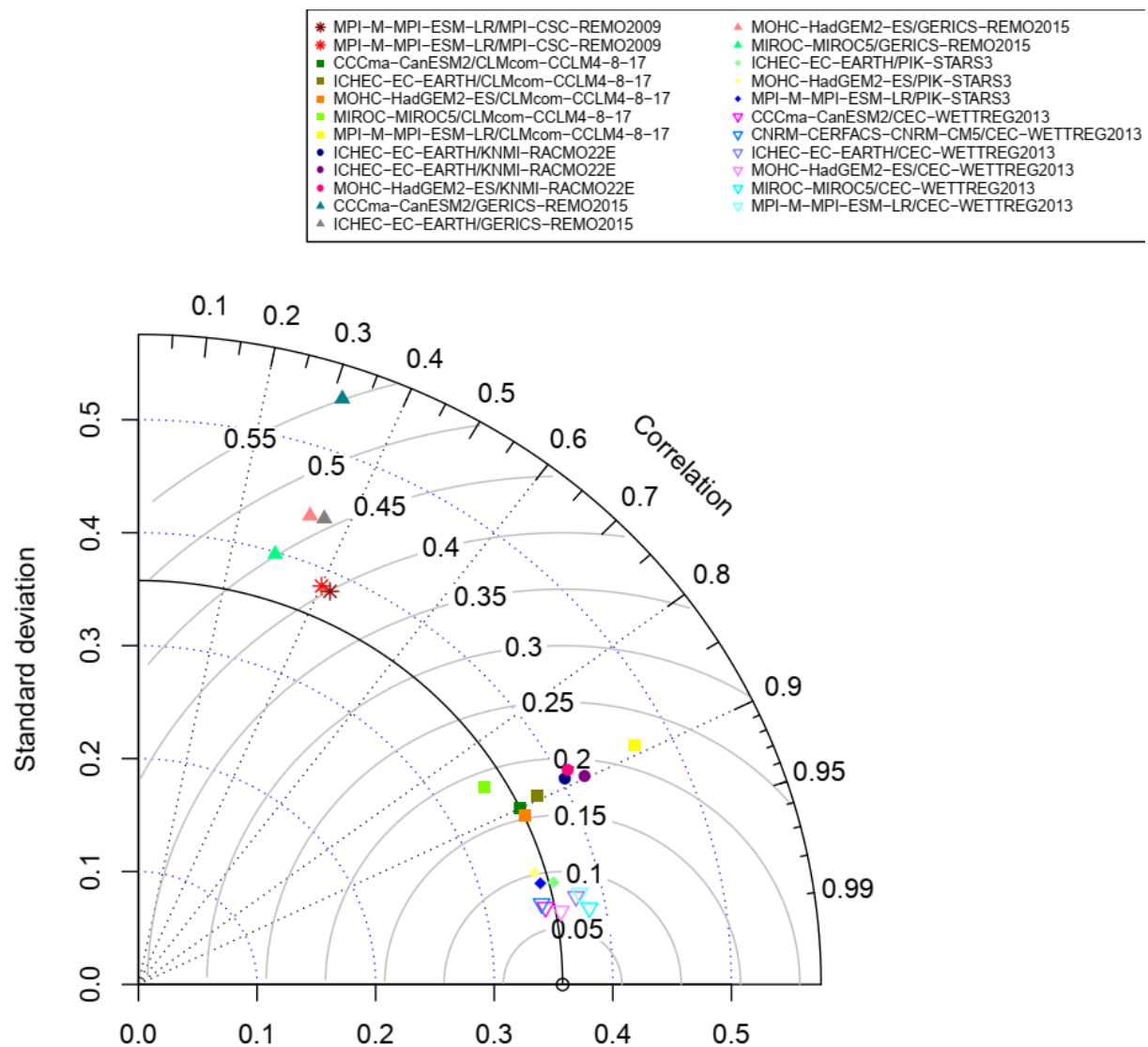


Abbildung 20: Taylordiagramm für den Niederschlag (*pr* zeitlich gemittelt). Dargestellt ist der Zusammenhang der räumlichen Struktur der Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX.

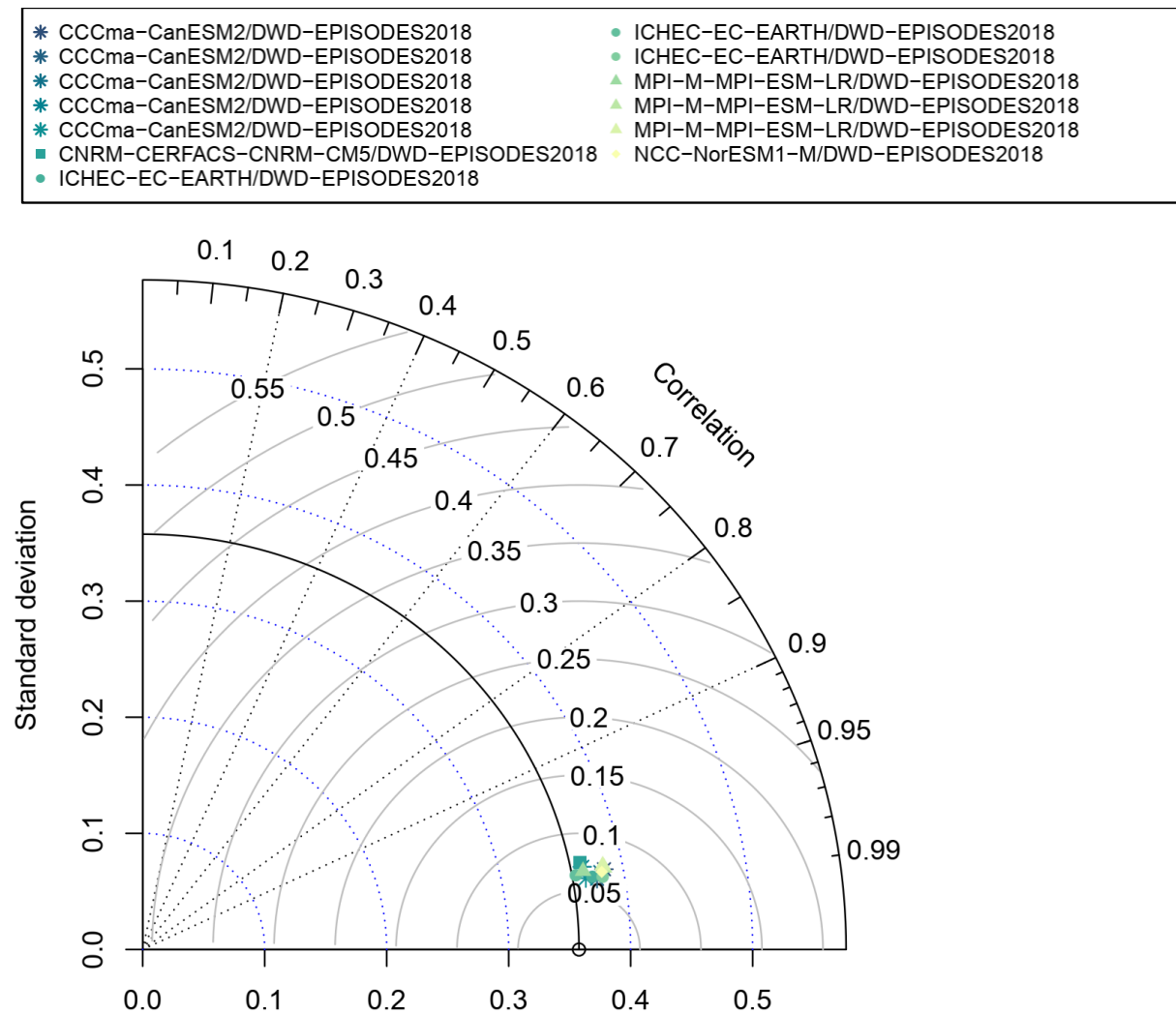


Abbildung 21: Taylordiagramm für den Niederschlag (*pr* zeitlich gemittelt). Dargestellt ist der Zusammenhang der räumlichen Struktur der Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPIISODES

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Taylordiagramme für den Niederschlag (*pr* - gegitert und langjährig monatlich gemittelt). Dies beinhaltet somit eine räumliche und eine zeitliche Komponente des Zusammenhangs und fasst Abbildung 18 und Abbildung 20 bzw. Abbildung 19 und Abbildung 21 zusammen (nicht linear!).

