

## **Institution**

Institut für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen  
Senckenbergstraße 1  
35390 Gießen



GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel  
Düsternbrooker Weg 20  
24105 Kiel



## **Projekttitlel**

Klimawandel und Extremwetter in Hessen – Analyse von Beobachtungsdaten des 20. Jahrhunderts und Ensembleprojektionen für das 21. Jahrhundert

- Abschlussbericht -

## **Laufzeit**

10 2009 – 06 2014

## **Projektleitung**

Prof. Dr. Jürg Luterbacher, Prof. Dr. Douglas Maraun

## **Projektbearbeitung**

Dr. Anne Schindler, Tom Lange

## **Auftraggeber**

Fachzentrum Klimawandel Hessen  
im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

## **Projektbetreuung**

Fachzentrum Klimawandel Hessen

Gießen und Kiel, Juli 2014



Forschungsprogramm INKLIM-A und weitere Projekte



## Zusammenfassung

In diesem Projekt wurden das Auftreten von extremen Wetter- und Klimaereignissen, und mögliche Änderungen infolge des menschengemachten Klimawandels untersucht. Generell kann nach dem heutigen Stand der Forschung davon ausgegangen werden, dass hessenweit mehr Hitzetage und tropische Nächte auftreten werden, Hitzewellen länger werden, extreme Niederschläge vor allem im Frühling und Herbst stärker werden und Dürren im Sommer länger werden. In der Regel werden in Südhessen stärkere Änderungen erwartet als in Mittel und Nordhessen. Im folgenden sind die wichtigsten zu erwartenden Änderungen (2060-2099 gegenüber 1960-1999) nach Regionen aufgelistet. Diese Änderungen sind mit relativ großen Unsicherheiten verbunden, häufig sind 50% stärkere oder schwächere Änderungen möglich.

### Nordhessen (nördlich der Linie Limburg-Gießen-Vogelsberg) und Rhön

Hitzetage	7-15 Tage mehr, auch geringere Zunahme möglich
tropische Nächte	7-10 Nächte mehr, auch geringere Zunahme möglich
Extrem heiße Tage	4-5°C wärmer, mehr als 2°C wärmer wahrscheinlich
Extrem warme Nächte	3-5°C wärmer, mehr als 2°C wärmer wahrscheinlich
Hitzewellen	2-4 Tage länger, auch geringere Zunahme möglich
Aufeinanderfolge Tropischer Nächte	2-3 Tage länger
Starkniederschlag (>20mm/Tag)	Frühling: 0,5-1 Tage mehr; Herbst, Winter: 0,5-2 Tage mehr (Westerwald: 1-2 Tage mehr), auch geringere Zunahme möglich;
Extremniederschläge	Herbst: 20-40% stärker, Frühling: 10-30% stärker, Winter: 5-20% stärker
Dürren	Sommer: 4-6 Tage länger, auch geringere Zunahme möglich

### Taunus, Vogelsberg, Wetterau und Odenwald

Hitzetage	10-15 Tage mehr, auch geringere Zunahme möglich
tropische Nächte	7-15 Nächte mehr, auch geringere Zunahme möglich
Extrem heiße Tage	4- 5°C wärmer (Wetterau > 5°C), mehr als 2°C wärmer wahrscheinlich
Extrem warme Nächte	3-5°C wärmer, mehr als 2°C wärmer wahrscheinlich
Hitzewellen	3-5 Tage länger, auch geringere Zunahme möglich
Aufeinanderfolge Tropischer Nächte	3-5 Tage länger
Starkniederschlag (>20mm/Tag)	Frühling: 0,5-1 Tage mehr, Herbst & Winter: 0,5-2 Tage mehr, auch geringere Zunahme möglich
Extremniederschläge	Herbst: 20-40% stärker, Frühling: 10-40% stärker, Winter: 5-20% stärker
Dürren	Sommer: 4-8 Tage länger, auch geringere Zunahme möglich

### Rhein-Main und Hessisches Ried

Hitzetage	10-20 Tage mehr, auch geringere Zunahme möglich
tropische Nächte	10-15 Nächte mehr, auch geringere Zunahme möglich
Extrem heiße Tage	>4°C wärmer, mehr als 2°C wärmer wahrscheinlich
Extrem warme Nächte	4-5°C wärmer, mehr als 2°C wärmer wahrscheinlich
Hitzewellen	3-7 Tage länger, auch geringere Zunahme möglich
Aufeinanderfolge Tropischer Nächte	3-5 Tage länger
Starkniederschlag (>20mm/Tag)	Winter & Frühling: 0,5-1 Tage mehr, Herbst: 1-2 Tage mehr, auch geringere Zunahme möglich
Extremniederschläge	Herbst: >30% stärker, Frühling: 20-30% stärker, Winter: 5-15% stärker
Dürren	Sommer: 6-8 Tage länger, auch geringere Zunahme möglich

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Betrachtete Indizes</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Beobachtete Extremereignisse</b>	<b>11</b>
3.1	Daten	11
3.2	Temperatur	12
3.2.1	Hitzetage und tropische Nächte	12
3.2.2	Extrema der Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen	12
3.2.3	Perioden von Hitzetagen und tropischen Nächten	13
3.3	Niederschlag	14
3.3.1	Intensität des Niederschlags	14
3.3.2	Tage mit Starkniederschlag	14
3.3.3	Extrema des Tagesniederschlags	15
3.3.4	Trockenperioden	15
3.4	Trends in Extremniederschlägen	17
<b>4</b>	<b>Klimawandelszenarien</b>	<b>19</b>
4.1	Modelldaten	20
4.2	Temperatur	22
4.2.1	Hitzetage und tropische Nächte	22
4.2.2	Extrema der Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen	23
4.2.3	Perioden von Hitzetagen und tropischen Nächten	23
4.3	Niederschlag	26
4.3.1	Intensität des Niederschlags	26
4.3.2	Tage mit Starkniederschlag	26
4.3.3	Extrema des Tagesniederschlags	29
4.3.4	Trockenperioden	30
4.3.5	Diskussion des INKLIM-A Modell Ensembles	30
4.4	Diskussion der Unsicherheiten	32
4.4.1	Einfluss von Modellfehlern	32
4.4.2	Einfluss von natürlichen Klimaschwankungen	32
<b>A</b>	<b>Modellvalidierung</b>	<b>35</b>
A.1	Temperatur	36
A.1.1	Hitzetage	36
A.1.2	Tropische Nächte	37
A.1.3	Tageshöchsttemperaturen	37

A.1.4	Tagestiefsttemperaturen . . . . .	37
A.2	Niederschlag . . . . .	39
A.2.1	Trockentage pro Jahreszeit . . . . .	39
A.2.2	Trockenperioden pro Jahreszeit . . . . .	39
A.2.3	Niederschlagsintensität . . . . .	39
A.2.4	Starkniederschlagstage pro Jahreszeit . . . . .	39
A.2.5	20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte des Tagesniederschlags . . . . .	39
A.3	Diskussion . . . . .	47

# Kapitel 1

## Einleitung

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts hat sich die globale Mitteltemperatur um etwa  $0,8^{\circ}\text{C}$  erhöht (Hartmann et al., 2013). Mit dieser Erwärmung gingen das Abschmelzen des Meereises, ein Anstieg des Meeresspiegels sowie die Veränderung von Niederschlagsmustern einher. Die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens die Hälfte der Erwärmung seit 1950 auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist, stuft das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) als extrem hoch ( $>95\%$ ) ein (Bindoff et al., 2013). Werden in Zukunft unvermindert Treibhausgase freigesetzt, wird sich das Klima bis zum Ende des Jahrhunderts weiter erwärmen, je nach Emissionsszenario zwischen etwa  $2$  bis  $4^{\circ}\text{C}$  gegenüber 1986-2005. Nur das ambitionierteste Szenario geht von einer geringeren Erwärmung aus (Collins et al., 2013). Anpassung an den Klimawandel hat deshalb große politische Bedeutung auf nationaler und internationaler Ebene. So haben sowohl die Europäische Union als auch Deutschland Klimaanpassungsstrategien verabschiedet (Europäische Kommission, 2013; Bundeskabinett, 2008).

Meist sind es extreme Wetter- und Klimaereignisse, die die verheerendsten Auswirkungen haben, z.B. auf Ökosysteme, Infrastruktur, Land- und Forstwirtschaft und Gesundheit. Es gibt starke Indizien, dass sich der Klimawandel auch auf das Auftreten von Extremereignissen ausgewirkt hat. Ebenso ist es sehr wahrscheinlich, dass sich das Auftreten von Extremereignissen in der Zukunft weiter ändern wird (Seneviratne et al., 2012).

Das Auftreten von Extremereignissen variiert regional sehr stark, weiterhin werden Anpassungsmaßnahmen häufig von einzelnen Bundesländern oder gar Gemeinden durchgeführt. Wissen über das regionale Auftreten von Extremereignissen und mögliche regionale Änderungen unter einem zukünftigen Klimawandel sind deshalb häufig unabdingbar für die Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen. In dieser Studie werden deshalb für das Bundesland Hessen und die angrenzenden Gebiete folgende Fragen untersucht:

- Wie stark waren extreme Wetter- und Klimaereignisse in den verschiedenen Regionen Hessens in den vergangenen Jahrzehnten?
- Welche Änderungen im Auftreten von Extremereignissen werden nach dem aktuellen Stand der Forschung im Laufe des 21. Jahrhunderts in den verschiedenen Regionen Hessens erwartet?

Dazu wurden Indizes zur Quantifizierung von Extremereignissen ausgewählt und sowohl Beobachtungsdaten als auch Modellsimulationen des zukünftigen Klimas in Bezug auf diese Indizes analysiert. Eine Karte der Regionen Hessens findet sich in Abbildung 1.1.

In Kapitel 2 werden die betrachteten Indizes vorgestellt. Kapitel 3 ist beobachteten Extremereignissen gewidmet, Kapitel 4 den Klimaszenarien. Zur besseren Lesbarkeit werden die Er-

gebnisse einer Modellvalidierung separat in einem Anhang vorgestellt. Diesen Untersuchungen sind mehrere Vorstudien vorangegangen, zudem wurden von den Projektpartnern neue Methoden entwickelt und auf Daten aus Hessen angewendet. Diese eher technischen Ergebnisse sind in den vorangegangenen Zwischenberichten detailliert aufgeführt.



Abbildung 1.1: Regionen und Landschaften in Hessen. Diese Karte basiert auf einer Vorlage der Wikipedia-Nutzer NordNordWest und Lencer. Sie kann unter einer GNU-Lizenz für freie Dokumentation, Version 1.2, kopiert, verbreitet oder modifiziert werden. Siehe [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deutschland\\_Landschaften.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deutschland_Landschaften.png).



## Kapitel 2

# Betrachtete Indizes

Als extreme Wetterereignisse bezeichnet das IPCC meteorologische Ereignisse, die selten vorkommen. Sind diese Ereignisse langanhaltend - über Wochen oder Monate - werden sie extreme Klimaereignisse genannt (Planton, 2013). Die Definition von "selten" variiert dabei je nach Kontext. Als moderate Extremereignisse werden Ereignisse bezeichnet, die etwa in 10, 5 oder 2% aller Ereignisse auftreten, also z.B. eine Tageshöchsttemperatur, die nur etwa alle 10, 20 oder 50 Tage überschritten wird. Solche Ereignisse sind per Definition nicht sehr selten und charakterisieren vor allem die Variabilität des Wetters. Als Bemessungsgrundlage für viele Anpassungsmaßnahmen - z.B. die Dimensionierung eines Damms oder einer Kanalisation - werden von Ingenieuren die erwarteten Magnituden deutlich seltenerer Ereignisse benötigt. Typischerweise sind dies Magnituden, die im Mittel ein Mal in 100 Jahren überschritten werden, sogenannte Jahrhundertereignisse. Die Zeit, innerhalb derer diese Ereignisse ein Mal erwartet werden, wird als Wiederkehrzeit bezeichnet, die Magnitude als Wiederkehrwert. Da die meisten Klimazeitreihen deutlich kürzer sind als 100 Jahre, können solche extremen Wiederkehrwerte sinnvoll nur mittels der statistischen Extremwerttheorie abgeschätzt werden (siehe z.B. Coles, 2001); die Schätzungen sind mit relativ großen Unsicherheiten verbunden. Um Änderungen im Auftreten von Extremereignissen detektieren zu können oder um systematische Fehler von Klimamodellen in der Simulation von Extremereignissen zu identifizieren, werden deshalb häufig kürzere Wiederkehrzeiten - 10 oder 20 Jahre - betrachtet, deren Wiederkehrwerte deutlich extremer sind als moderate Extremereignisse, aber deutlich robuster zu schätzen sind als Jahrhundertereignisse.

In dieser Studie wurden extreme Wetter- und Klimaereignisse der Temperatur und des Niederschlags betrachtet: heiße Tage und Nächte, Hitzewellen, Starkniederschläge und Dürren. Zur Quantifizierung solcher Ereignisse und Änderungen in deren Auftreten wurden diverse Indizes definiert, so z.B. von Sillmann und Roeckner (2008) oder im Rahmen des STARDEX Projekts (Goodess et al., 2010). Tabelle 2.1 zeigt die in dieser Studie verwendeten Indizes und deren Definition.

Index	Definition	Auflösung
Hitzetage	mittlere Anzahl Tage mit $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$	jährlich
tropische Nächte	mittlere Anzahl Tage mit $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$	jährlich
Maximalzahl aufeinanderfolgender Hitzetage	Mittel der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Hitzetage	jährlich
Maximalzahl aufeinanderfolgender tropischer Nächte	Mittel der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender tropischen Nächte	jährlich
20-Jahres-Wiederkehrwert der höchsten Tagesmaximumtemperatur	Wert von $T_{max}$ , der in einem Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% mindestens einmal überschritten wird	jährlich
20-Jahres-Wiederkehrwert der höchsten Tagesminimumtemperatur	Wert von $T_{min}$ , der in einem Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% mindestens einmal überschritten wird	jährlich
Intensität des Tagesniederschlags	mittlerer Niederschlag pro Regentag	saisonal
Starkniederschlagstage	mittlere Anzahl Tage mit mehr als 20mm Niederschlag	saisonal
20-Jahreszeiten-Wiederkehrwert des Tagesniederschlags	Tages-Niederschlagsmenge, die in einer Jahreszeit mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% mindestens einmal überschritten wird	saisonal
Maximalzahl aufeinanderfolgender Trockentage	Mittel der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage	saisonal

Tabelle 2.1: Betrachtete Extremindizes, basierend auf täglich aufgelösten Maximum- und Minimumtemperaturen und Niederschlagssummen.

## Kapitel 3

# Beobachtete Extremereignisse

### 3.1 Daten

Als Referenz werden zwei verschiedene Datentypen gewählt, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit und Robustheit zu gewährleisten. Simulationen von Klimamodellen repräsentieren im Allgemeinen Flächenmittelwerte über Flächen jenseits von 100km<sup>2</sup>, Klimamessstationen mit Thermometern und Niederschlagsmessern hingegen repräsentieren einen spezifischen Ort. Ein Flächenmittel von z.B. 3mm Niederschlag kann also einem moderaten, aber großflächigen Niederschlag von 3mm entsprechen, aber auch einem lokalisierten Gewitter von 20mm und Trockenheit über den Großteil der Fläche. Generell sind Flächenmittel und Stationswerte deshalb vor allem bezüglich Extremereignissen im Niederschlag nur schlecht vergleichbar. Zur besseren Vergleichbarkeit werden deshalb Stationswerte häufig gegittert, also durch statistische Verfahren möglichst repräsentativ auf Flächenmittel aggregiert. Die Qualität von gegitterten Daten hängt dabei vor allem von der Stationsdichte ab - wie genau, ist jedoch weitestgehend unerforscht. Bei der Analyse von langfristigen Trends treten noch andere Probleme auf. Die zugrundeliegenden Daten sollten möglichst frei von Inhomogenitäten sein, also Sprüngen oder künstlichen Trends, die durch Verschieben der Messstationen, Austausch der Messinstrumente oder Veränderungen in der Umgebung entstehen. Inhomogenitäten können prinzipiell auch durch die Gitterungsmethode entstehen. Für Niederschlagszeitreihen ist es nach heutiger Erkenntnis unmöglich, Inhomogenitäten zuverlässig zu erkennen und zu eliminieren. Deshalb ist es für Trendanalysen wichtig, möglichst vertrauenswürdige Daten zu nutzen, bei denen zumindest keine Inhomogenitäten bekannt sind.

Als Referenz wurden deshalb für langfristige Mittelwerte der täglich aufgelöste gegitterte E-OBS Datensatz (Version 9) gewählt (Haylock et al., 2008). Dieser Datensatz wurde im Rahmen des EU Projektes ENSEMBLES ([www.ensembles-eu.org](http://www.ensembles-eu.org)) zur Validierung von Klimamodellen entwickelt. Er hat eine Auflösung von 0,22 x 0,22 Grad (ungefähr 25km x 25km) und umfasst den Zeitraum vom 1.1.1950 bis 30.6.2013 (<http://eca.knmi.nl/download/ensembles/download.php>). Die Qualität des Temperaturdatensatzes im Vergleich zu Stationsdaten ist generell sehr gut. Niederschlag wird im wesentlichen gut abgebildet, bei Extremniederschlägen werden räumliche Muster gut wiedergegeben, absolute Werte in vielen Regionen aufgrund der relativ geringen Datendichte jedoch unterschätzt (Hofstra et al., 2010; Kysely und Plavcova, 2010; Maraun et al., 2012). Allerdings ist die Datendichte für Deutschland relativ hoch, so dass die Probleme hier weniger gravierend sein sollten.

Als Referenzzeitraum wurden die Jahre von 1960 bis 1999 gewählt. Dieser Zeitraum ist entgegen des üblichen Standards 40 Jahre lang, weil verschiedene Studien gezeigt haben,

dass die Schätzung von Extremereignissen bei einer Zeitreihenlänge von 30 Jahren nicht stabil ist. Zur Analyse von Trends wurde eine qualitätskontrollierte Auswahl von Stationsdaten des DWD verwendet.