Modelle, die durch zeitliche oder räumliche Mängel auffielen, überzeugen in der Zusammenschau dieser beiden Komponenten ebenfalls nicht.

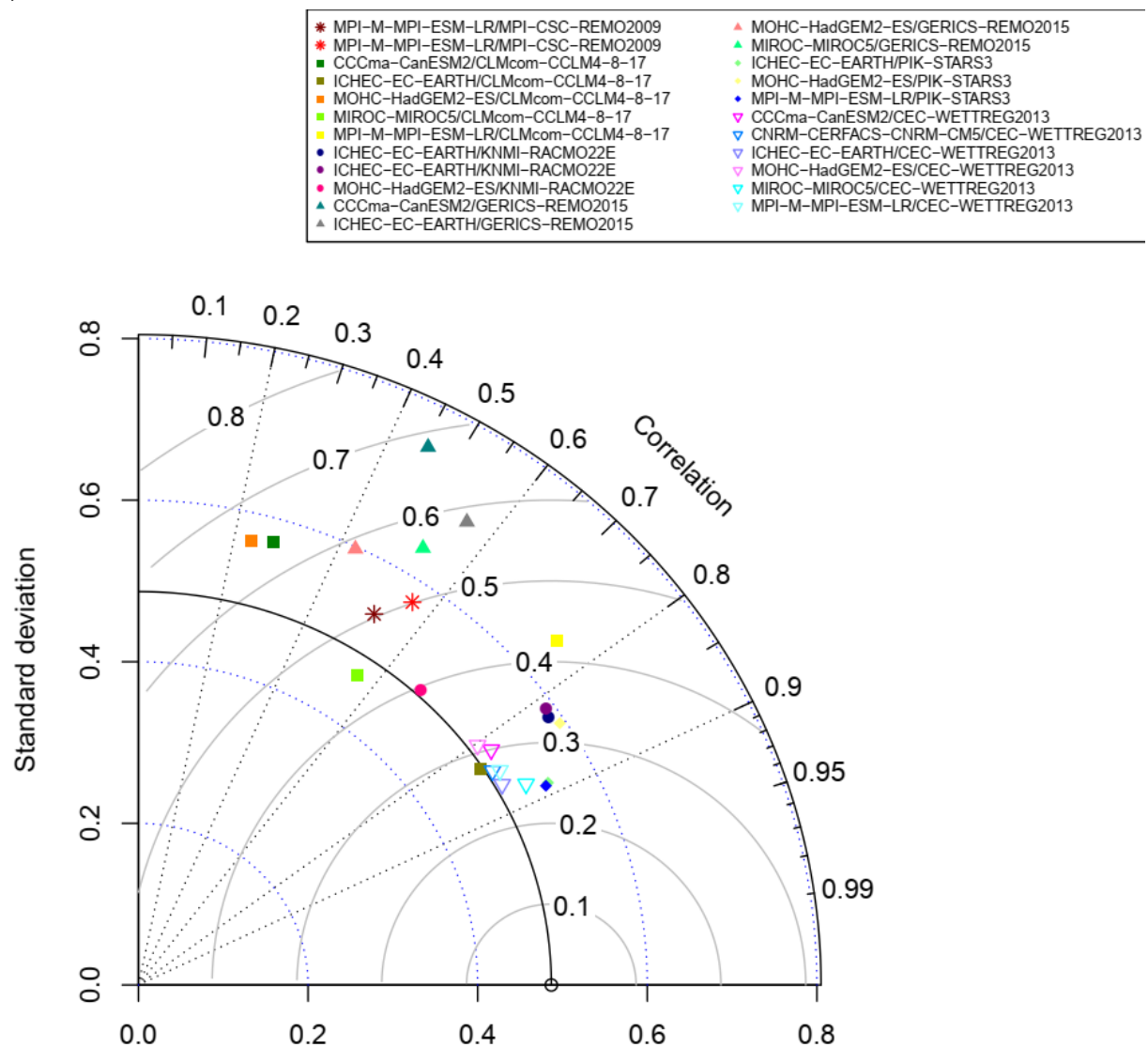


Abbildung 22: Taylordiagramm für pr , langjährig monatlich gemittelt. Dies zeigt den Zusammenhang zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX mit räumlicher und zeitlicher (Jahresgang) Komponente auf

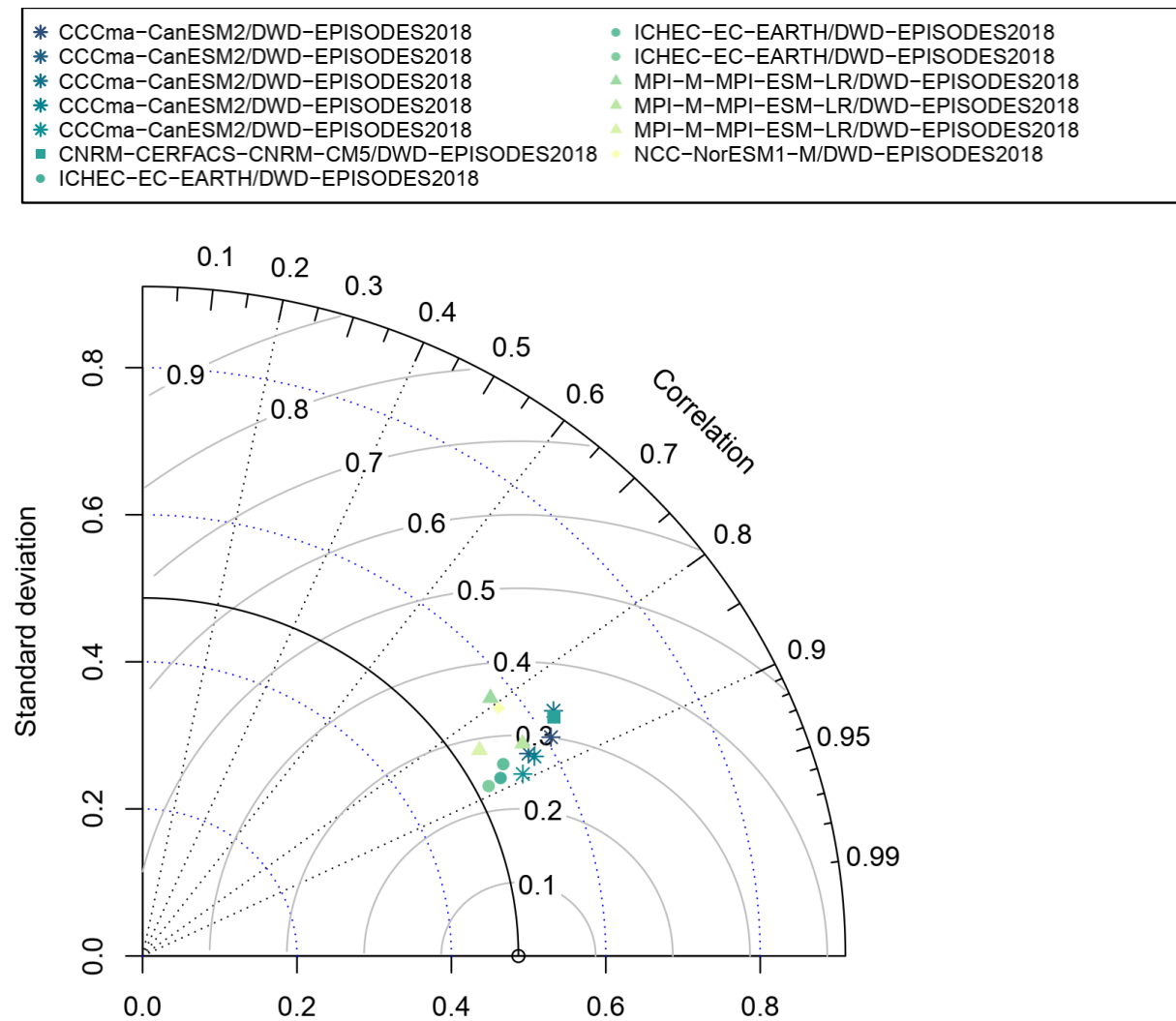


Abbildung 23: Taylordiagramm für *pr*, langjährig monatlich gemittelt. Dies zeigt den Zusammenhang zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPIISODES mit räumlicher und zeitlicher (Jahresgang) Komponente auf

Weiterführende Auswertungen zum Niederschlag

Der Mean Absolut Error (*MAE*) stellt ein statistisches Maß für den Fehler an jedem Gitterpunkt zwischen Modell und Beobachtung dar.

Er ist definiert als

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_{mj} - y_{oj}|$$

mit

n Stichprobenumfang,

y_{mj} einzelner Wert der Modelldaten-Stichprobe,

y_{oj} einzelner Wert der Beobachtungsdaten-Stichprobe, und

j Laufindex.

Negative und positive Abweichungen zu unterschiedlichen Zeit-/ Datenpunkten können sich aufgrund der Nutzung des Betrages der Differenz nicht ausgleichen.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 24 und Abbildung 25) zeigen den *MAE*.

In Abbildung 24 werden die für die Regionalisierungen, welche mit REMO2015 und REMO2009 durchgeführt wurden, bereits erwähnten Probleme in den Mittelgebirgsregionen des Betrachtungsgebietes deutlich. Im Vergleich zu anderen Regionalisierungen und Gebieten ist der *MAE* in den Mittelgebirgsregionen vergleichsweise hoch (siehe 1. und 3. Zeile in Abbildung 24).

Die Regionalisierungen mit EPISODES (Abbildung 25) zeigen keine Auffälligkeiten.

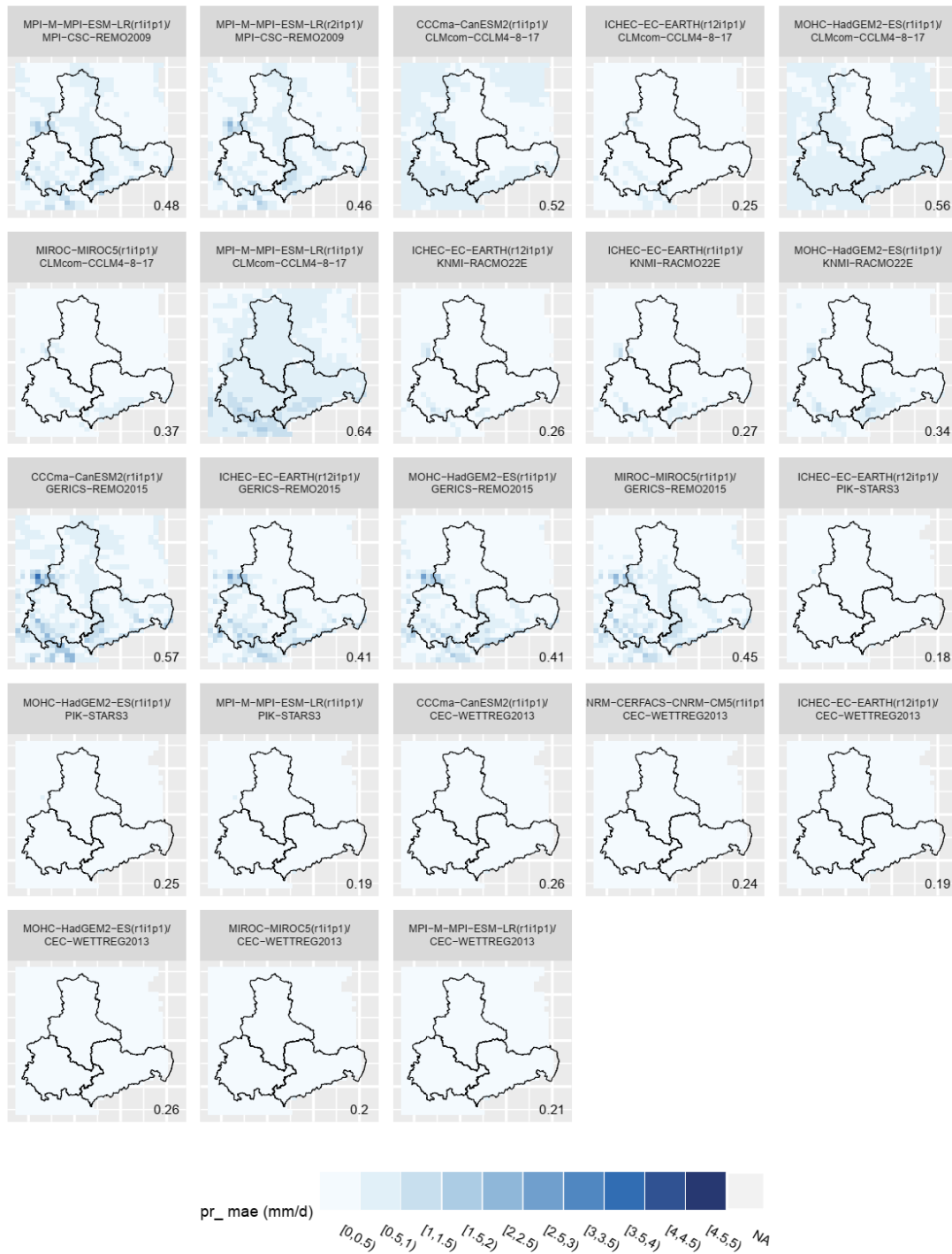


Abbildung 24: Mittlerer absoluter Fehler (Mean Absolut Error - MAE) für Niederschlag (*pr*) zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert unten rechts.