## 3.2 Temperatur

Im folgenden werden Statistiken zu Temperaturextrema vorgestellt, die in Hessen im Zeitraum von 1960-1999 beobachtet wurden. Erste Indikatoren für die Stärke von Temperaturextrema sind die mittlere Anzahl von Hitzetagen ( $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) und tropischen Nächten ( $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$ ) in einem Jahr. Als Abschätzung von sehr seltenen und deshalb gravierenden Temperaturextrema wurden zusätzlich jeweils 20-Jahres-Wiederkehrwerte betrachtet. Diese geben an, welche Tageshöchst- bzw. Tiefsttemperatur im Mittel alle zwanzig Jahre einmal überschritten wird. Klimatische Temperaturextrema sind Hitzewellen. Eine charakteristische Größe ist die im Mittel längste Hitzewelle pro Jahr, gemessen als die maximale Anzahl von aufeinanderfolgenden Hitzetagen pro Jahr. Zur besseren Vergleichbarkeit werden jeweils vergleichbare Indizes der Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen mit den gleichen Farbskalen dargestellt.

### 3.2.1 Hitzetage und tropische Nächte

Abbildung 3.1: Anzahl Hitzetage ( $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ ; links) und tropische Nächte ( $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$ ; rechts) pro Jahr, Mittel über 1960-1999.

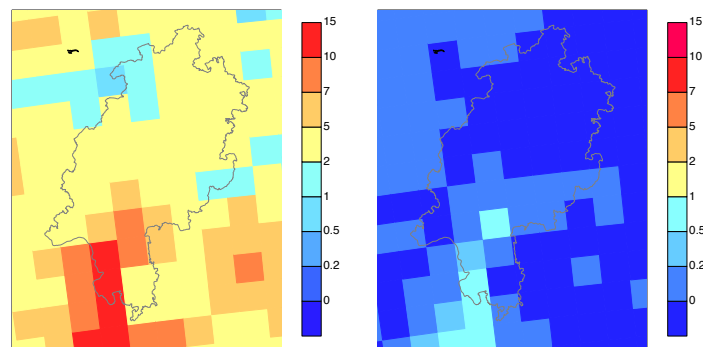


Abbildung 3.1 zeigt die Hitzetage (links) und tropischen Nächte (rechts) für das Gebiet Hessen. Im Mittel werden in Hessen 2-5 Hitzetage pro Jahr gemessen. Im Hessischen Ried gibt es jedoch mehr als 10 Hitzetage pro Jahr, im gesamten Rhein-Main-Gebiet und der Wetterau zwischen 5 und 10. Die wenigsten Hitzetage - weniger als zwei pro Jahr - werden in den Ausläufern des Rothaargebirges, im Kellerwald und der Rhön gemessen. Tropische Nächte treten deutlich seltener auf. Sie werden nur im Tiefland Südhessens beobachtet, überall seltener als einmal im Jahr. Vor allem im Hessischen Ried und um Frankfurt gibt im Mittel bis zu eine tropische Nacht pro Jahr.

### 3.2.2 Extrema der Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen

Abbildung 3.2 zeigt die Extrema der höchsten Tagehöchsttemperaturen (links) und Tagestiefsttemperaturen (rechts), repräsentiert durch 20-Jahreswiederkehrwerte. Die niedrigsten Extrema der Höchsttemperaturen werden in den Ausläufern des Rothaargebirges und der Rhön erwartet (weniger als  $33^{\circ}\text{C}$ ), die höchsten im Rhein-Main-Gebiet, der Wetterau und vor allem dem Hessischen Ried mit  $35-37^{\circ}\text{C}$ . Das räumliche Muster der Extrema der Tagestiefsttemperatur ist vergleichbar. Im Nordwesten beträgt der 20-Jahreswiederkehrwert teilweise weniger als  $18^{\circ}\text{C}$ ,

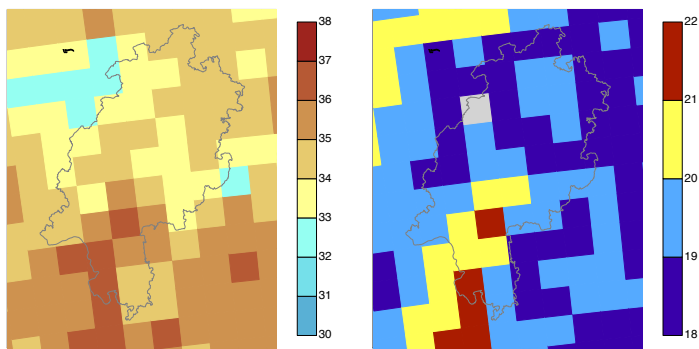


Abbildung 3.2: 20-Jahres-Wiederkehrwert der höchsten Temperaturen in °C. Links: Tageshöchsttemperatur  $T_{max}$ ; rechts: Tagestiefsttemperatur  $T_{min}$ .

nur um Frankfurt und im Hessischen Ried werden im Mittel alle 20 Jahre mehr als 21°C als Tagestiefsttemperatur gemessen.

### 3.2.3 Perioden von Hitzetagen und tropischen Nächten

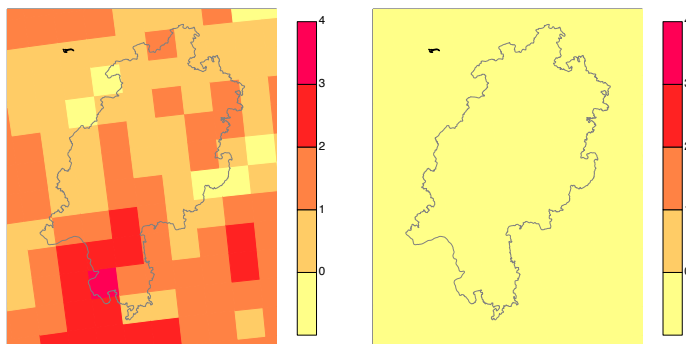


Abbildung 3.3: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Hitzetage (links) und tropischer Nächte (rechts) pro Jahr, Mittel über 1960-1999.

Abbildung 3.3 zeigt die mittlere Maximalzahl aufeinanderfolgender Hitzetage (links), also das Mittel der längsten Hitzewellen pro Jahr, und die mittlere Maximalzahl aufeinanderfolgender tropischer Nächte (rechts). Das räumliche Muster für aufeinanderfolgende Hitzetage entspricht dem der Hitzetage selbst. Im Mittel werden nicht mehr als zwei aufeinanderfolgende Hitzetage erwartet, nur in der Oberrheinischen Tiefebene, vor allem im Ried, sind es etwa 2-4. Aufeinanderfolgende tropische Nächte wurden in Hessen im Zeitraum 1960-1999 nicht beobachtet.

### 3.3 Niederschlag

In diesem Abschnitt werden Statistiken beobachteter Niederschlagsextrema vorgestellt. Da die Niederschlagsverteilung sich über das Jahr stark ändern - im Winter dominieren großskalige Niederschläge in Verbindung mit Wetterfronten, im Sommer häufig örtliche Gewitter - wurde die Analyse nach Jahreszeiten getrennt durchgeführt. Ein erstes Maß für Extremniederschläge bietet die mittlere Intensität des Tagesniederschlags. Als absolutes Maß für Niederschlagsextrema wurden Starkniederschlagstage definiert als Tage mit mindestens 20mm Niederschlag. Hier wird die mittlere Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag pro Jahreszeit betrachtet. Als Maß für sehr seltene Extremniederschläge wurden 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte betrachtet. Diese geben an, welche Niederschlagsmenge im Mittel z.B. einmal alle 20 Winter überschritten wird. Ein vor allem für die Landwirtschaft wichtiges klimatisches Niederschlagsextrem sind Dürren. Meteorologische Dürren, also längere Perioden ohne Niederschlag werden häufig durch die mittlere maximale Anzahl an aufeinanderfolgenden Trockentagen pro Jahreszeit quantifiziert.

#### 3.3.1 Intensität des Niederschlags

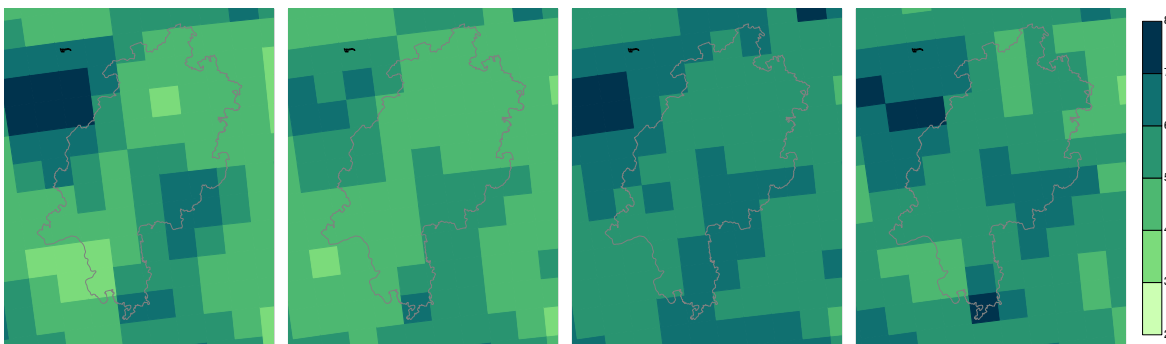


Abbildung 3.4: Intensität des Tagesniederschlags an Niederschlagstagen in mm/Tag, Mittel über 1960-1999. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst.

Abbildung 3.4 zeigt die mittlere Intensität des Tagesniederschlags separat für alle vier Jahreszeiten. Die höchsten Intensitäten werden in den Mittelgebirgen gemessen, wo es zu Steigungsregen kommt, die niedrigsten im Hessischen Ried. Allerdings variiert die mittlere Intensität sehr deutlich über das Jahr. In den Ausläufern des Rothargebirges, der Rhön und dem Odenwald sind die Intensitäten über das ganze Jahr mit über 6 mm pro Regentag hoch, im übrigen Hessen einschließlich Vogelsberg werden die höchsten Intensitäten (5-6 mm pro Regentag) vor allem im Sommer gemessen. Die niedrigsten Intensitäten werden generell im Frühling gemessen (oft nur 3-4 mm pro Regentag).

#### 3.3.2 Tage mit Starkniederschlag

Abbildung 3.5 zeigt die Anzahl der Starkniederschlagstage ( $> 20$  mm) für alle vier Jahreszeiten. In den Bergregionen von Roothargebirge, Rhön, Vogelsberg und Odenwald gibt es fast in allen Jahreszeiten 1-2 Tage mit Starkniederschlag. Nur in der Rhön und dem Vogelsberg wird im Frühling weniger als ein Starkniederschlagstag pro Jahr gemessen. Generell werden die meisten Starkniederschläge im Sommer gemessen, die wenigsten im Winter und Frühling.

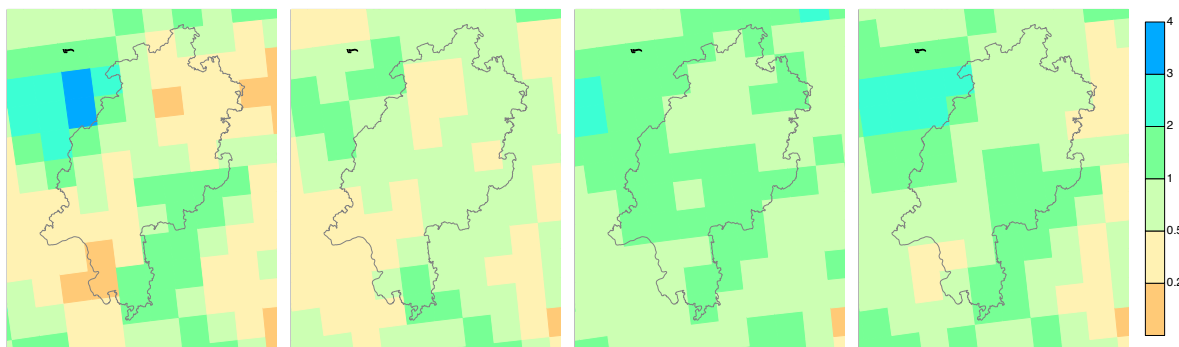


Abbildung 3.5: Anzahl Starkniederschlagstage (>20mm) pro Saison, Mittel über 1960-1999. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

Räumlich variabel ist vor allem der Winter, mit sehr wenigen Starkniederschlagstagen (< 0,2) im Hessischen Ried, und vielen in den Mittelgebirgen.

### 3.3.3 Extrema des Tagesniederschlags



Abbildung 3.6: 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwert des Tagesniederschlags in mm/Tag. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

Die räumlichen Muster der 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte des Tagesniederschlags (Abbildung 3.6) ähneln denen der Niederschlagsintensitäten. Durchschnittlich alle 20 Jahre sind in jeder Jahreszeit Niederschlagsereignisse zu erwarten, die 30 - 40 mm überschreiten. Im Winter und Herbst werden die stärksten Extremniederschläge (> 40 mm) dabei in den Höhenlagen von Rothaargebirge, Vogelsberg, Rhön und Odenwald erwartet, im Sommer vor allem im Rhein-Main-Gebiet, dem Taunus, der Wetterau und dem Nordosten Hessens. Das geringste Risiko für Extremniederschläge besteht im Frühling.

### 3.3.4 Trockenperioden

Abbildung 3.7 zeigt die räumlichen Muster der längsten Trockenperioden pro Jahreszeit, d.h. die mittlere maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage pro Jahreszeit. Die längsten Trockenperioden sind im Herbst zu erwarten mit durchschnittlich 14 aufeinanderfolgenden Trockentagen; nur im Rothaargebirge, Vogelsberg, Rhön, Odenwald und dem westlichen Taunus sind weniger Trockentage zu erwarten. Im Sommer sind die Trockenperioden vergleichs-

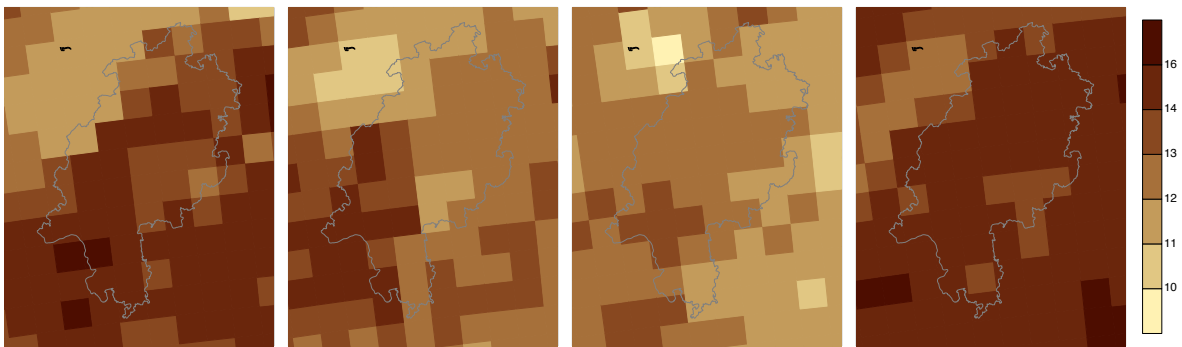


Abbildung 3.7: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage pro Saison. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

weise kurz und werden im Nordosten alle 11 Tage, im Südwesten (Rhein-Main und Ried) alle 13 Tage durch Regen unterbrochen.



### 3.4 Trends in Extremniederschlägen

Die Charakteristik von Extremniederschlägen hat sich in den vergangenen Dekaden teilweise deutlich verändert. Für monatliche Niederschlagssummen in Deutschland haben Trömel und Schönwiese (2007) eine erste Analyse durchgeführt und finden für Hessen einen Anstieg des mittleren Niederschlags in allen Jahreszeiten. Rückschlüsse auf Extremereignisse lässt diese Studie jedoch nicht zu. Tomassini und Jacob (2009) haben Trends speziell in den Extrema von Tagesniederschlägen untersucht. Allerdings wurden in dieser Studie Unterschiede der Trends in den verschiedenen Jahreszeiten nicht berücksichtigt. Gerade Trends in Niederschlägen sind jedoch stark jahreszeitenabhängig. Deshalb wurden hier - zusätzlich zu langjährigen Statistiken - langfristige Trends in Extremniederschlägen von 1961-2000 analysiert, getrennt für die verschiedenen Jahreszeiten (siehe Abbildung 3.8). Als Maß wurde der 10-Jahreszeiten-Wiederkehrwert des Tagesniederschlags gewählt. Dieser ist niedriger als der bei den langjährigen Statistiken betrachtete und trägt der größeren statistischen Unsicherheit bei Trendbetrachtungen Rechnung.

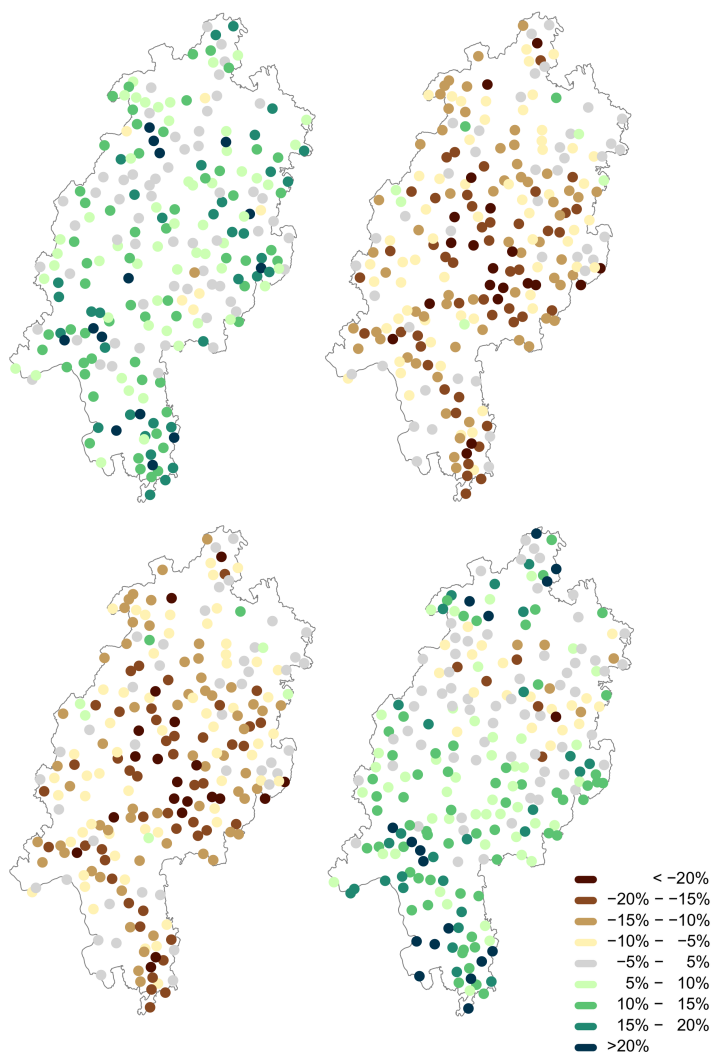


Abbildung 3.8: Trend im 10-Jahreszeiten-Wiederkehrwert von 1961-2000. Links oben: Winter, rechts oben: Frühling, links unten: Sommer, rechts unten: Herbst.

Im Winter und Herbst haben sich die Extremniederschläge in weiten Teilen Hessens verstärkt, um vielerorts 5-20%, vereinzelt sogar noch stärker. Nur in manchen Regionen Nord-

hessens gibt es im Herbst eine leichte Tendenz zu schwächeren Extremniederschlägen. Im Sommer hingegen sind Extremniederschläge in vielen Regionen, vor allem in Zentralhessen zwischen Vogelsberg, Gießen und Marburg, aber auch in Südhessen entlang der Bergstraße und im Odenwald schwächer geworden. Die Trends im Winter und Herbst sind konsistent mit den für die Zukunft simulierten Änderungen (siehe Kapitel 4), für den Sommer prognostizieren die Modelle jedoch eine leichte Verstärkung von Extremniederschlägen, für den Frühling eine deutliche Verstärkung (vgl. Abbildung 4.6). Diese scheinbare Inkonsistenz deutet darauf hin, dass die beobachteten Trends im Frühling und Sommer durch natürliche Schwankungen hervorgerufen wurden. Entsprechend ist zu erwarten, dass sich diese Trends in den nächsten Jahren umkehren werden.

## Kapitel 4

# Klimawandelszenarien

Der globale Klimawandel kann sowohl durch großräumige Änderungen, aber auch lokale Wechselwirkungen in verschiedenen Regionen abgeschwächt oder verstärkt werden. Entscheidend ist häufig nicht einfach die mittlere Erwärmung, sondern andere, sogenannte dynamische Faktoren: eine mögliche Verschiebung der Westwindzone würde regionale Änderungen der Niederschlagshäufigkeit bewirken; Änderungen im Auftreten von sogenannten blockierenden Wetterlagen würden im Sommer das Auftreten von Hitzewellen und im Winter das Auftreten von Kälteperioden beeinflussen. Regional wechselwirken diese Faktoren mit der Topographie, Änderungen in Gebirgslagen sind anders als in Tälern, Änderungen am Westhang eines Gebirges anders als am Osthang. Deshalb wird der Klimawandel in verschiedenen Regionen unterschiedlich ausgeprägt sein, insbesondere Änderungen im Niederschlag werden sehr komplex und jahreszeitenabhängig sein. Wenig überraschend sind Szenarien des zukünftigen Klimas deshalb mit Unsicherheiten verbunden, die größer werden, je kleiner die betrachtete Region ist, und je komplexer das betrachtete Phänomen ist. Prinzipiell lassen sich diese Unsicherheiten in drei Typen einteilen (Hawkins und Sutton, 2009). Zunächst einmal hängt die Entwicklung des Klimas in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts stark von den Treibhausgasemissionen der nächsten Jahrzehnte ab. Aussagen hierzu lassen sich nur im Rahmen von möglichen Szenarien treffen. Welches dieser Szenarien tatsächlich eintritt, ist eine Frage von technischer Entwicklung und weltweiten politischen Entscheidungen und somit prinzipiell nicht zu vorherzusehen. Häufig werden deshalb Beispiele in der Mitte der Bandbreite an Szenarien betrachtet. Eine weitere Quelle von Unsicherheiten sind die Unzulänglichkeiten der verfügbaren Klimamodellen. Globale Klimamodelle sind in der Lage, globale Änderungen des Klimas überzeugend zu simulieren, doch regionale Änderungen, vor allem von Niederschlag und Extremereignissen, werden relativ ungenau wiedergegeben (Déqué et al., 2007). Schließlich gibt es noch eine dritte Quelle von Unsicherheiten, die sich von den vorherigen fundamental unterscheidet, weil sie aus einer Eigenschaft des Klimasystems selbst resultiert. Das Klimasystem reagiert einerseits auf Veränderungen im Strahlungshaushalt, wie sie durch Treibhausgasemissionen verursacht werden. Andererseits ist das Klimasystem auch natürlichen Schwankungen unterworfen - jedes Jahr ist unterschiedlich warm oder kalt, trocken oder feucht, manche Dekaden wärmer oder feuchter als andere, und selbst Perioden von mehreren Dekaden können sich allein durch natürliche Klimaschwankungen unterscheiden (Deser et al., 2012). Das Klima in Europa hängt auch davon ab, wie stark die Nordatlantische Zirkulation - also die Westwindzone - in einem Jahr zufällig ausgeprägt ist, oder in welcher Phase die Atlantische Multidekadische Oszillation - also die Meeresoberflächentemperatur des Nordatlantiks - in einer Dekade zufällig ist (Sutton und Dong, 2012). Je nach Jahreszeit, Region und betrachteter Variable können diese Schwankungen vernachlässigbar sein oder den menschengemachten Klimawandel auch noch

für Jahrzehnte überlagern. Für Mitteltemperaturen in Europa sind diese natürlichen Schwankungen eher niedrig, für Sommerniederschläge in Zentraleuropa sehr hoch.

Klimawandelszenarien sollten deshalb immer auf Ensemble-Simulationen basieren, um Unsicherheiten möglichst gut abzubilden. Zu beachten ist hierbei, dass es natürlich prinzipiell Fehler gibt, die allen Klimamodellen gemein sind, ein Ensemble also immer nur einen Teil aller Unsicherheiten abbilden kann. Für die Analyse sollte jedes Emissionsszenario getrennt betrachtet werden. Innerhalb eines Szenarios sollten verschiedene Modelle und verschiedene Simulationen von natürlichen Klimaschwankungen betrachtet werden. Idealerweise sollte versucht werden, Modellunsicherheiten von Unsicherheiten durch natürliche Klimaschwankungen zu isolieren.

In dieser Studie wurden mögliche Klimaänderungen gemäß dem A1B Szenario betrachtet. Die Familie der A1 Szenarien beschreibt eine Welt mit starkem Wirtschaftswachstum, einer Weltbevölkerung, die ihr Maximum in der Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht, und die schnelle Entwicklung effizienter Technologien. Das A1B Szenario zeichnet sich innerhalb der Familie als eines aus, in dem die Energiegewinnung zu etwa gleichen Anteilen aus fossilen und regenerativen Quellen erfolgt (Nakicenovic und Swart, 2000). Analysiert werden zwei Zeitabschnitte: die nahe Zukunft umfasst die Jahre 2020-2059, die ferne Zukunft die Jahre 2060-2099.

Im Folgenden werden kurz die benutzten Modelldaten vorgestellt, danach die eigentlichen Ergebnisse. Unsicherheiten werden einerseits im Ergebnisabschnitt selbst durch Spannbreitungendiagramme visualisiert, aber zusätzlich in Abschnitt 4.4 diskutiert.

## 4.1 Modelldaten

Institut	Regionalmodell	Globalmodell	Farbcode
Com. Clim. Change Consort. for Ireland (C4I)	RCA3	HadCM3Q16	●
Dänisches Meteorologisches Institut (DMI)	HIRHAM5	ARPEGE	■
		ECHAM5	◆
		ECHAM5	▲
ETH Zürich	CLM	ECHAM5	▲
Met Office Hadley Centre	HadRM3Q0	HadCM3Q0	●
Met Office Hadley Centre	HadRM3Q3	HadCM3Q3	◆
Met Office Hadley Centre	HadRM3Q16	HadCM3Q16	■
Königl. Niederl. Meteorol. Inst. (KNMI)	RACMO2	ECHAM5	▼
Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M)	REMO	ECHAM5	▲
Schwed. Meteorol. und Hydrol. Institut (SMHI)	RCA	BCM	▼
		ECHAM5	■
		HadCM3Q3	●

Tabelle 4.1: Verwendete Regionalmodelle.

Klimawandelprojektionen basieren auf globalen Klimamodellen (Collins et al., 2013). Diese sind allerdings relativ grob aufgelöst und liefern nur eingeschränkt Informationen zu regionalen Klimaveränderungen. Regionale Klimamodelle (sogenanntes Downscaling, Maraun et al., 2010) fügen globalen Klimasimulationen regionale Details hinzu, einerseits weil Wetterphänomene wie z.B. Stürme besser aufgelöst werden, und andererseits indem z.B. Einflüsse der Topographie auf das Klima wiedergegeben werden.

Tabelle 4.1 zeigt die in dieser Studie verwendeten Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen. Die Auswahl beinhaltet alle Modellsimulationen des ENSEMBLES-Projekts (van der Linden und Mitchell, 2009), die dem A1B Szenario folgen, bis einschließlich 2099 gerechnet sind und auf dem gleichen gedrehten Gitter in einer Auflösung von 0,22 x 0,22 Grad vorliegen. Zur Evaluierung der Qualität, mit der diese Modelle das beobachtete Klima darstellen können, wurden die Simulationen dieser Modelle für die betrachteten Indizes über den Referenzzeitraum von 1961-1999 mit den Ergebnissen aus Kapitel 3 verglichen. Die Ergebnisse dieser Validierung finden sich in Anhang A.

Basierend auf der Validierung wurden folgende Modelle für bestimmte Variablen nicht betrachtet: Das DMI-ARPEGE Modell wurde nicht zur Berechnung von tropischen Nächten sowie in der Berechnung jeglicher Wiederkehrwerte verwendet. Die HadRM3Q3 und -Q16 Modelle wurden nicht bei der Berechnung von Temperaturindizes berücksichtigt.

Im Rahmen des INKLIM-A Forschungsprogramms wurde ein kleines Ensemble aus drei Regionalen Klimamodellen bereit gestellt, die in verschiedenen Projekten als Grundlage für Klimafolgenstudien benutzt wurden. Um die Ergebnisse dieser Studien besser beurteilen zu können, werden deshalb die Änderungssignale dieses kleinen Ensembles mit denen des hier betrachteten umfassenden Ensembles verglichen. Konkret handelt es sich um bias-korrigierte Versionen des Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin. Allerdings lagen für diese Modelle keine Tageshöchst- und -tiefsttemperaturen vor, deshalb wurden nur Niederschlagsindizes verglichen. Simulationen basierend auf diesen Modellen werden jeweils separat betrachtet und fließen nicht in die übrigen Ergebnisse ein.

## 4.2 Temperatur

Im folgenden werden die erwarteten Änderungen in den betrachteten Temperaturindizes vorgestellt. Jede Abbildung zeigt dabei pro Zeile zwei Karten und einen sogenannten Boxplot. Die jeweils linke Karte zeigt die über alle Modelle gemittelte Änderung für die nahe Zukunft, 2020-2059, die rechte Karte für die ferne Zukunft, 2060-2099. Diese beiden Zeitabschnitte werden im folgenden als 2040 bzw. 2080, oder entsprechend Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts bezeichnet. Die Boxplots zeigen das Flächenmittel der Änderung über Hessen, getrennt für jedes Modell. Zur besseren Vergleichbarkeit werden für beide Zeiträume immer die gleichen Farbskalen verwendet. Gleiches gilt für Änderungen in den jeweils vergleichbaren Indizes der Tageshöchst- und tiefsttemperaturen.

### 4.2.1 Hitzetage und tropische Nächte

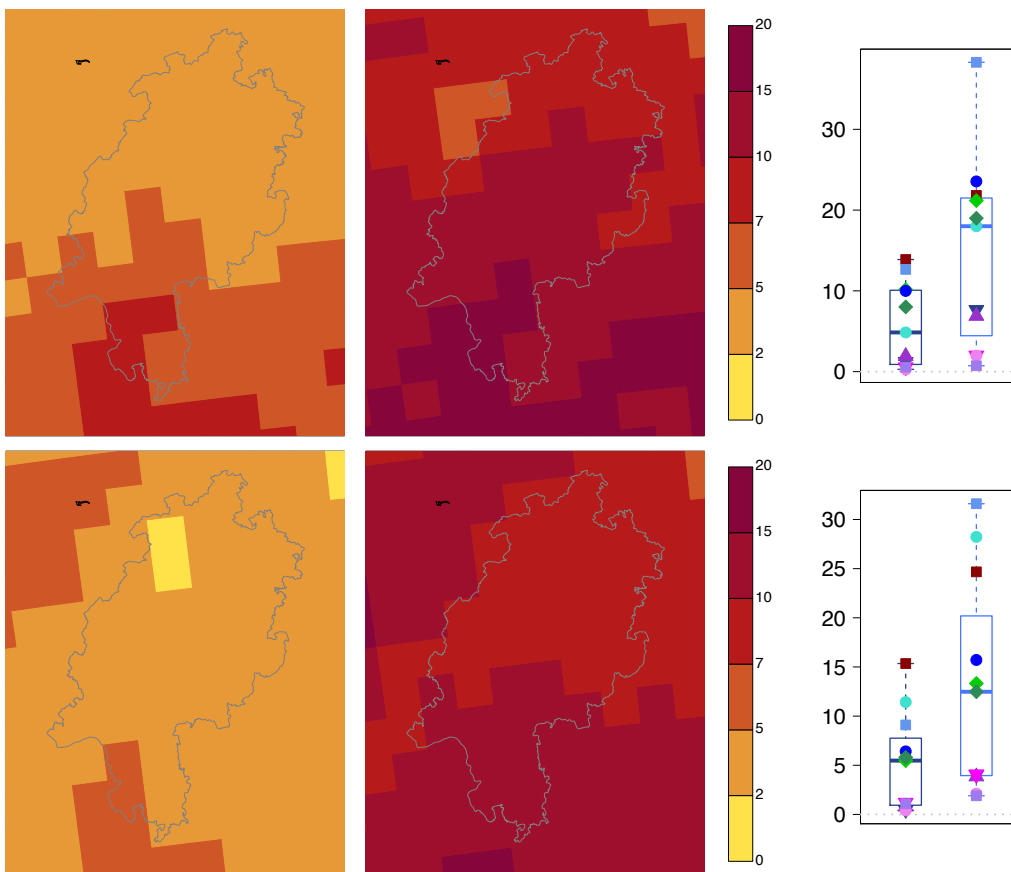


Abbildung 4.1: Änderung der Anzahl Hitzetage (oben,  $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) und tropischer Nächte (unten,  $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$ ) pro Jahr in Tagen/Jahr gegenüber 1960-1999; Mittel über Modellensemble; linke Karte: 2020-2059; rechte Karte: 2060-2099. Rechts: Boxplot der mittleren Änderung über ganz Hessen für jedes Modell; Box: Interquartilabstand; Balken: Median der Modelle.

Abbildung 4.1 (oben) zeigt die erwartete Änderung in der Anzahl an Hitzetagen. Deutlich zu erkennen ist ein Nord-Süd-Gefälle. Im Norden wird in den nächsten Jahrzehnten eine Zunahme um 2-5 Hitzetage erwartet, gegen Ende des Jahrhunderts um 7-15 Tage. Im Süden,

insbesondere im Rhein-Main-Gebiet und dem Hessischen Ried, wird um die Mitte des Jahrhunderts eine Zunahme um 7-10 Hitzetage erwartet, gegen Ende des Jahrhunderts um 15-20 Tage. Die stärksten Änderungen werden also dort erwartet, wo es sowieso schon viele Hitzetage gibt. Eine Zunahme wird von allen Klimamodellen simuliert, jedoch ist die Streuung relativ groß. Manche Modelle prognostizieren eine Zunahme von nur etwa 2 Hitzetagen, eines sogar eine um mehr als 30 (HadRM3Q16 wurde basierend auf der Validierung als Ausreißer gewertet und fließt nicht in die Berechnung der Karte ein), während die meisten eine Zunahme von etwa 20 Hitzetagen im Mittel über Hessen erwarten. Die erwartete Zunahme an tropischen Nächten (Abbildung 4.1, unten) ist deutlich homogener über Hessen verteilt und fällt insgesamt etwas niedriger aus. Im Mittel werden in der nahen Zukunft 2-5 mehr tropische Nächte erwartet, im Kellerwald eine Zunahme um weniger als zwei, im Ried dafür um 5-7. Gegen Ende des Jahrhunderts werden in Nordhessen etwa 7-10 mehr tropische Nächte erwartet, in Südhessen 10-15 mehr. Diese Zunahme ist ebenfalls konsistent über alle Modelle. Vier Modelle sagen einen nur moderaten Anstieg um weniger als 5 tropische Nächte voraus, aber immerhin drei Modelle eine extreme Zunahme von mehr als 25 (eines davon ist wieder HadRMQ16, wurde also auch als Ausreißer betrachtet).

#### 4.2.2 Extrema der Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen

Der 20-Jahres-Wiederkehrwert der Tageshöchsttemperatur (siehe Abbildung 4.2, oben) wird voraussichtlich relativ gleichmäßig in Hessen um 2-2,5°C bis 2040 zunehmen, um 4-5°C bis 2080. Im Hessischen Ried, dem Rhein-Main-Gebiet und der Wetterau wird sogar eine Zunahme um mehr als 5°C erwartet. Diese Ergebnisse werden konsistent von allen Modellen simuliert, die meisten Modelle sagen eine Änderung von knapp 4-6°C bis Ende des Jahrhunderts voraus, alle jedoch mindestens 2°C im Mittel über Hessen. Das HadRM3Q16 Modell mit Änderungen jenseits von 8°C wurde wieder als Ausreißer betrachtet. Die Änderungen des 20-Jahres-Wiederkehrwert der Tagestiefsttemperatur (siehe Abbildung 4.2, unten) sind insgesamt niedriger und zeigen ein klares Nord-Süd-Gefälle. Bis etwa 2040 wird in Nordhessen eine Zunahme von 1,5-2°C erwartet, im Süden von 2-2,5°C. Bis 2080 schließlich wird eine Zunahme von 3-4°C im Norden und 4-5°C im Süden erwartet. Auch diese Änderung ist konsistent über alle Modelle mit einer ähnlichen Streuung wie für die Wiederkehrwerte der Tageshöchsttemperatur. Auch zeigen einzelne Modelle für beide Variablen vergleichbare Änderungen.