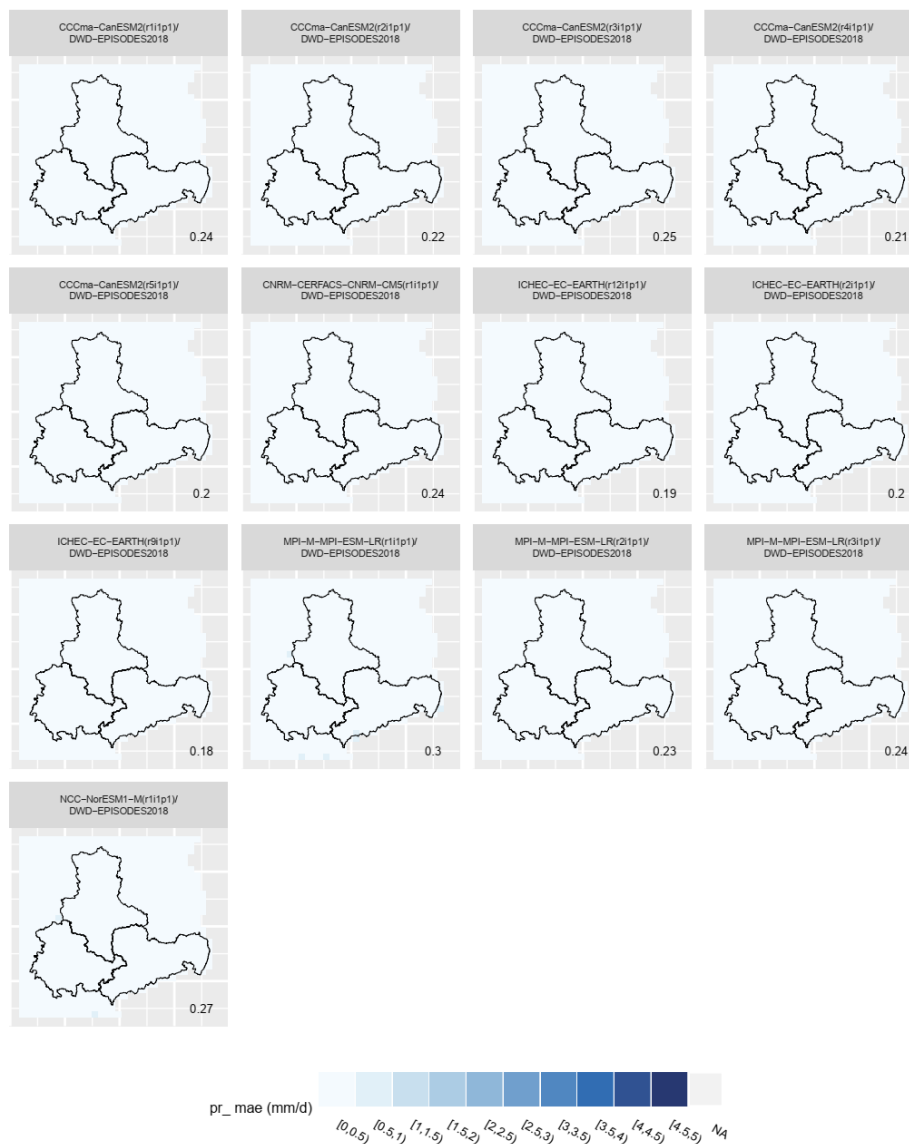


Abbildung 25: Mittlerer absoluter Fehler (Mean Absolut Error - MAE) für Niederschlag (pr) zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPIISODES an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert unten rechts.

In Abbildung 26 und Abbildung 27 ist der Korrelationskoeffizient zwischen den langjährig monatlich gemittelten Niederschlagsdaten aus Modell und Beobachtung dargestellt.

Es zeigt sich für fast alle Modellkombinationen eine positive Korrelation, die im Mittel über die Fläche für mehrere Modelle $\geq 0,6$ beträgt. Für die beiden Modellkombinationen

- CCCma-CanESM2/CLMcom-CCLM4-8-17 und
- MOHC-HadGEM2-ES/CLMcom-CCLM4-8-17

zeigt sich hingegen eine negative Korrelation im nahezu ganzen betrachteten Gebiet. Dies beschreibt nochmals den nahezu inversen Niederschlagsjahresgang, der schon in Abbildung 16 diskutiert wurde.

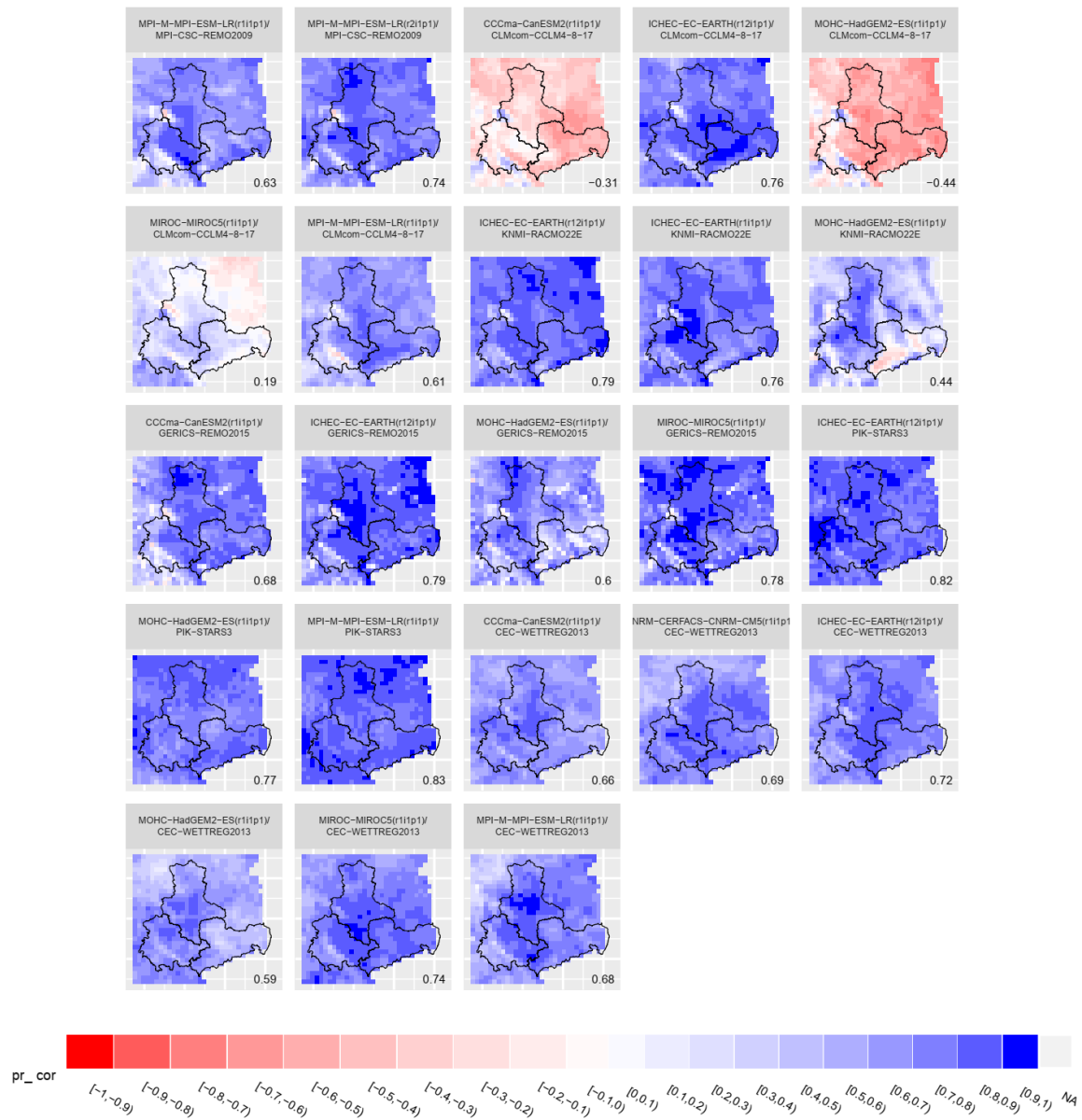


Abbildung 26: Pearson-Korrelationskoeffizient für den Niederschlag pr zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert der Korrelationskoeffizienten ist unten rechts eingetragen.