#### 4.2.3 Perioden von Hitzetagen und tropischen Nächten

Abbildung 4.3 (oben) zeigt die erwarteten Änderungen der mittleren längsten Hitzewellen. In Nordhessen wird eine Zunahme um etwa einen Tag bis Mitte des Jahrhunderts erwartet, um 2-3 Tage bis Ende des Jahrhunderts. In Südhessen sind die Änderungen größer, im Ried werden Änderungen von 2-3 Tagen bis 2040, und von 5-7 Tagen bis 2080 erwartet. Sämtliche Modelle sagen eine Zunahme voraus, mit einer breiten Streuung von weniger als einem Tag bis zu etwa 8 Tagen, HadRM3Q16 mit einer Zunahme von 12 Tagen wurde wieder als Ausreißer gewertet. Abbildung 4.3 (unten) zeigt die erwarteten Änderungen der mittleren Maximalzahl aufeinanderfolgender tropischer Nächte. Generell ähnelt das Muster der Änderung in der Dauer von Hitzewellen, auch die absoluten Änderungen sind ähnlich. Allerdings ergibt sich außerhalb Hessens zwischen Ruhr und Sieg eine dramatische Zunahme von mehr als 10 Tagen.

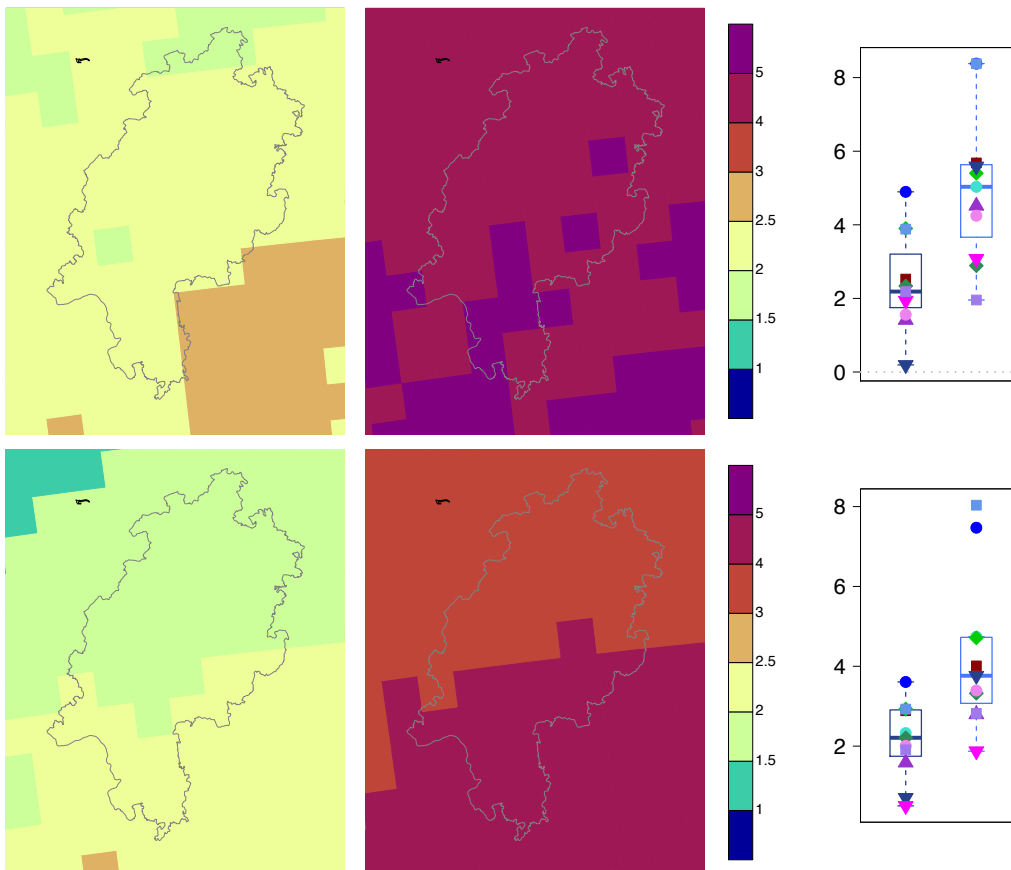


Abbildung 4.2: Änderung des 20-Jahres-Wiederkehrwerts der Tageshöchsttemperatur (oben) und Tagestiefsttemperatur (unten) in °C gegenüber 1960-1999. Mittel über Modellensemble; linke Karte: 2020-2059; rechte Karte: 2060-2099. Rechts: Boxplot der mittleren Änderung über ganz Hessen für jedes Modell; Box: Interquartilabstand; Balken: Median der Modelle.



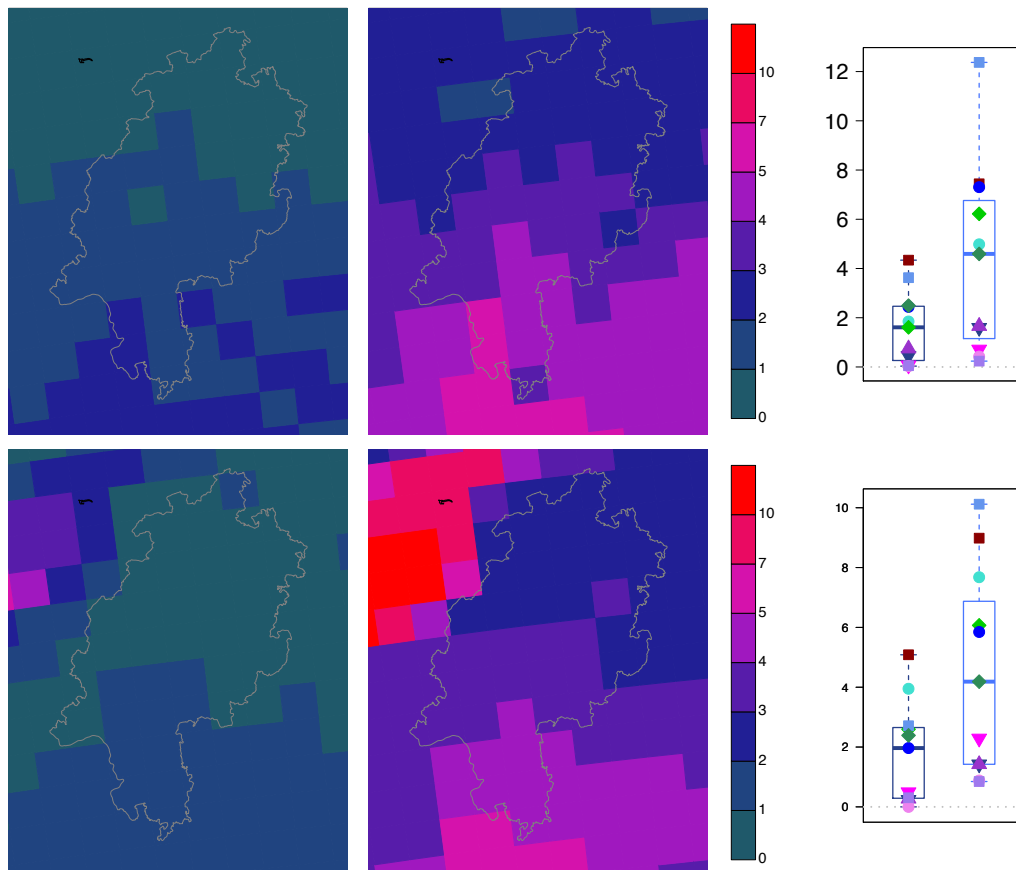


Abbildung 4.3: Änderung der Maximalzahl aufeinanderfolgender Hitzetage (oben,  $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) und tropischer Nächte (unten,  $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$ ) pro Jahr in Tagen/Jahr gegenüber 1960-1999. Mittel über Modellensemble; linke Karte: 2020-2059; rechte Karte: 2060-2099. Rechts: Boxplot der mittleren Änderung über ganz Hessen für jedes Modell; Box: Interquartilabstand; Balken: Median der Modelle.

## 4.3 Niederschlag

Im folgenden werden die erwarteten Änderungen in den betrachteten Niederschlagsindizes vorgestellt. Jede Abbildung hat dabei 3 Zeilen. Oben und in der Mitte werden Karten gezeigt, unten Boxplots. Die jeweils obere Karte zeigt die über alle Modelle gemittelte Änderung für die nahe Zukunft, 2020-2059, die untere Karte für die ferne Zukunft, 2060-2099. Die Boxplots zeigen das Flächenmittel der Änderung über Hessen, getrennt für jedes Modell. Von links nach rechts werden die Jahreszeiten Winter, Frühling, Sommer und Herbst gezeigt. Die biaskorrigierten Modelle aus dem INKLIM-Forschungsprogramm sind zum Vergleich in den Boxplots als graue Symbole markiert. In die Berechnung der Karten flossen diese Simulationen nicht ein.

### 4.3.1 Intensität des Niederschlags

Abbildung 4.4 zeigt die erwarteten Änderungen der Niederschlagsintensität. Im Winter, Frühling und Herbst wird dabei eine Zunahme von 4-7% bis 2040 erwartet, von 10-20% bis 2080. Dieses Signal ist robust für alle Klimamodelle. Im Sommer hingegen simulieren die Modelle stark unterschiedliche Änderungen, die teilweise sogar negativ sind. Diese Unterschiede lassen sich teilweise durch Modellfehler, teilweise durch natürliche Klimaschwankungen erklären. Gegen Ende des Jahrhunderts zeigen die meisten Modelle eine positive Änderung, der Median ist deutlich positiv. Auch im Sommer wird also eine Zunahme der Niederschlagsintensität erwartet, die aber zumindest in der ersten Hälfte des Jahrhunderts noch stark von natürlichen Schwankungen überlagert ist - selbst gegen Ende des Jahrhunderts lässt sich bei jetzigem Wissensstand keine Abschwächung ausschließen.

### 4.3.2 Tage mit Starkniederschlag

Abbildung 4.5 zeigt die Änderung der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (> 20 mm). In der ersten Hälfte des Jahrhunderts werden nur schwache Änderungen von meist nicht mehr als 0.5 Tagen erwartet, im Sommer gar keine. Erst gegen Ende des Jahrhunderts werden Änderungen von 0.5 bis 1 Tagen im Winter, Frühling und Herbst erwartet, im Rothargebirge, Vogelsberg, Rhön und Odenwald sogar von 1-2 Tagen im Winter und Herbst. Im Sommer wird nur eine schwache Zunahme erwartet. Für Winter, Frühling und Herbst zeigen fast alle Modelle eine Zunahme der Anzahl von Starkniederschlagstagen. Im Sommer jedoch streuen die Modelle gleichmäßig, der Median liegt jeweils bei etwa Null. Im Sommer scheinen also natürliche Schwankungen zu dominieren.

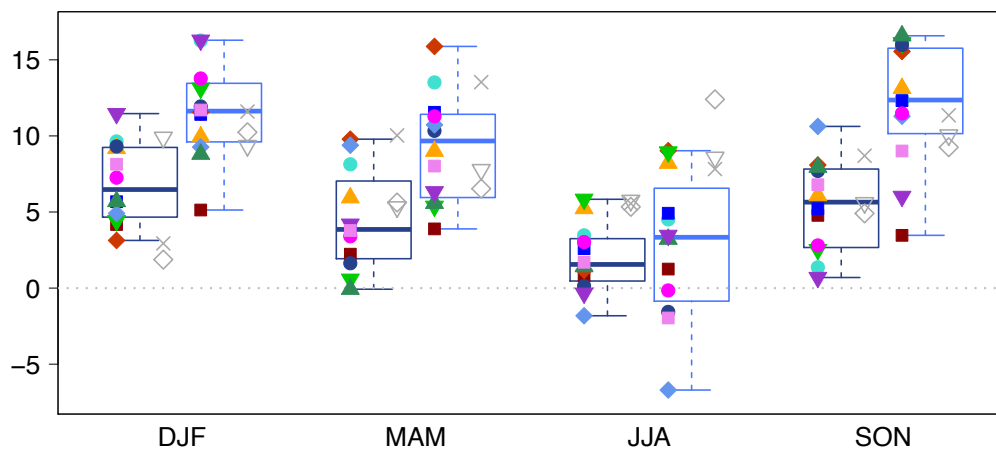
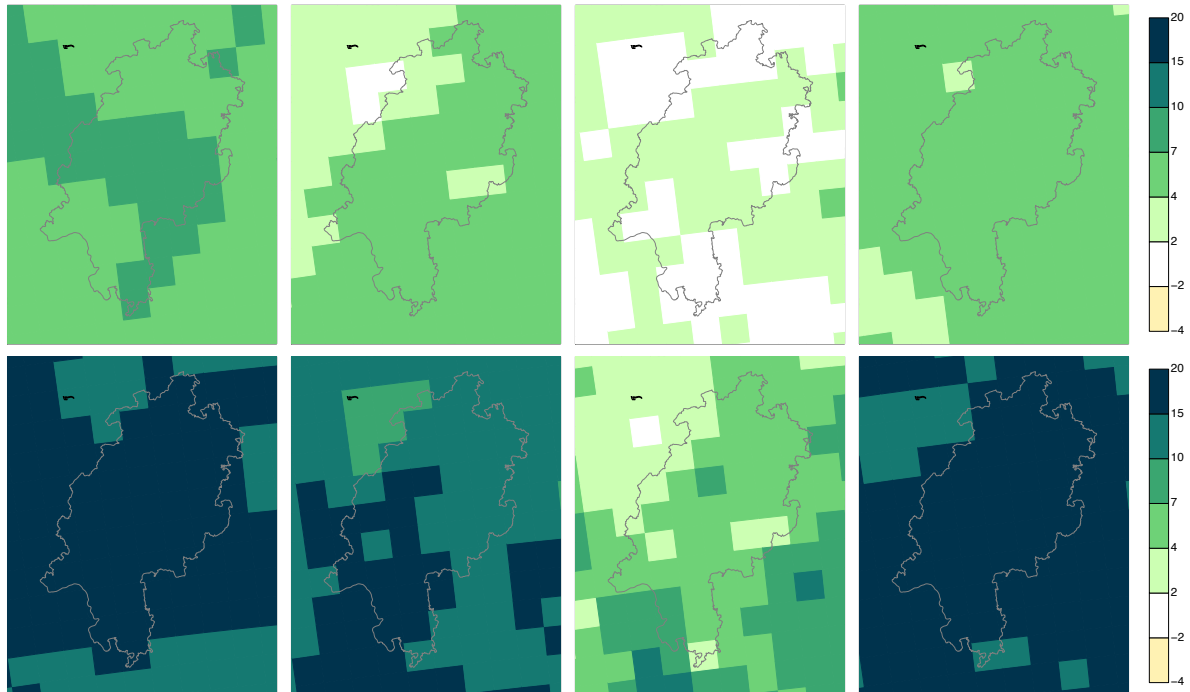


Abbildung 4.4: Änderung der Intensität des Tagesniederschlags an Niederschlagstagen in Prozent gegenüber 1960-1999. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Oben: 2020-2059, Mitte: 2060-2099, jeweils Mittel über das Modellensemble; Unten: jeweils zwei Box-plots für jede Jahreszeit; links: 2020-2059, rechts: 2060-2099.

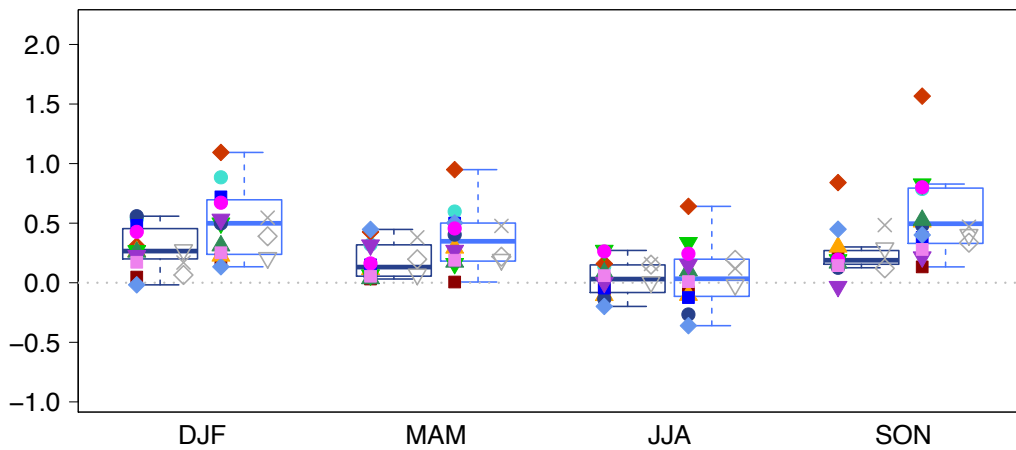
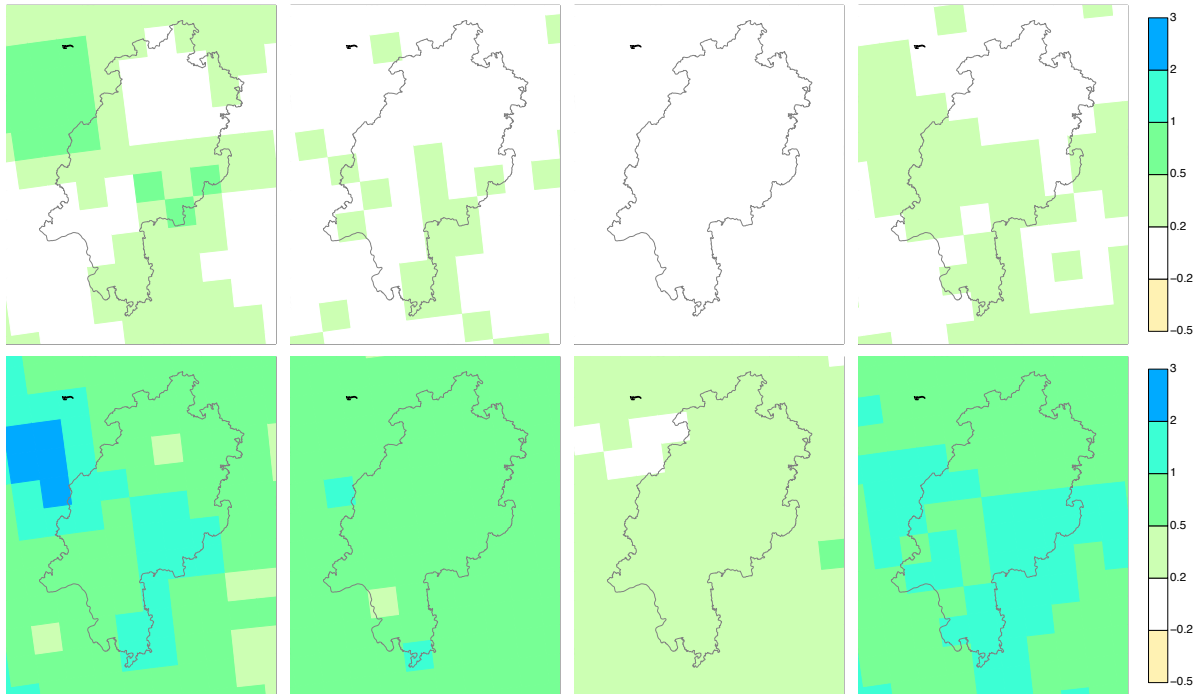


Abbildung 4.5: Änderung der Anzahl Starkniederschlagstage (>20mm) pro Saison in Tagen/Saison gegenüber 1960-1999. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Oben: 2020-2059, Mitte: 2060-2099, jeweils Mittel über das Modellensemble; Unten: jeweils zwei Boxplots für jede Jahreszeit; links: 2020-2059, rechts: 2060-2099.

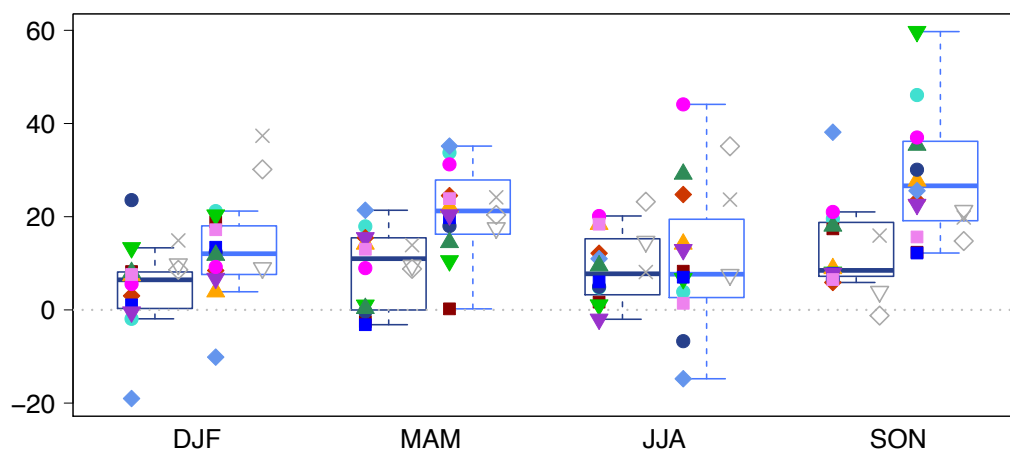
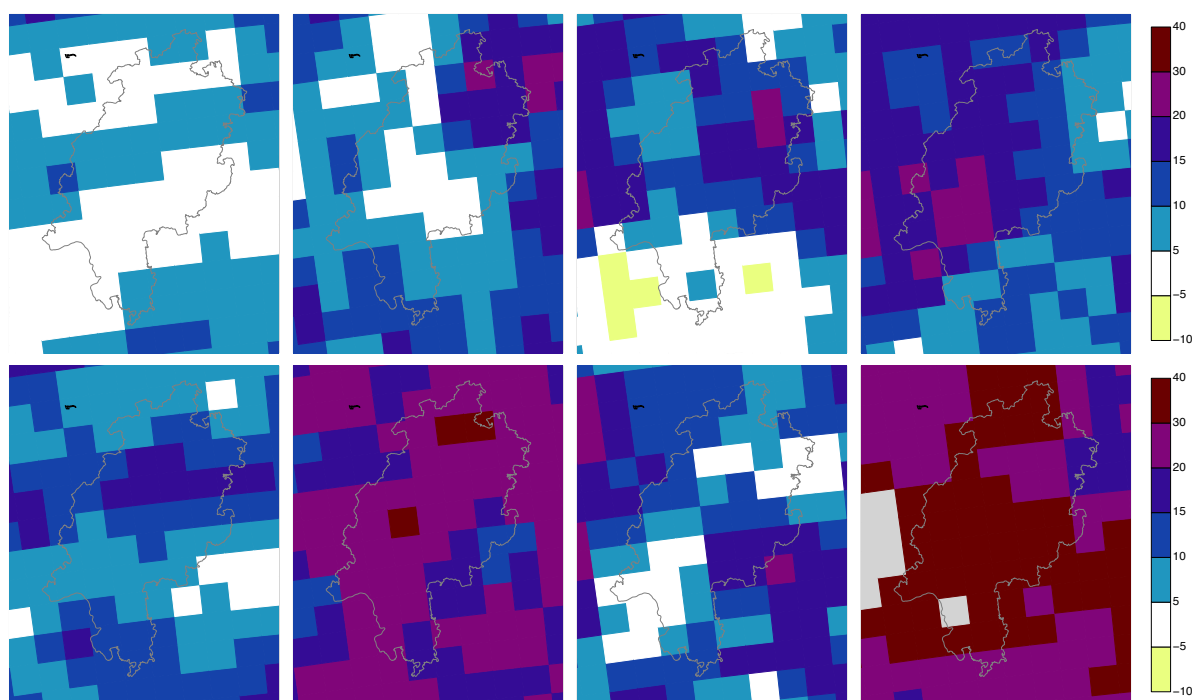


Abbildung 4.6: Änderung der 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte des Tagesniederschlags in Prozent gegenüber 1960-1999. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Oben: 2020-2059, Mitte: 2060-2099, jeweils Mittel über das Modellensemble; Unten: jeweils zwei Box-plots für jede Jahreszeit; links: 2020-2059, rechts: 2060-2099.

### 4.3.3 Extrema des Tagesniederschlags

Abschätzungen in der Änderung der 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte des Tagesniederschlags (Abbildung 4.6) sind - aufgrund der Seltenheit der als Datenbasis gewählten Ereignisse - mit relativ großen Stichprobenunsicherheiten behaftet. Die räumlichen Muster sind deshalb verunsichert, klare Änderungen treten vor allem für die Simulationen gegen Ende des Jahrhunderts hervor. Eine Verstärkung von Extremniederschlägen wird demnach in allen Jahreszeiten erwar-

tet, die stärksten Änderungen werden dabei für den Frühling (+20-30%) und Herbst (+30-40%) vorhergesagt. Vor allem im Sommer ist das Signal schwächer, teilweise werden auch keine Änderungen erwartet. Diese Änderungen sind - bis auf den Sommer - robust. Bis auf wenige Ausnahmen simulieren alle Modelle eine Verstärkung der Extremniederschläge. Im Sommer deutet sich an, dass natürliche Schwankungen einen vorhandenen Trend auch noch in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts dominieren.

#### **4.3.4 Trockenperioden**

Abbildung 4.7 zeigt die Änderungen in der maximalen Länge aufeinanderfolgender Trockentage pro Saison. Hier zeigt sich ein entgegengesetztes Bild im Vergleich zu extremen Niederschlägen. Im Winter, Frühling und Herbst werden bis 2040 kaum Änderungen erwartet, bis 2080 nur schwache. Im Sommer dagegen wird hessenweit erwartet, dass die längsten Trockenperioden 4-6 Tage länger werden, um Limburg, im Rheingau, Rhein-Main-Gebiet, der Wetterau und dem hessischen Ried sogar 6-8 Tage. Entsprechend sind die Änderungen auch nur für den Sommer konsistent, in allen anderen Jahreszeiten scheinen natürliche Schwankungen zu dominieren.

#### **4.3.5 Diskussion des INKLIM-A Modell Ensembles**

Die Änderungen, die von den drei im INKLIM-A Forschungsprogramm genutzten biaskorrigierten Modellen simuliert werden, sind im wesentlichen konsistent mit denen der unkorrigierten Modelle aus dem Ensembles-Projekt. Es ergeben sich jedoch einige Auffälligkeiten: die Zunahme der Niederschlagsintensität im Sommer wird von den drei Modellen im Vergleich zu den ENSEMBLES Modellen systematisch stärker simuliert. Weiterhin weichen auch die Änderungen im 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwert des Niederschlags deutlich ab. Im Winter und Sommer liegen alle drei Modelle am oberen Ende der Streuung der ENSEMBLES Modelle, im Herbst am unteren Ende. Abschätzungen von Klimafolgen, die auf diesen Indizes basieren, werden entsprechend ebenfalls systematisch von der entsprechenden Referenz abweichen.

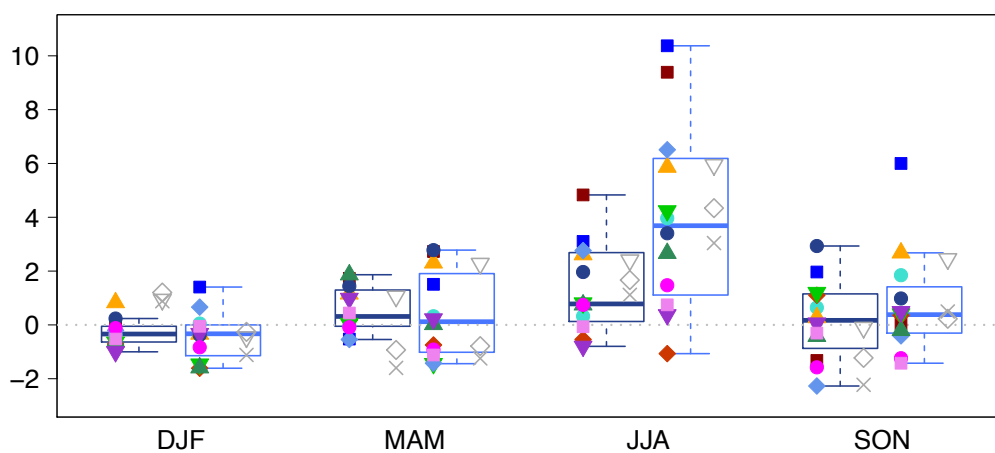
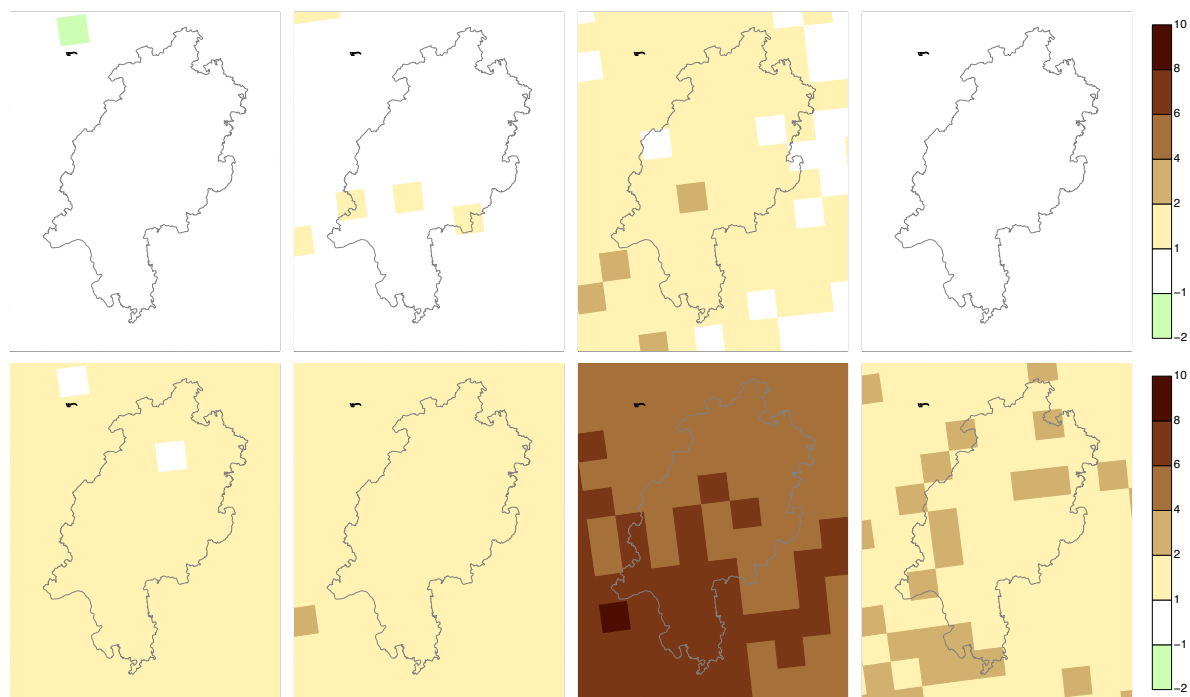


Abbildung 4.7: Änderung der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage pro Saison in Tagen/Saison gegenüber 1960-1999. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Oben: 2020-2059, Mitte: 2060-2099, jeweils Mittel über das Modellensemble; Unten: jeweils zwei Boxplots für jede Jahreszeit; links: 2020-2059, rechts: 2060-2099.

## 4.4 Diskussion der Unsicherheiten

Generell ist bei der Interpretation der Ergebnisse wichtig, nicht allein das Ensembledittel zu betrachten, sondern auch zu überprüfen, inwieweit die unterschiedlichen Modelle konsistente Änderungen simulieren. Wichtig für eine Abschätzung sind deshalb auch die jeweils hinzugehörigen Boxplots. Wie eingangs diskutiert, bilden jedoch auch die Boxplots nicht alle Unsicherheiten ab. Dies sollte bei der Interpretation der Änderungssignale unbedingt berücksichtigt werden. Einen Anhaltspunkt bietet die Validierung der Modelle (siehe Anhang). Generell ist das Vertrauen in mittlere Änderungen am höchsten, in Änderungen, die mit komplexen dynamischen Prozessen (wie blockierenden Wetterlagen) und kleinskaligen Prozessen (wie Sommergewittern) zusammenhängen, am niedrigsten. Änderungen in der Dauer von Hitzewellen und Trockenperioden sowie in 20-Jahreszeitenwiederkehrwerten von Niederschlägen sind deshalb mit den höchsten Unsicherheiten verbunden. Aktuelle Forschungen (Kendon et al., 2014) zeigen zum Beispiel, dass neueste - extrem rechenintensive - Klimamodelle, die Sommergewitter realistisch darstellen, stärkere Änderungen in Extremniederschlägen im Sommer simulieren als die in dieser Studie benutzten Regionalmodelle.

### 4.4.1 Einfluss von Modellfehlern

Ein wichtiges Defizit in Klimamodellen ist die Darstellung von Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre, insbesondere zwischen Bodenfeuchte und Temperatur. Verdunstet die Bodenfeuchte zu schnell, wärmt sich die unterste Luftschicht zu stark auf. Maraun (2012) findet einen großen Einfluss von Unsicherheiten in der Simulation von Bodenfeuchte und Wolkenbedeckung auf die simulierte Temperatur in Klimaprojektionen. Ein Einfluss auf die Simulation von Extremtemperaturen ist zu erwarten. Die Darstellung von konvektiven Niederschlägen wird vor allem durch die gewählten Modell-Parametrisierungen beeinflusst (z.B. Bachner et al., 2008; Argüeso et al., 2011). Diese Unsicherheiten beeinflussen sicher auch die Simulation zukünftiger Extremniederschläge.

Die korrekte Darstellung klimatischer Extremereignisse, also Ereignisse von längerer Dauer wie Hitzewellen und Trockenperioden hängt stark von der Qualität der benutzten Globalmodelle ab. Solche Ereignisse sind in der Regel mit sogenannten atmosphärischen Blockierungen verbunden, die eine hohe zeitliche Persistenz aufweisen. Diese blockierenden Wetterlagen wiederum sind Ausdruck stationärer planetarischer Wellen, die sich über eine gesamte Hemisphäre erstrecken. Selbst moderne Globalmodelle, wie diejenigen, die dieser Studie zugrunde liegen, unterschätzen die Häufigkeit und Persistenz dieser Wetterlagen. Das Klimaänderungssignal damit verknüpfter Extremereignisse ist deshalb mit großen Unsicherheiten verknüpft (Woolings, 2013).

Problematisch sind weiterhin Änderungen im Überschreiten fester Schwellen, wenn die betrachtete Variable einen Bias hat. Im allgemeinen hängt das Änderungssignal nicht-linear von der Schwelle ab, genauso wie der Bias in der Schwellwertüberschreitung nicht-linear vom Bias des Mittelwerts der Variablen abhängt. Für die entsprechenden Indizes sollten also die Bias-korrigierten Simulationen im Allgemeinen besser sein.