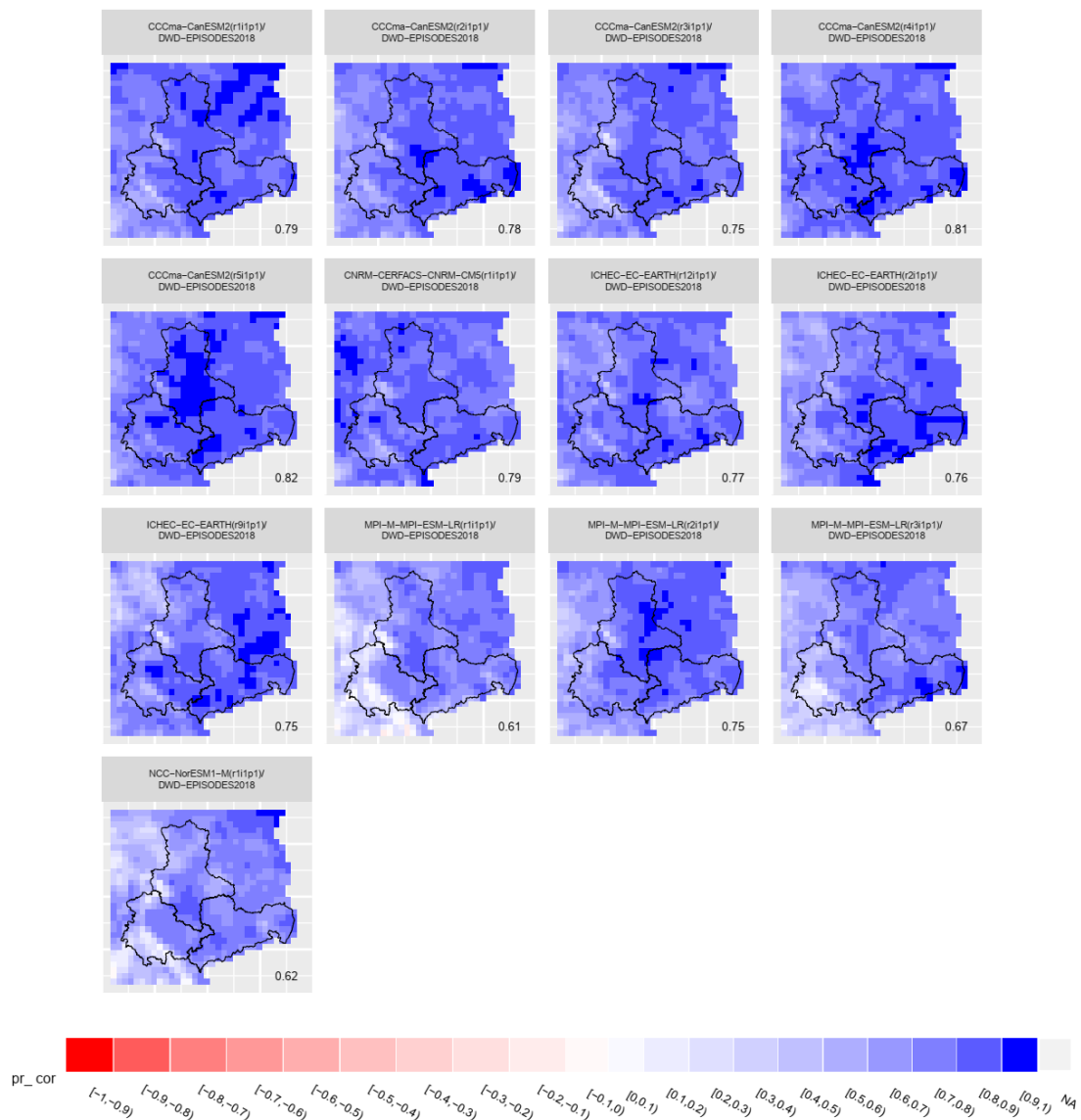


Abbildung 27: Pearson-Korrelationskoeffizient für den Niederschlag pr zwischen den Daten des Beobachtungsdatensatzes HYRAS und den betrachteten Modellkombinationen aus EPISODES an jedem Gitterpunkt aus langjährig monatlich gemittelten Daten. Flächenmittelwert der Korrelationskoeffizienten ist unten rechts eingetragen.

Um nicht nur die zeitliche Komponente der Korrelation darzustellen, wurde auch die Pattern Correlation (*paco*) berechnet. Diese ist schon in den Taylordiagrammen der zeitlichen Mittel ablesbar (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21), soll aber hier als konkreter Zahlenwert dargestellt werden. Hierzu wurden die gegitterten zeitlichen Mittel der Niederschlagsdaten genutzt, um den Korrelationskoeffizient, der den Zusammenhang der räumlichen Struktur zwischen Modell- und Beobachtungsdaten aufzeigt, zu berechnen.

Tabelle 3 fasst die Pattern Correlation für die verschiedenen Modellkombinationen zusammen.

Erneut fallen die REMO2015- und REMO2009-Regionalisierungen auf. Die *paco* weist für diese Regionalisierungen Koeffizienten von $\sim 0,3$ bis $0,4$ auf. Dies weist auf den unbefriedigenden räumlichen Zusammenhang zwischen Modell- und Beobachtungsdaten hin, welcher weiter oben schon angedeutet wurde.

Tabelle 3: Pattern Correlation (*paco*) für zeitlich gemittelten Niederschlag zwischen Modell- und Beobachtungsdaten.

Modellkombination	<i>paco</i>
MPI-M-MPI-ESM-LR(r1i1p1)/ MPI-CSC-REMO2009	0,42
MPI-M-MPI-ESM-LR(r2i1p1)/ MPI-CSC-REMO2009	0,40
CCCma-CanESM2(r1i1p1)/ CLMcom-CCLM4-8-17	0,90
ICHEC-EC-EARTH(r12i1p1)/ CLMcom-CCLM4-8-17	0,90
MOHC-HadGEM2-ES(r1i1p1)/ CLMcom-CCLM4-8-17	0,91
MIROC-MIROC5(r1i1p1)/ CLMcom-CCLM4-8-17	0,86
MPI-M-MPI-ESM-LR(r1i1p1)/ CLMcom-CCLM4-8-17	0,89
ICHEC-EC-EARTH(r12i1p1)/ KNMI-RACMO22E	0,89
ICHEC-EC-EARTH(r1i1p1)/ KNMI-RACMO22E	0,90
MOHC-HadGEM2-ES(r1i1p1)/ KNMI-RACMO22E	0,89
CCCma-CanESM2(r1i1p1)/ GERICS-REMO2015	0,31
ICHEC-EC-EARTH(r12i1p1)/ GERICS-REMO2015	0,36
MOHC-HadGEM2-ES(r1i1p1)/ GERICS-REMO2015	0,33
MIROC-MIROC5(r1i1p1)/ GERICS-REMO2015	0,29
ICHEC-EC-EARTH(r12i1p1)/ PIK-STARS3	0,97
MOHC-HadGEM2-ES(r1i1p1)/ PIK-STARS3	0,96
MPI-M-MPI-ESM-LR(r1i1p1)/ PIK-STARS3	0,97
CCCma-CanESM2(r1i1p1)/ CEC-WETTREG2013	0,98
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5(r1i1p1)/ CEC-WETTREG2013	0,98
ICHEC-EC-EARTH(r12i1p1)/ CEC-WETTREG2013	0,98
MOHC-HadGEM2-ES(r1i1p1)/ CEC-WETTREG2013	0,98
MIROC-MIROC5(r1i1p1)/ CEC-WETTREG2013	0,98
MPI-M-MPI-ESM-LR(r1i1p1)/ CEC-WETTREG2013	0,98
CCCma-CanESM2(r1i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
CCCma-CanESM2(r2i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,99
CCCma-CanESM2(r3i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
CCCma-CanESM2(r4i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
CCCma-CanESM2(r5i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,99
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5(r1i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
ICHEC-EC-EARTH(r12i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,99
ICHEC-EC-EARTH(r2i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
ICHEC-EC-EARTH(r9i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,99
MPI-M-MPI-ESM-LR(r1i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
MPI-M-MPI-ESM-LR(r2i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
MPI-M-MPI-ESM-LR(r3i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98
NCC-NorESM1-M(r1i1p1)/ DWD-EPIISODES2018	0,98