### 4.4.2 Einfluss von natürlichen Klimaschwankungen

Wie im Abschnitt 4.3 gezeigt, spielen natürliche Klimaschwankungen für Niederschlagsindizes in Hessen oft eine entscheidende Rolle. Dies liegt daran, dass generell für Nordeuropa eine Zunahme des Niederschlags erwartet wird, für Südeuropa eine Abnahme. Hessen liegt nun,



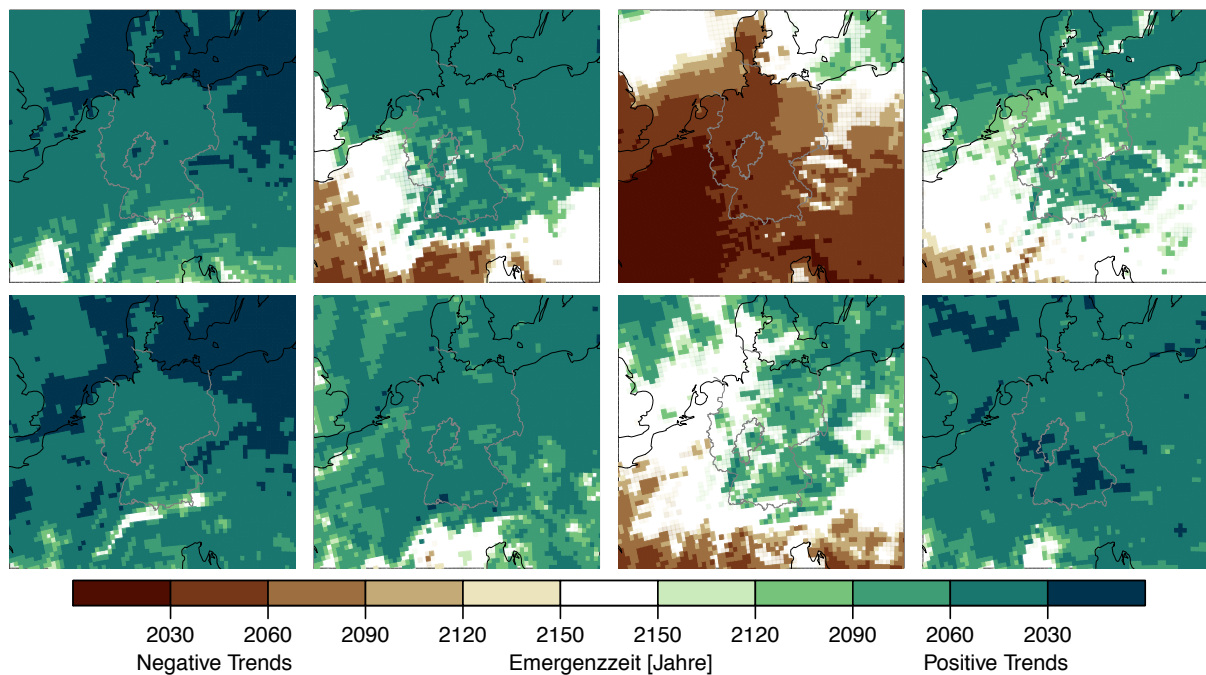


Abbildung 4.8: Emergenzzeit. Gezeigt ist das Jahr, in dem der langfristige Niederschlagstrend voraussichtlich 20% der Stärke der natürlichen Jahr-zu-Jahr Klimaschwankungen überschritten wird. Oben: Mittlerer Niederschlag; unten: Extremniederschlag. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst.

je nach Jahreszeit und Index, in der Region, wo positive in negative Trends übergehen, so dass natürliche Schwankungen dominieren können. Diese Tatsache hat einschneidende Konsequenzen für die Interpretation von Klimaprojektionen.

Solange natürliche Klimaschwankungen dominieren, kann der tatsächliche in der Zukunft auftretende Klimawandel natürlich genau dem erwarteten Klimawandel - quantifiziert zum Beispiel durch das Mittel eines Modellensembles - entgegengesetzt sein. Je stärker die natürlichen Schwankungen, desto größer die Wahrscheinlichkeit solcher zufälliger Trends. Erst wenn der menschengemachte Klimawandel stärker wird, wird er spürbar aus den natürlichen Schwankungen hervortreten. Um diese Zeit in der Zukunft zu quantifizieren, wurde die sogenannte Emergenzzeit eingeführt (siehe z.B. Maraun, 2013). Diese gibt an, wann der menschengemachte Klimawandel die natürliche Schwankungsbreite um einen gewählten Prozentsatz überschritten hat.

Abbildung 4.8 zeigt die Emergenzzeit für mittleren (oben) und extremen (unten) Niederschlag, getrennt für jede Jahreszeit. Als Schwelle wurden 20% der natürlichen Schwankungsbreite gewählt. Eine dunkelbraune Färbung bedeutet, dass es schon innerhalb der nächsten 30 Jahre eine spürbare Abschwächung des Niederschlags geben wird, eine dunkelgrüne, dass es in dieser Zeit eine spürbare Verstärkung geben wird. Je heller die Farben, desto schwächer sind die Trends, desto später werden diese spürbar werden. Eine weiße Färbung bedeutet, dass langfristige Änderungen im Niederschlag in diesen Regionen schwach sind und von natürlichen Schwankungen überlagert werden.

Für den Winter wird für ganz Deutschland eine Emergenzzeit in der Mitte des Jahrhunderts erwartet (zwischen 2030 und 2060), sowohl für mittlere als auch Extremniederschläge. Für

den Frühling zeigt sich ein ähnliches Bild. Jedoch sind über Zentraleuropa im mittleren Niederschlag deutliche Unterschiede erkennbar zwischen einem positiven Trend im Norden und Nordosten und einem negativen Trend im Südwesten. Die Übergangszone läuft in etwa entlang des Rheingrabens, hier sind kaum Änderungen im Frühjahrsniederschlag zu erwarten. Im Sommer muss deutlich zwischen mittlerem und Extremniederschlag unterschieden werden. Insgesamt werden in Westdeutschland schon in den nächsten 30-60 Jahren deutlich trockenere Sommer erwartet, in Ostdeutschland etwas später. Trotzdem besteht eine Tendenz zu stärkeren Extremniederschlägen. Dieses Signal ist aber räumlich sehr variabel und sollte für einzelne Orte äußerst vorsichtig interpretiert werden. Dieses gilt insbesondere für Hessen. Die zu erwartenden Änderungen im Herbst ähneln den im Frühling, gerade im mittleren Niederschlag ist das Signal allerdings deutlich variabler. Für Hessen ergibt sich aber eine recht eindeutige Zunahme sowohl im mittleren Niederschlag (2060-2090) als auch vor allem im Extremniederschlag (2030-2060).

Emergenzzeiten sind ein wichtiges Maß zum Entwurf von Anpassungsstrategien. In der Zeit bis zur Emergenzzeit besteht zwar eine generelle Tendenz, dass der Klimawandel wie erwartet auftritt, er kann aber durch natürliche Schwankungen stark überlagert sein und diese können sogar dem anthropogenen Klimawandel entgegengesetzte Tendenzen in einem bestimmten Zeitabschnitt verursachen. Diese Möglichkeit sollte bei Anpassungsmaßnahmen immer berücksichtigt werden. Für Extremniederschläge ist die Interpretation subtiler: eine späte Emergenzzeit bedeutet, dass der erwartete Klimawandel erst spät spürbar wird. Das - nicht spürbare - Risiko, das von extrem seltenen Ereignissen ausgeht, kann aber durchaus wie erwartet steigen. Erwartet man z.B. einen Anstieg der Intensität von Extremniederschlägen bei später Emergenzzeit, bedeutet dies, dass sich die stärksten Niederschläge in einer Jahreszeit zunächst *nicht spürbar* verändern würden. Die *erwartete* Intensität sehr seltener Ereignisse würde jedoch zunehmen. Je nachdem, ob nun relativ häufig wiederkehrende Starkniederschläge (z.B. in der Landwirtschaft) oder extrem hohe, dafür aber sehr seltene Ereignisse (z.B. als Bemessungsgrundlage) relevant sind, müssen deshalb unterschiedliche Schlußfolgerungen getroffen werden.

# Anhang A

## Modellvalidierung

Im folgenden wird die Qualität der Simulation der betrachteten Indizes im Vergleich zu Beobachtungsdaten analysiert. Dazu werden einerseits Boxplots der Modell-Abweichungen betrachtet, andererseits die Übereinstimmung der räumlichen Muster. Um möglichst robuste Ergebnisse zu erzielen wurde die Validierung der Modelle für ganz Deutschland durchgeführt.

Die Übereinstimmung der simulierten räumlichen Muster einer meteorologischen Variable mit den tatsächlich beobachteten räumlichen Mustern wird mit Hilfe von Taylordiagrammen illustriert (siehe z.B. Abbildung A.1). Der Abstand vom Nullpunkt (links unten) gibt an, wie gut die Standardabweichung eines (hier räumlichen) Musters simuliert ist. Ein Wert geringer (größer) als eins bedeutet, dass die simulierten Muster weniger (mehr) Struktur haben als das Referenzmuster (hier die E-OBS Beobachtungsdaten). Der Winkel, gemessen im Uhrzeigersinn von links oben, gibt an, wie hoch das simulierte Muster mit dem Referenzmuster korreliert. Ein Wert von eins bedeutet eine perfekte Übereinstimmung; eine Null gar keine Übereinstimmung; negative Werte eine Antikorrelation. Der Abstand zum Punkt (1,1) (roter Punkt unten) gibt die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers zwischen simuliertem und Referenzmuster an. Die farbliche Kodierung der Modelle entspricht denen im Hauptteil des Berichts (siehe Tabelle A.1).

Institut	Regionalmodell	Globalmodell	Farbcode
Com. Clim. Change Consort. for Ireland (C4I)	RCA3	HadCM3Q16	●
Dänisches Meteorologisches Institut (DMI)	HIRHAM5	ARPEGE	■
		ECHAM5	◆
ETH Zürich	CLM	ECHAM5	▲
Met Office Hadley Centre	HadRM3Q0	HadCM3Q0	●
Met Office Hadley Centre	HadRM3Q3	HadCM3Q3	◆
Met Office Hadley Centre	HadRM3Q16	HadCM3Q16	■
Königl. Niederl. Meteorol. Inst. (KNMI)	RACMO2	ECHAM5	▼
Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M)	REMO	ECHAM5	▲
Schwed. Meteorol. und Hydrol. Institut (SMHI)	RCA	BCM	▼
		ECHAM5	■
		HadCM3Q3	●

Tabelle A.1: Verwendete Regionalmodelle.

## A.1 Temperatur

### A.1.1 Hitzetage

Die Validierung der Anzahl der Hitzetage (durchschnittliche Anzahl, sowie maximale Länge aufeinanderfolgender Hitzetage), teilt die Klimamodelle in zwei Gruppen (ohne Abbildung). Die eine Gruppe unterschätzt die Anzahl beider Größen leicht (bis zu 4 bzw. 2 Tage pro Jahr). Die andere Gruppe hingegen überschätzt die Anzahl beider Größen stark (bis zu 17 bzw. 4 Tage pro Jahr). Diese Zweiteilung existiert auch für die Darstellung der räumlichen Muster, sowohl der durchschnittlichen Anzahl an Hitzetagen (Abbildung A.1) als auch deren maximale Länge (Abbildung A.2).

Abbildung A.1: Vergleich der räumlichen Muster der Anzahl an Hitzetagen ( $T_{max} > 30^\circ$ ) mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und quadratische mittlere Distanz (Abstand zu (1, 0)).

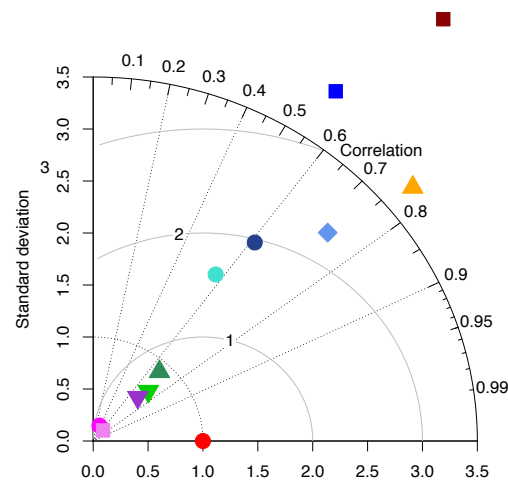
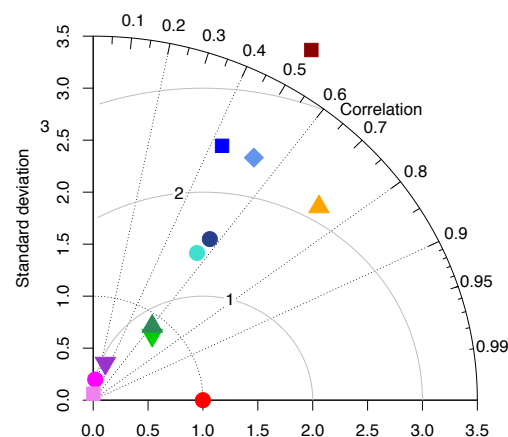


Abbildung A.2: Vergleich der räumlichen Muster der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Hitzetage ( $T_{max} > 30^\circ$ ) mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und quadratische mittlere Abweichung (Abstand zu (1, 0)).



### A.1.2 Tropische Nächte

Analog zu der Darstellung der Hitzetage überschätzen auch dieselben Modelle die mittlere Anzahl tropischer Nächte (bis zu 14 Tage pro Jahr) bzw. die mittlere maximale Länge aufeinanderfolgender tropischer Nächte (bis zu 4 Tage pro Jahr) (Abbildung A.3). Im E-OBS Datensatz kommen kaum Tagesminimumtemperaturen über  $20^{\circ}\text{C}$  vor (Abbildung 3.3), eine Eigenschaft, die von der Hälfte der Modellläufe gut wiedergegeben wird.

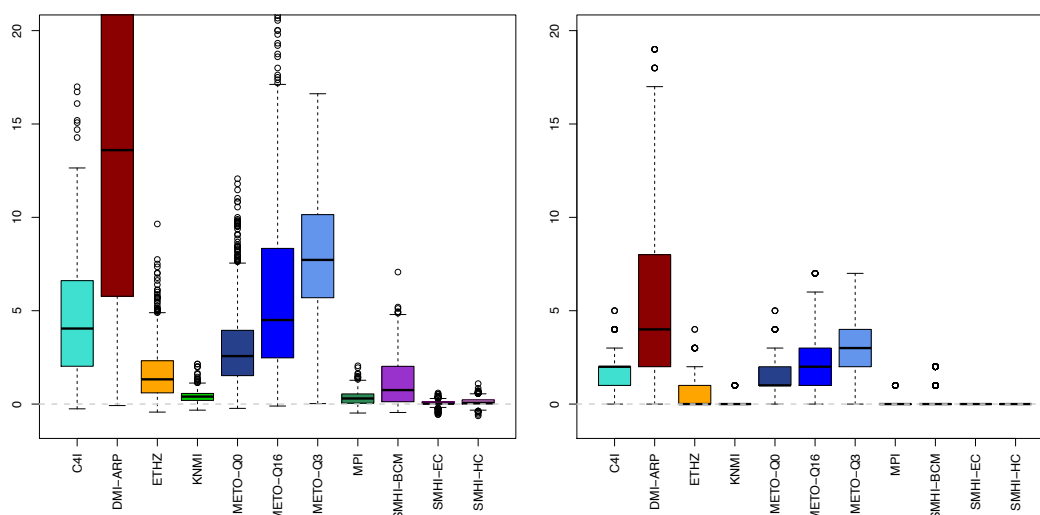


Abbildung A.3: Absoluter Bias der Anzahl der tropischen Nächte mit Beobachtungsdaten. Links: Anzahl  $T_{min} > 20^{\circ}$ ; rechts: maximale Anzahl aufeinanderfolgender  $T_{min} > 20^{\circ}$ .

### A.1.3 Tageshöchsttemperaturen

Die 20-Jahresereignisse der Tageshöchsttemperaturen in den untersuchten regionalen Klimamodellläufen des ENSEMBLES Projekts lassen sich, mit einer Ausnahme, in zwei Gruppen einteilen (Abbildung A.4, links): in fünf Modellläufen werden die 20-Jahresereignisse im Durchschnitt wesentlich zu warm wiedergegeben ( $\approx 3,5^{\circ}\text{C}$  -  $\approx 10^{\circ}\text{C}$ ); in fünf Modellläufen werden die 20-Jahresereignisse im deutschen Mittel zu kalt wiedergegeben ( $-1^{\circ}\text{C}$  bis  $-4,5^{\circ}\text{C}$ ); und nur ein Modelllauf zeigt im Mittel über Deutschland keinen Bias. Die räumlichen Muster werden von allen Modellen erstaunlich gut wiedergegeben (Abbildung A.4, rechts). Dabei wird die räumliche Variabilität in Klimamodellläufen tendenziell eher zu stark wiedergegeben, die Korrelation mit den gegitterten Beobachtungswerten ist jedoch recht hoch (0,55 - 0,86).

### A.1.4 Tagestiefsttemperaturen

Die 20-Jahresereignisse der Tagestiefsttemperaturen werden von allen Modellläufen zu warm dargestellt (Abbildung A.5, links). Dabei ist der Bias bei einem Drittel der Modellläufe relativ gering und liegt zwischen  $0,5^{\circ}\text{C}$  und  $2^{\circ}\text{C}$ . Die beiden Hadley Centre Modellläufe mit erhöhter bzw. gedämpfter Klimasensitivität haben im deutschlandweiten Mittel den größten Bias, nämlich  $\approx 7^{\circ}\text{C}$  und  $\approx 10^{\circ}\text{C}$ . Die räumlichen Muster werden weniger gut als bei den Tageshöchsttemperaturen dargestellt, jedoch, mit zwei Ausnahmen, immer noch gut (Abbildung A.5, rechts).

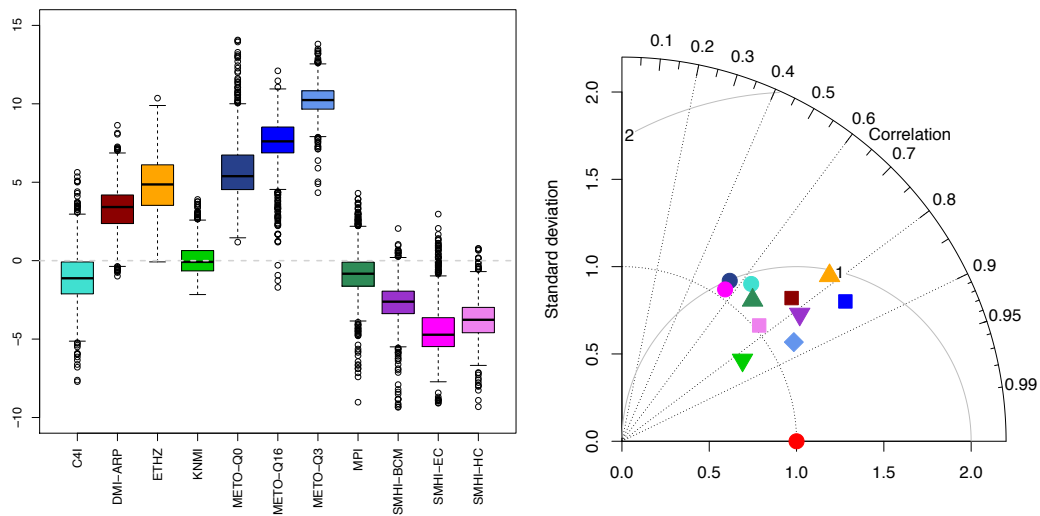


Abbildung A.4: 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte der Tageshöchsttemperatur  $T_{max}$ . Links: Absoluter Bias gegenüber Beobachtungsdaten. Rechts: Vergleich der räumlichen Muster mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und mittlere quadratische Abweichung (Abstand zu (1, 0)).

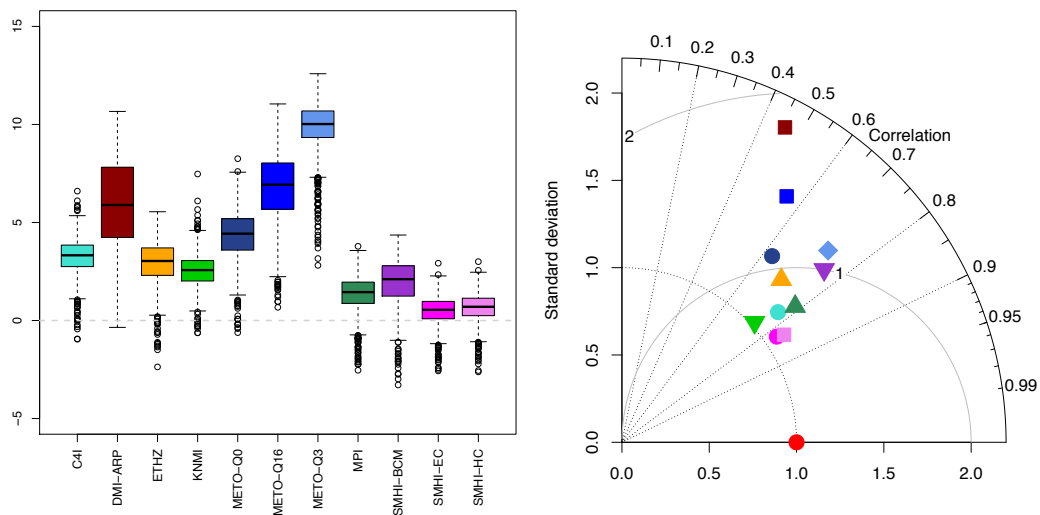


Abbildung A.5: 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte der Tagestiefsttemperatur  $T_{min}$ . Links: Absoluter Bias gegenüber Beobachtungsdaten. Rechts: Vergleich der räumlichen Muster mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und mittlere quadratische Abweichung (Abstand zu (1, 0)).

## A.2 Niederschlag

### A.2.1 Trockentage pro Jahreszeit

Die Klimamodelle simulieren mit einer Ausnahme in jeder Jahreszeit zu wenige Trockentage. Dieser Bias ist sehr unterschiedlich stark ausgeprägt, z.B. von 5-11 Tagen zu wenig pro Frühjahr bis zu 5-20 Tage zu wenig pro Winter. Im Sommer ist dieser Bias weniger stark ausgeprägt. Die generierten räumlichen Muster der Modellläufe verhalten sich für Frühjahr und Herbst ähnlich zu denen im Winter, die Variabilität der räumlichen Muster entspricht im Großen und Ganzen der Variabilität der Beobachtungsdaten (Abbildung A.6). Im Sommer unterscheiden sich die Fähigkeiten der Modellläufe räumliche Muster wiederzugeben stärker als in den anderen Jahreszeiten. Insbesondere drei Läufe fallen auf, die nicht mit dem beobachteten Muster korrelieren ( $r < 0,2$ ).

### A.2.2 Trockenperioden pro Jahreszeit

Die maximale Länge der Trockenperioden pro Saison wird im Winter und Frühling von allen Modellen und im Sommer und Herbst von den meisten unterschätzt (Abbildung A.7). Die räumlichen Muster sind für alle Jahreszeiten über alle Modellläufe gleich schlecht wiedergegeben (Abbildung A.8). Dabei streuen die Musterkorrelationen von  $r = 0$  bis  $r = 0,6$  in Winter und Herbst, im Sommer sind die Muster teilweise fast unkorreliert - im Falle des HIRHAM-ECHAM5 Laufs sogar anti-korreliert - und nur im Frühjahr gibt es Modellläufe, die die beobachteten Muster gut wiedergeben (Abbildung A.8).

### A.2.3 Niederschlagsintensität

Die Niederschlagsintensität an Regentagen wird für Frühling, Herbst und Winter relativ gut von den Klimamodellläufen wiedergegeben (Abbildung A.9). Dabei wird die räumliche Variabilität der Niederschlagsintensität für Herbst bis Frühling von den Modellen eher überschätzt. Die Sommer-Intensitäten werden von den meisten Modellen auch gut wiedergegeben.

### A.2.4 Starkniederschlagstage pro Jahreszeit

Die Anzahl der Starkniederschlagstage (mehr als 20 mm Niederschlag pro Tag) wird im Deutschlandmittel gut repräsentiert (nicht gezeigt). Dabei wird die Anzahl der Starkniederschlagstage eher über- als unterschätzt. In einzelnen Gitterpunkten simulieren die Modelle jedoch im jahreszeitlichen Durchschnitt an mehr als 20 Tagen zu häufig Starkniederschlag. Die räumlichen Muster sind vor allem für Winter und Frühling nicht gut wiedergegeben (Abbildung A.10). Insbesondere die räumliche Variabilität in der Anzahl der Starkniederschlagstage wird in den Modellläufen für alle Jahreszeiten stark überschätzt.

### A.2.5 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte des Tagesniederschlags

Die 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte werden von den Klimamodellläufen, bis auf wenige Ausnahmen, überschätzt (Abbildung A.11). Dabei sind die relativen Fehler abhängig von der Jahreszeit und dem Modelllauf. Die räumlichen Muster werden, mit Ausnahme der Sommer-Wiederkehrwerte, mäßig gut wiedergegeben (Abbildung A.12). Die räumlichen Muster der modellierten Sommer-Wiederkehrwerte korrelieren sehr schwach mit den Beobachtungsdaten.

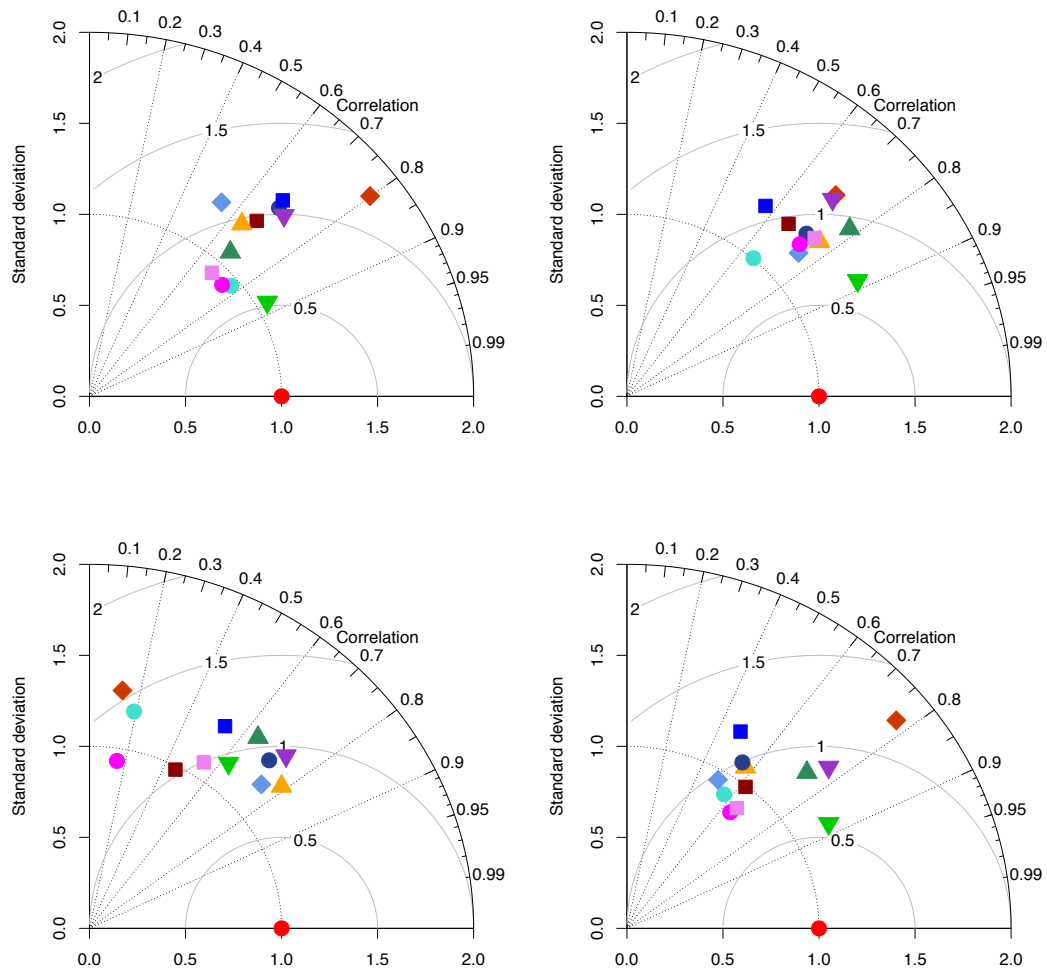


Abbildung A.6: Vergleich der räumlichen Muster der Anzahl der Trockentage mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und quadratische mittlere Distanz (Abstand zu (1, 0)). Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst



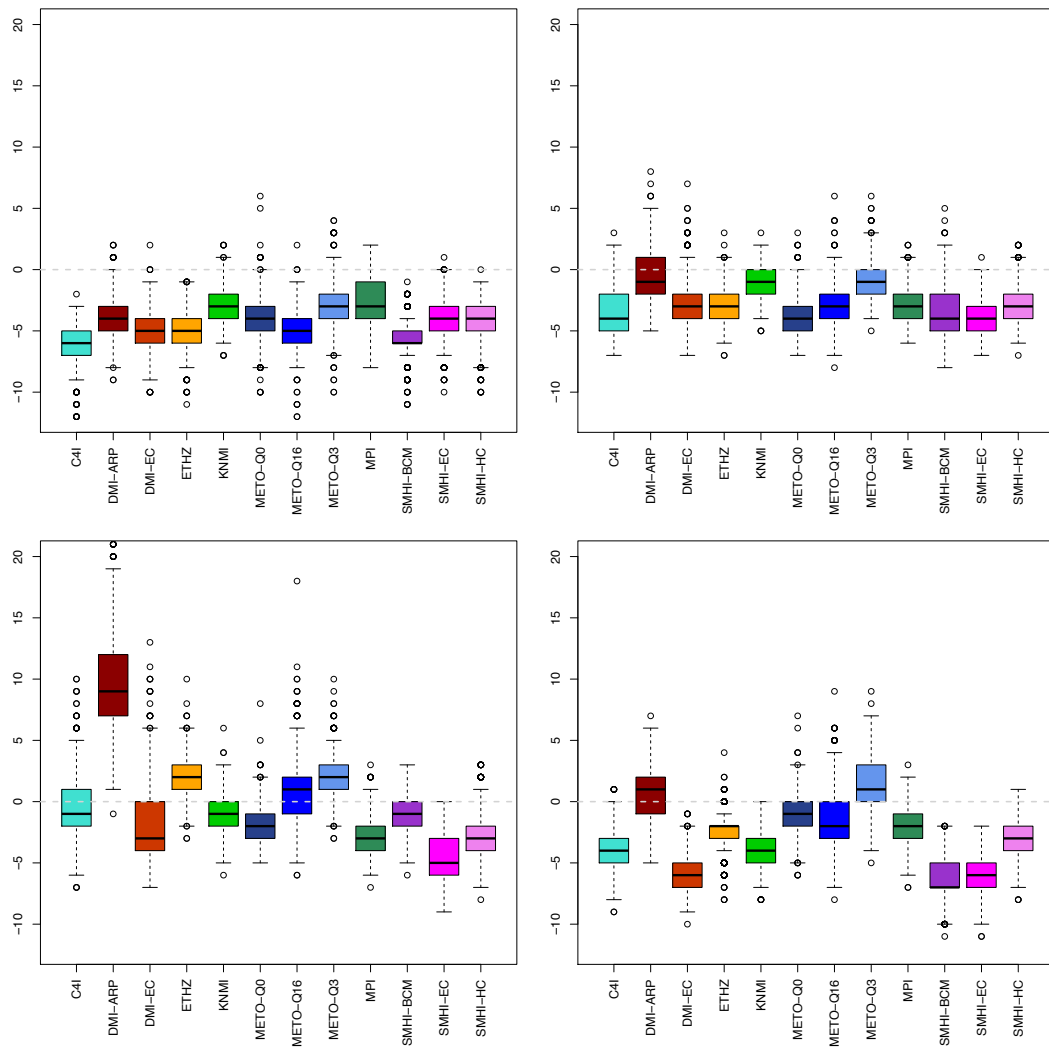


Abbildung A.7: Bias der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage im Vergleich mit Beobachtungsdaten. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

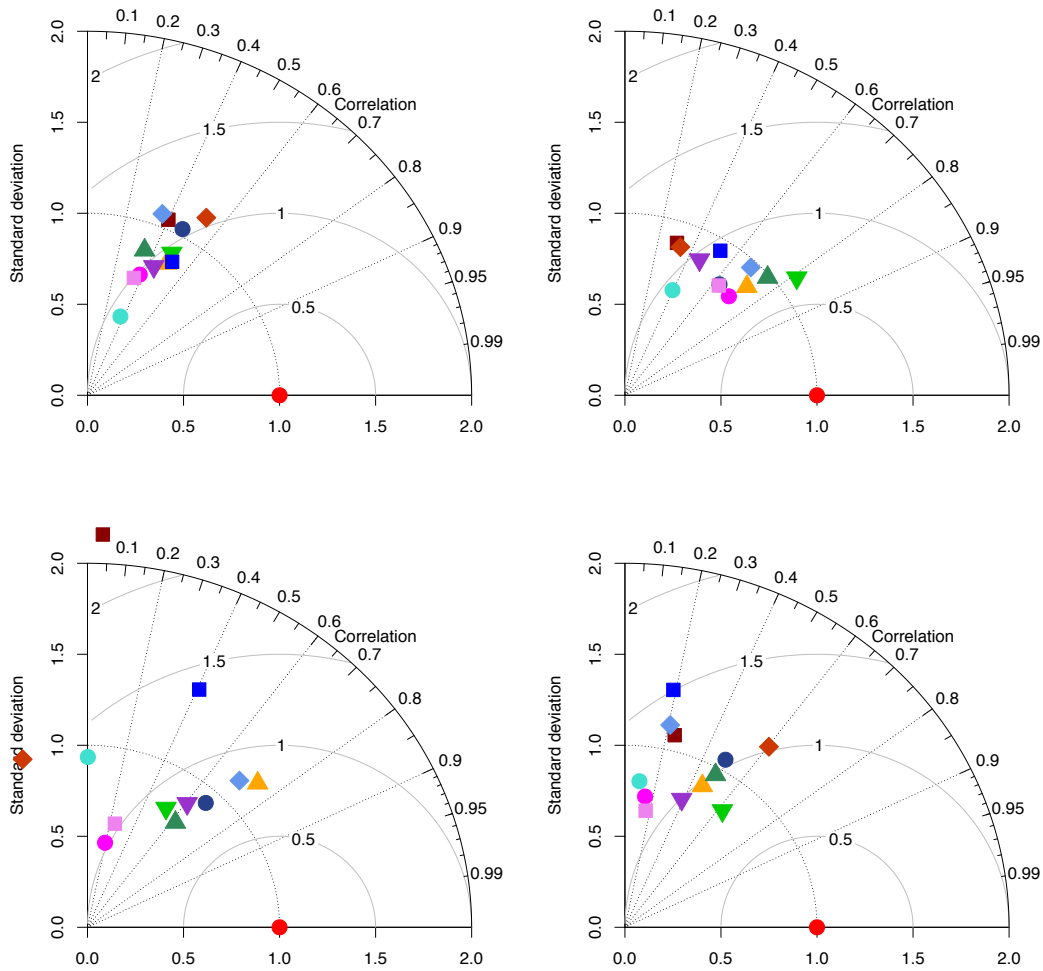


Abbildung A.8: Vergleich der räumlichen Muster der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und quadratische mittlere Distanz (Abstand zu (1, 0)). Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

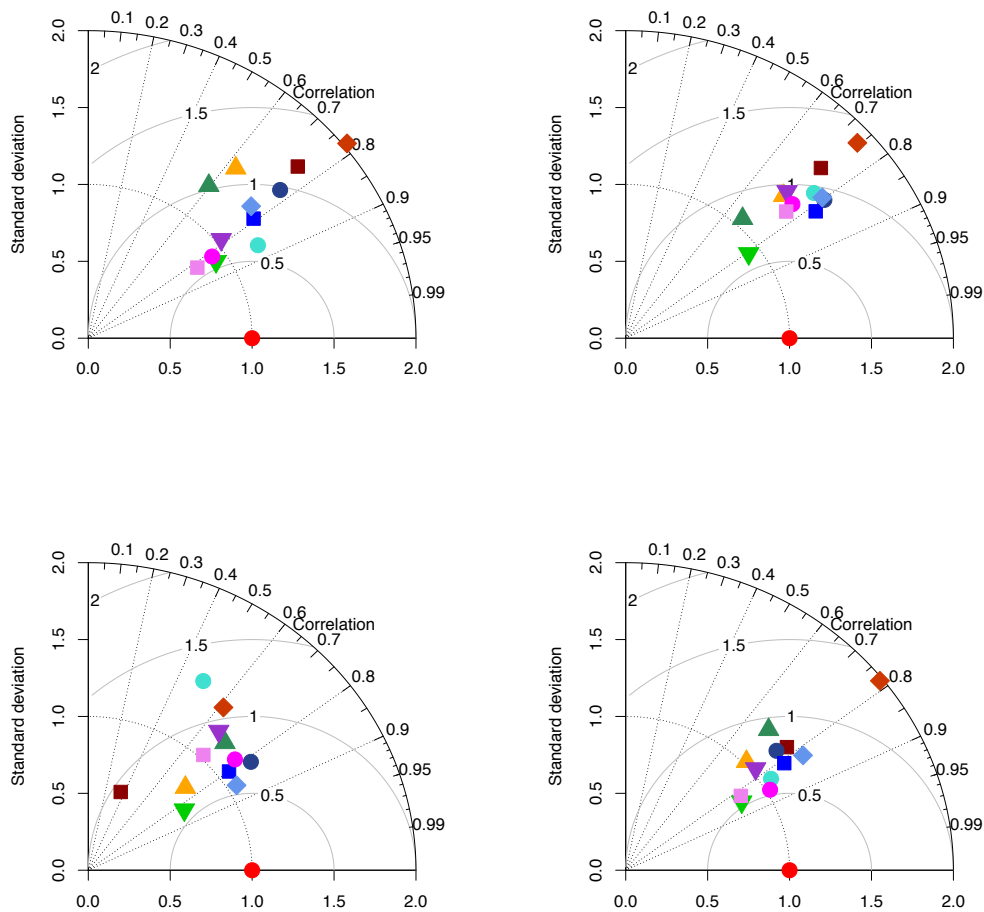


Abbildung A.9: Vergleich der räumlichen Muster der Niederschlagsintensitäten mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und quadratische mittlere Distanz (Abstand zu (1, 0)). Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