In Abbildung 28 sind Taylordiagramme für die Anzahl verschiedener Andauer-Kenngrößen, die auf dem Niederschlag basieren, dargestellt.

Eine Trockenperiode (links in Abbildung 28) wurde definiert als mindestens fünf zusammenhängende Tage, an denen weniger als 1 mm Tagesniederschlag fällt (Trockentage). Eine Niederschlagsperiode (rechts in Abbildung 28) wurde definiert als mindestens fünf zusammenhängende Tage, an denen 1 mm oder mehr Tagesniederschlag fällt (Niederschlagstage).

Diese festen Grenzwerte zur Bestimmung von Trocken- oder Niederschlagstagen und -perioden kann zu Differenzen zwischen Modell- und Beobachtungsdaten führen. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Aspekt den ESD-Methoden Vorteile gegenüber den RCM einbringt, ist hoch.

Erneut zeigt sich, dass die REMO2015- und REMO2009-Regionalisierungen Defizite gegenüber anderen Projektionen aufweisen. Die Ursache dafür besteht höchstwahrscheinlich in dem räumlichen Problem dieser Projektionen in den Mittelgebirgsregionen.

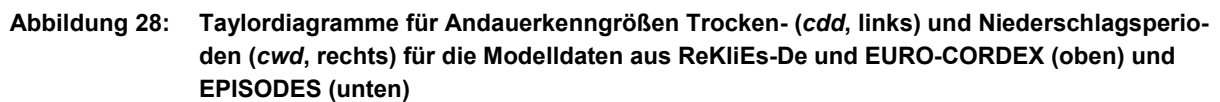


Abbildung 29 und Abbildung 30 stellen die relative Abweichung der Anzahl von Niederschlagstagen von Modell- zu Beobachtungsdaten dar.

Es ist zu erkennen, dass die meisten Modellkombinationen in Abbildung 29 zu viele Niederschlagstage simulieren. Weiterhin fallen auch wieder die räumlichen Probleme aus den REMO-Regionalisierungen auf. EPISODES-Regionalisierungen (Abbildung 30) zeigen erwartungsgemäß vergleichsweise geringe Auffälligkeiten.

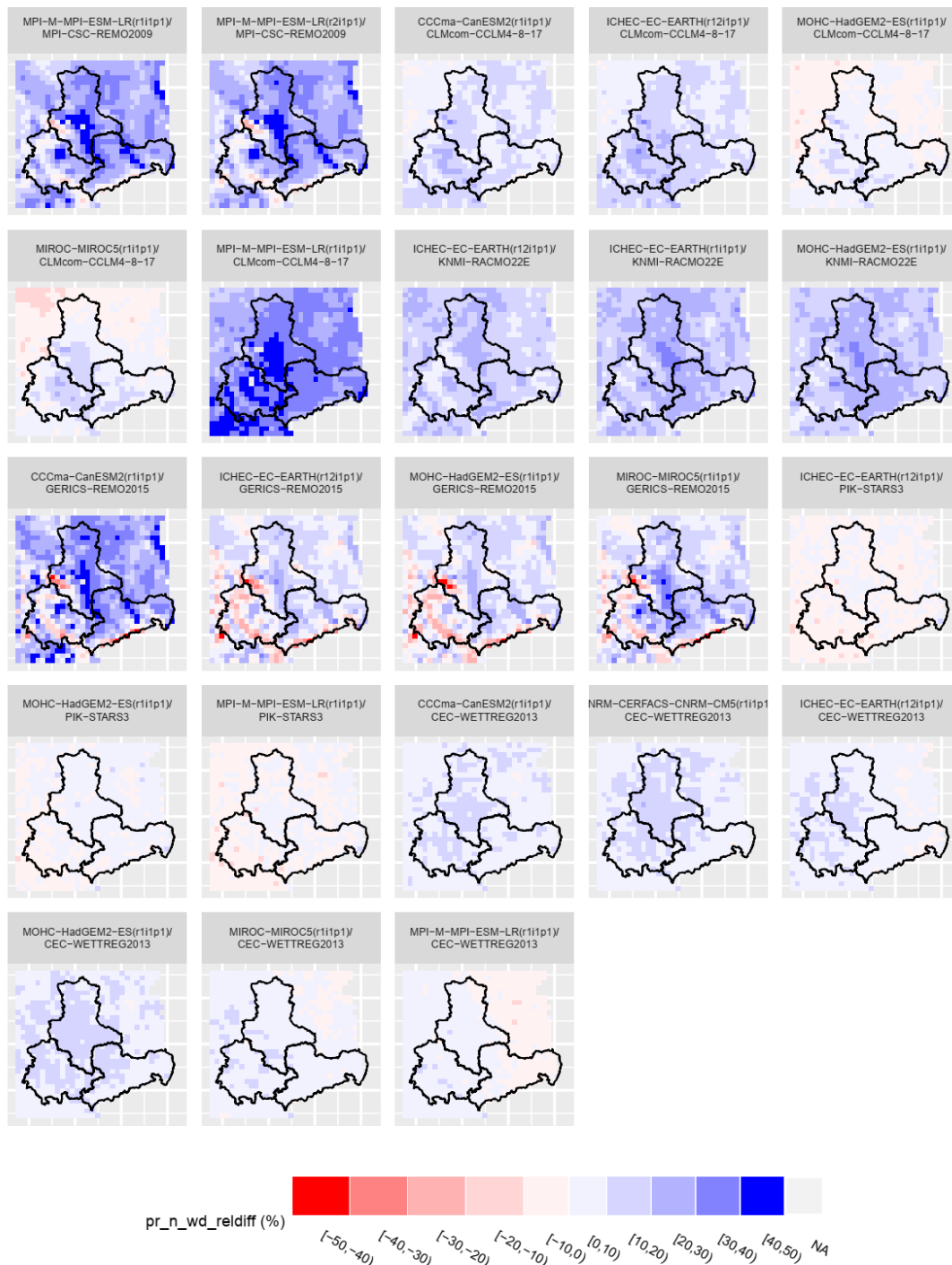


Abbildung 29: Relative Abweichung der Anzahl an Niederschlagstagen (Tagesniederschlag ≥ 1 mm) in den Modelldaten aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX zur Beobachtung HYRAS