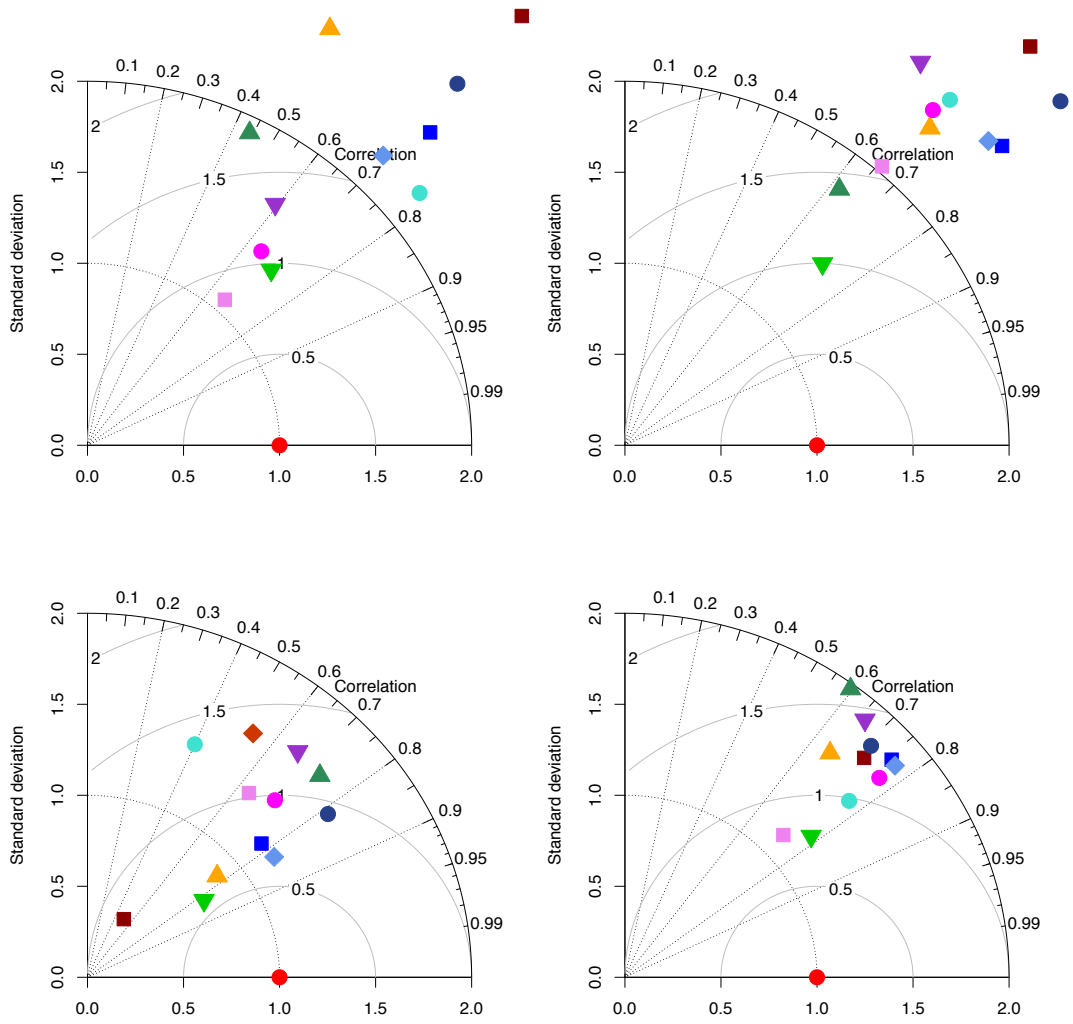


Abbildung A.10: Vergleich der räumlichen Muster der Anzahl der Starkniederschlagstage mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und quadratische mittlere Distanz (Abstand zu (1, 0)). Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

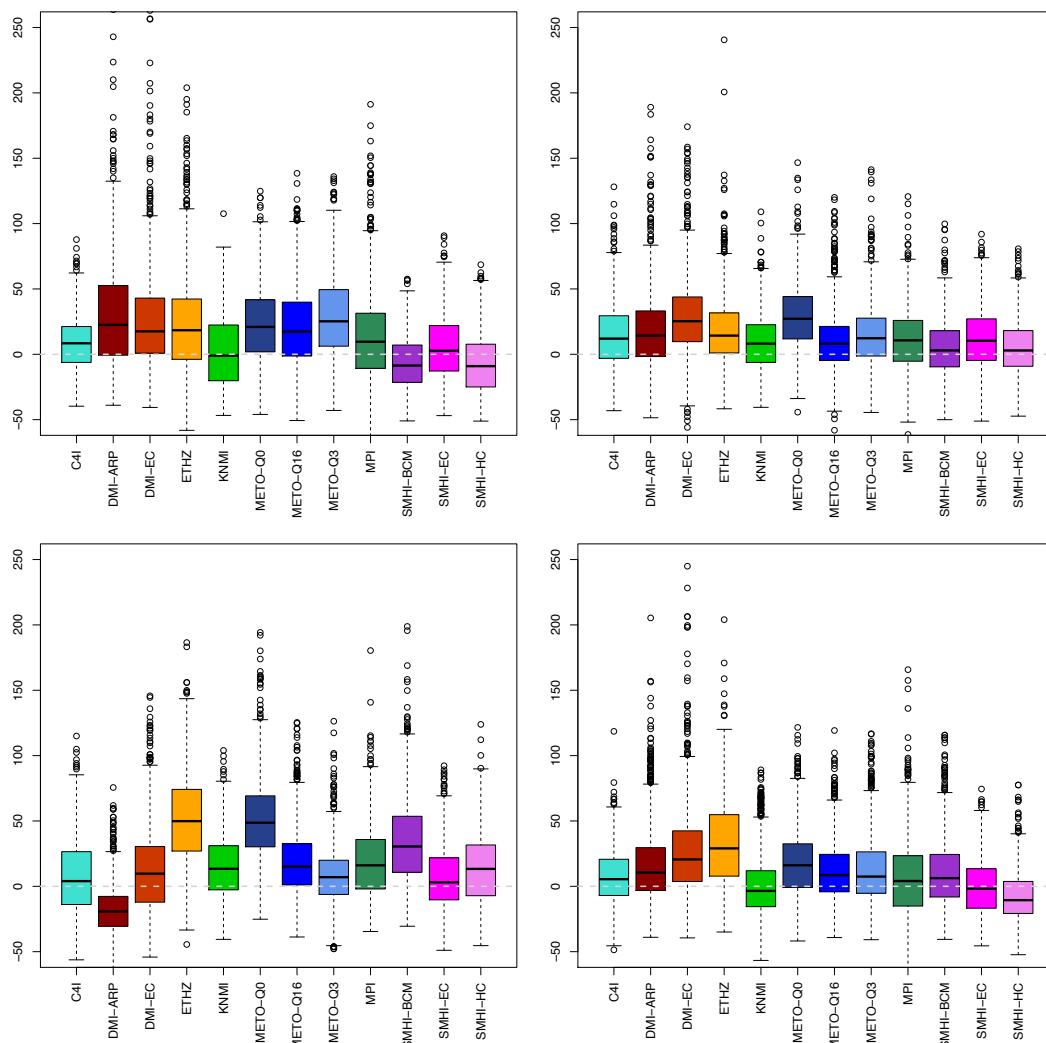


Abbildung A.11: Prozentualer Fehler der 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte des Tagesniederschlags im Vergleich mit Beobachtungsdaten. Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

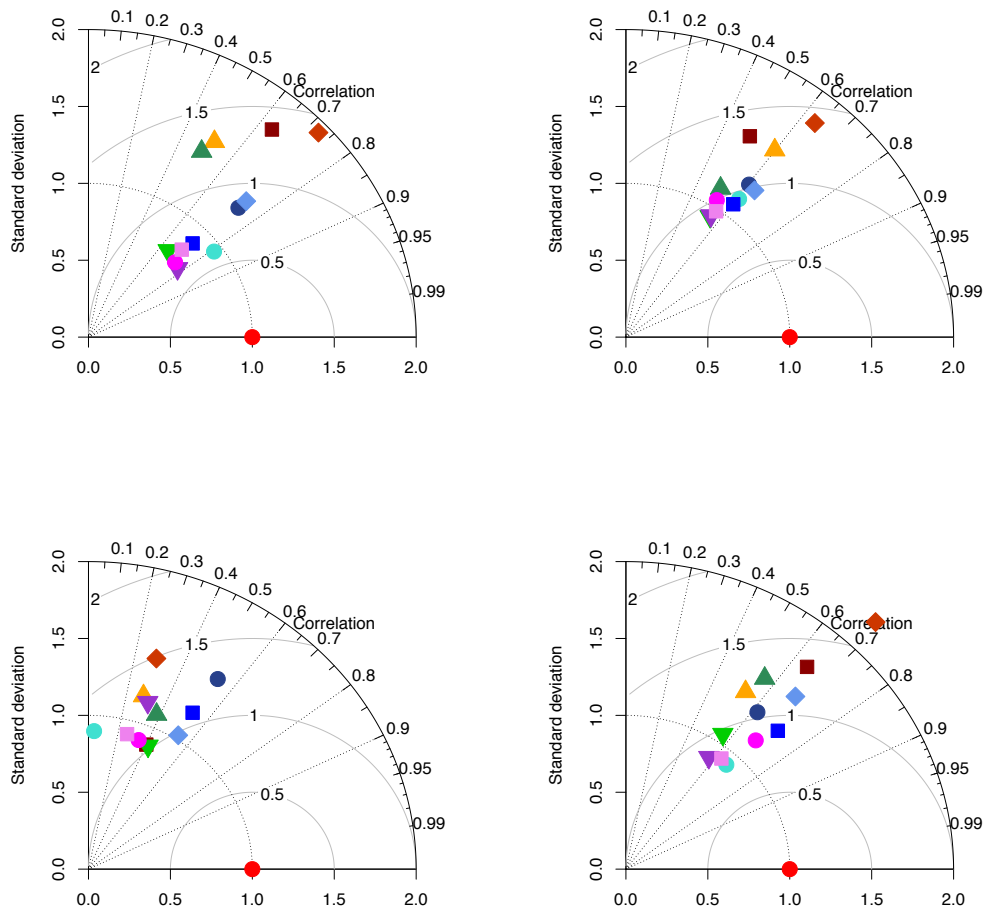


Abbildung A.12: Vergleich der räumlichen Muster der 20-Jahreszeiten-Wiederkehrwerte des Tagesniederschlags mit Beobachtungsdaten, gemessen in Korrelation (Winkel), normierte Standardabweichung (Radius) und quadratische mittlere Distanz (Abstand zu (1, 0)). Von links nach rechts: Winter, Frühling, Sommer, Herbst

## A.3 Diskussion

Die betrachteten Klimamodellläufe geben die untersuchten Temperaturindizes relativ gut wieder. Es scheint dabei systematische Fehler in einzelnen regionalen Klimamodellen - unabhängig von der Wahl des Globalmodells - zu geben. Darauf weisen z.B. der Warm-Bias der Met-Office Modellläufe und der Kalt-Bias der SMHI Modellläufe hin (siehe Abbildung A.4 links). An dieser Stelle sei bemerkt, dass ein systematischer Bias in der Temperatur natürlich automatisch zu einer falschen Anzahl von Überschreitungen einer absoluten Schwelle führt.

Die niederschlagsbasierten Größen weisen für Sommerniederschlag große Defizite auf. Bemerkenswert ist außerdem die sehr starke Überschätzung der räumlichen Variabilität der Anzahl der Starkniederschlagstage, besonders für Winter und Frühling. Die 20-Jahresereignisse werden dafür erstaunlich gut von den Klimamodellen repräsentiert.

Da bekanntermaßen auch die hier verwendeten gegitterten Beobachtungsdaten Probleme mit der Darstellung von Niederschlagsextremen haben, lassen sich die Klimamodellläufe nicht abschließend bewerten (Hofstra et al., 2010; Kysely und Plavcova, 2010; Maraun et al., 2012). An dieser Stelle sei erwähnt, dass Klimamodelle Flächenmittel des Niederschlags simulieren, also mit gegitterten Datensätzen vergleichbar sind, nicht aber mit Stationsdaten.

Ein grundsätzliches Problem bei der Validierung von Regionalmodellen, die mit gekoppelten Globalmodellen angetrieben werden, ist der Einfluss von natürlichen Klimaschwankungen. Langfristige zufällige Klimaschwankungen, insbesondere die Atlantische Multidekadische Oszillation (AMO) mit einer Periode von etwa 60 Jahren, beeinflussen das Klima in Europa (Sutton und Dong, 2012, z.B.). Zwischen einer Kalt- und Warmphase kann sich die Temperatur in manchen Regionen um bis zu etwa einem Grad ändern (in Deutschland allerdings nur im Frühling), Niederschlag um bis zu 30% (in Deutschland um etwa 10%). Die gewählte Validierungsperiode deckt etwa eine halbe Kalt- und eine halbe Warmphase ab, mittelt diesen Einfluss also in den Beobachtungsdaten heraus. Die gekoppelten Modelle laufen jedoch nicht synchron in Bezug auf natürliche Klimaschwankungen, können sich deshalb also sowohl in einer Kalt- als auch Warmphase befinden. Ein entsprechender Anteil in den Schätzungen der Biase kann folglich aus diesen natürlichen Schwankungen stammen, die tatsächlichen Biase können demnach entsprechend kleiner oder größer sein.





# Literaturverzeichnis

- Argüeso, D., Hidalgo-Muñoz, J. M., Gámiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., Dudhia, J., und Castro-Díez, Y. (2011). Evaluation of WRF Parameterizations for Climate Studies over Southern Spain Using a Multistep Regionalization. *J. Climate*, 24(11):5633–5651.
- Bachner, S., Kapala, A., und Simmer, C. (2008). Evaluation of daily precipitation characteristics in the CLM and their sensitivity to parameterizations. *Meteorol. Z.*, 17:407–419.
- Bindoff, N., Stott, P., AchutaRao, K., Allen, M., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K., Hegerl, G., Hu, Y., Jain, S., Mokhov, I., Overland, J., Perlwitz, J., Sebbari, R., und Zhang, X. (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*, Kapitel Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA.
- Bundeskabinett (2008). Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. [www.bmub.bund.de/N42783/](http://www.bmub.bund.de/N42783/).
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer Series in statistics. Springer.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., P-Friedlingstein, Gao, X., Gutowski, W., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A., und Wehner, M. (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*, Kapitel Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA.
- Déqué, M., Rowell, D. P., Luthi, D., Giorgi, F., Christensen, J. H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., de Castro, M., und van den Hurk, B. (2007). An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Clim. Change*, 81:53–70.
- Deser, C., Knutti, R., Solomon, S., und Phillips, A. (2012). Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nat. Clim. Change*, 2:775–779.
- Europäische Kommission (2013). An EU Strategy on adaptation to climate change. <http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation>.
- Goodess, C., Anagnostopoulou, C., Bárdossy, A., Frei, C., Harpham, C., Haylock, M., Hundecha, Y., Maheras, P., Ribalaygua, J., Schmidli, J., Schmith, T., Tolika, K., Tomozeiu, R., und

- Wilby, R. (2010). An intercomparison of statistical downscaling methods for Europe and European regions – assessing their performance with respect to extreme weather events and the implications for climate change applications. Technical report, Climatic Research Unit.
- Hartmann, D., Klein Tank, A., Rusticucci, M., Alexander, L., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F., Dlugokencky, E., Easterling, D., Kaplan, A., Soden, B., Thorne, P., Wild, M., und Zhai, P. (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*, Kapitel Observations: Atmosphere and Surface. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA.
- Hawkins, E. und Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 90(8):1095–1107.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., und New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res.*, 113:20119.
- Hofstra, N., New, M., und McSweeney, C. (2010). The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in daily gridded data. *Clim. Dyn.*, 35:841–858.
- Kendon, E.J., Roberts, N.M., Fowler, H.J., Roberts, M.J., Chan, S.C., und Senior, C.A. (2014). Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change*, 4:570-576.
- Kysely, J. und Plavcova, E. (2010). A critical remark on the applicability of E-OBS European gridded temperature data set for validating control climate simulations. *J. Geophys. Res.*, 115:D23118.
- Maraun, D. (2012). Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums. *Geophys. Res. Lett.*, 39:L06706.
- Maraun, D. (2013). When will trends in European mean and heavy daily precipitation emerge? *Env. Res. Lett.*, 8:014004.
- Maraun, D., Osborn, T. J., und Rust, H. (2012). The influence of synoptic airflow on UK daily precipitation extremes. Part II: regional climate model and E-OBS data validation. *Clim. Dynam.*, 39:287–301.
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H. W., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M., and Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change. Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev. Geophys.*, 48:RG3003.
- Nakicenovic, N. und Swart, R., Hrsg. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Planton, S., Hrsg. (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*, Annex III: Glossary. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA.
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., und Zhang, X. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Kapitel Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. Cambridge University Press.
- Sillmann, J. und Roeckner, E. (2008). Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climatic Change*, 86:83–104.
- Sutton, R. und Dong, B. (2012). Atlantic ocean influence on a shift in european climate in the 1990s. *Nat. Geosci.*, 5:788–792.
- Tomassini, L. und Jacob, D. (2009). Spatial analysis of trends in extreme precipitation events in high-resolution climate model results and observations for Germany. *J. Geophys. Res.*, 114:D12113.
- Trömel, S. und Schönwiese, C.-D. (2007). Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany. *Theo. Appl. Climatol.*, 87:29–39.
- van der Linden, P. und Mitchell, J. F. B. (2009). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Technical report, Met Office Hadley Centre.
- Woollings, T. (2013). Dynamical influences on European climate: An uncertain future. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368:3733–3756.