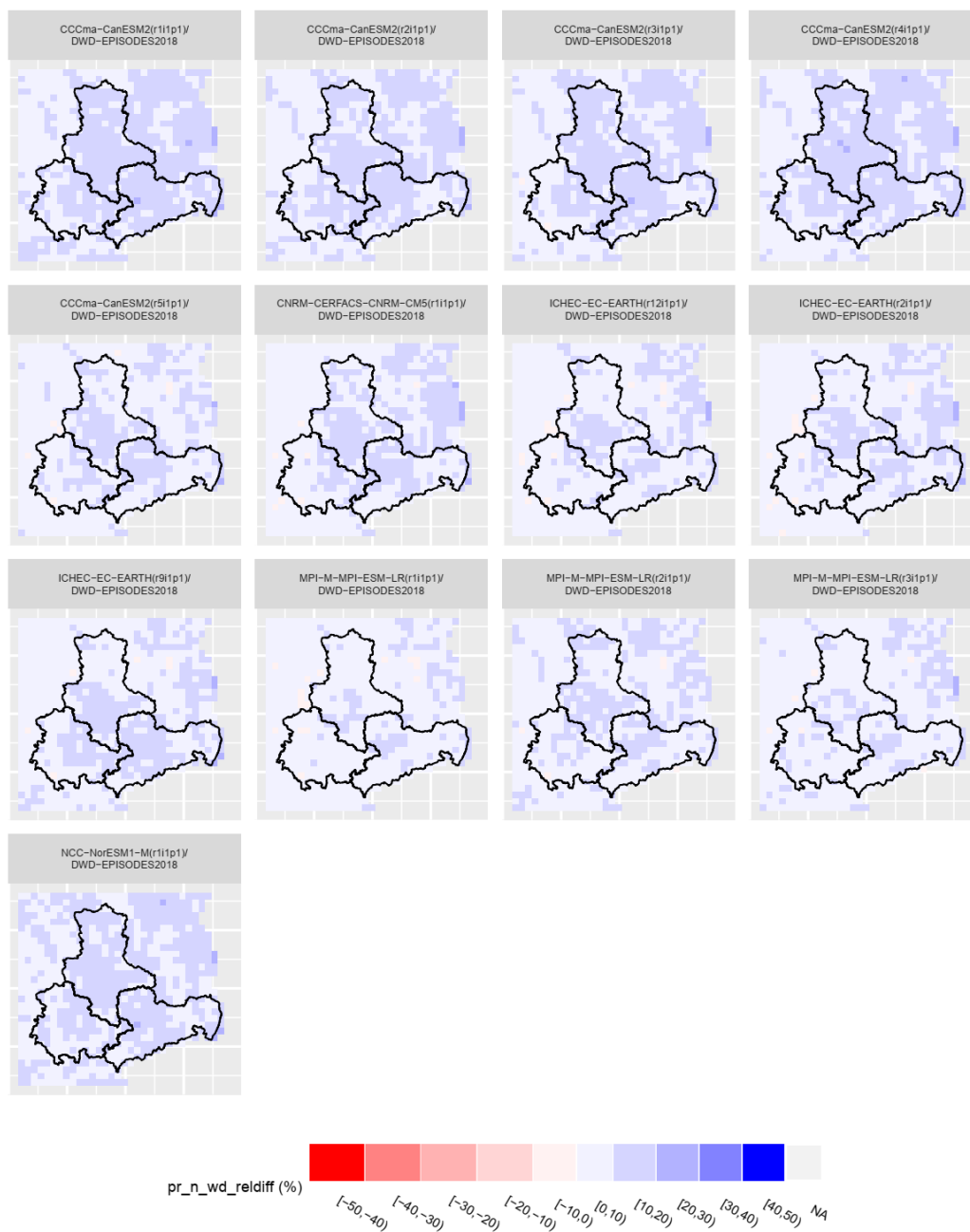


Abbildung 30: Relative Abweichung der Anzahl an Niederschlagstagen (Tagesniederschlag $\geq 1\text{mm}$) in den Modelldaten aus EPISODES zur Beobachtung HYRAS

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die relative Abweichung des 99. Perzentils der Tagesniederschlagsverteilung an jedem Gitterpunkt zwischen Modell- und Beobachtungsdaten. Das 99. Perzentil stellt ein Maß des modellierten bzw. beobachteten (täglichen) Extremniederschlags dar.

Vergleicht man Abbildung 31 und Abbildung 29, so wird deutlich, dass die Mehrzahl der Modelle, die mehr Niederschlagstage als in der Beobachtung simulieren, geringere Extremniederschläge (geringeres 99. Perzentil als in der Beobachtung) simulieren.

Für EPISODES zeichnet sich dagegen kein einheitliches Bild dieses Zusammenhangs: Die relative Abweichung der Anzahl der Niederschlagstage (Abbildung 30) ist gering. Die relative Abweichung des Extremniederschlags (99. Perzentil, Abbildung 32) hingegen in einigen Modellläufen regional auffallend hoch und mit den Größenordnungen der RCMs (Abbildung 31) vergleichbar.

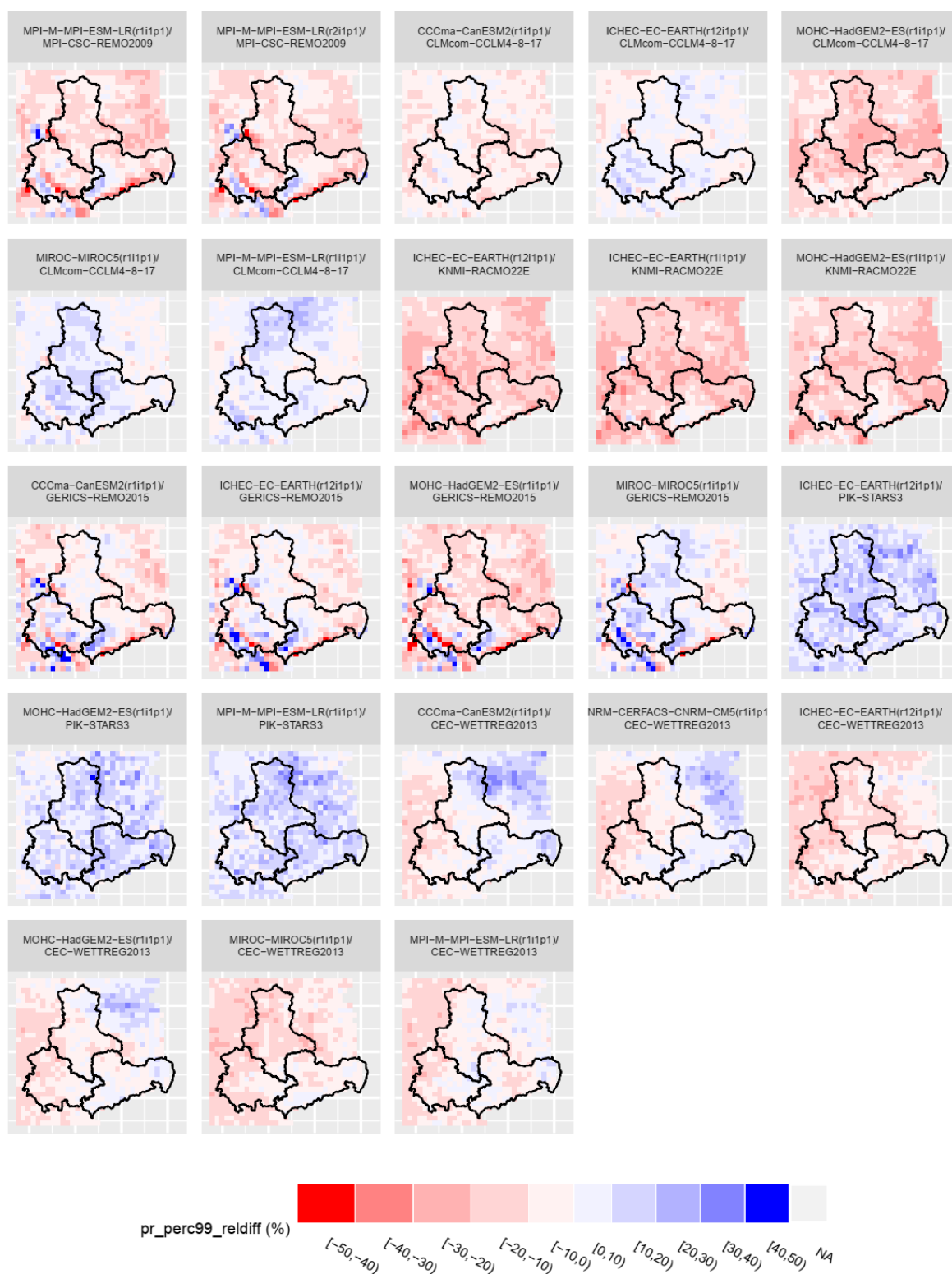


Abbildung 31: Relative Abweichung des 99. Perzentil der Tagesniederschlagsverteilung (Tage mit Tagesniederschlag < 0,1mm ausgeschlossen) aus Modelldaten aus ReKliEs-De und EURO-CORDEX zur Beobachtung HYRAS

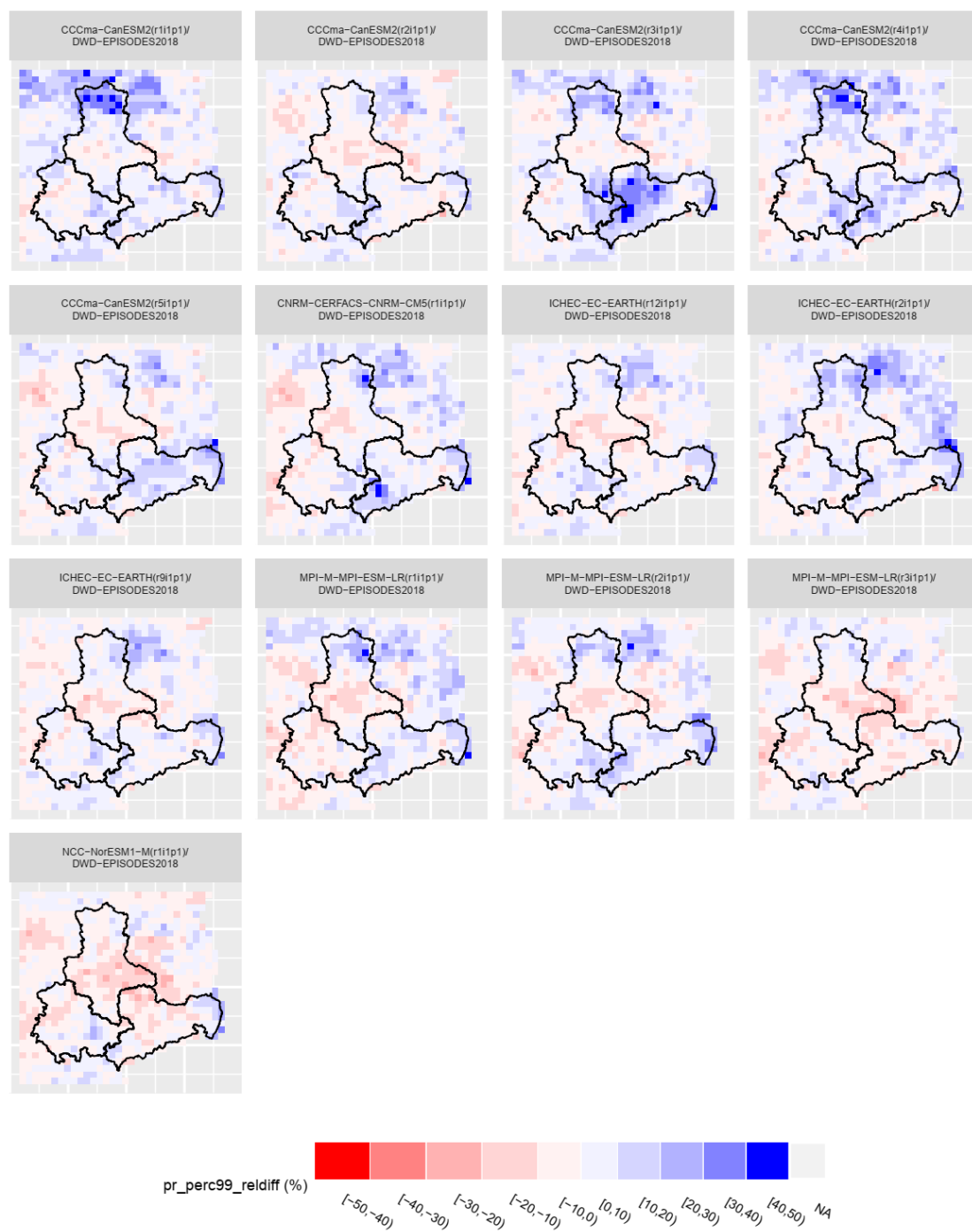


Abbildung 32: Relative Abweichung des 99. Perzentil der Tagesniederschlagsverteilung (Tage mit Tagesniederschlag < 0,1mm ausgeschlossen) aus Modelldaten aus EPISODES zur Beobachtung HYRAS

IV. Ergebnis der Qualitätskontrolle

Im Ergebnis der durchgeführten Qualitätskontrolle lässt sich zusammenfassen, dass alle historischen-Läufe der betrachteten Modelle die Klimagröße Temperatur *tas* hinreichend übereinstimmend mit dem Beobachtungsdatensatz (HYRAS) wiedergeben.

Die Untersuchungen zur Klimagröße Niederschlag *pr* ergaben dagegen ein inhomogenes Bild:

- Die Auswertungen für die Regionalisierungen, welche mit REMO2009 und REMO2015 durchgeführt wurden, zeigen vor allem in den Mittelgebirgsregionen räumliche Defizite.
- Die Regionalisierungen, welche mit den Modellkombinationen CCCma-CanESM2/CLMcom-CCLM4-8-17 und MOHC-HadGEM2-ES/CLMcom-CCLM4-8-17 realisiert wurden, zeigen nicht vernachlässigbare zeitliche Defizite bezüglich des Jahresgangs des Niederschlags.

Im Ergebnis dieser Erkenntnisse wurde beschlossen, diese hier benannten Modellkombinationen aus dem Referenzensemble auszuschließen.

Dieser Ausschluss basiert ausschließlich auf der subjektiven Bewertung der Ergebnisse dieser Projektionen durch die Autoren. Die Modellphysik war weder Gegenstand der Betrachtung, noch wurde sie im Rahmen dieser Qualitätskontrolle bewertet.