



LAND  
BRANDENBURG

Ministerium für Ländliche  
Entwicklung, Umwelt und  
Landwirtschaft

Klima



Fachbeiträge des LfU

Heft Nr. 150

## **Klimareport Brandenburg 2016**

### **Das Klima von gestern, heute und in Zukunft**

Darstellung der Entwicklung des Klimawandels  
im 20. Jahrhundert aktuellen Problemen und  
von Szenarioergebnissen zum Ende  
des 21. Jahrhundert



Landesamt für Umwelt

**Fachbeiträge des Landesamtes für Umwelt  
Titelreihe Heft-Nr. 150**

**Klimareport Brandenburg 2016 - Das Klima von gestern, heute und in Zukunft**

Darstellung der Entwicklung des Klimawandels im 20. Jh., aktuellen Problemen und von Szenarioergebnissen zum Ende des 21. Jh.

**Herausgeber:**

Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft  
des Landes Brandenburg (MLUL)  
Henning-von-Tresckow-Str. 2-13  
14467 Potsdam  
[Pressestelle@mlul.brandenburg.de](mailto:Pressestelle@mlul.brandenburg.de)  
[www.mlul.brandenburg.de](http://www.mlul.brandenburg.de)

Landesamt für Umwelt (LfU)  
Seeburger Chaussee 2  
OT Groß Glienicke  
14476 Potsdam  
Tel.: 033201 - 442 127  
Fax: 033201 - 43678  
[www.lfu.brandenburg.de](http://www.lfu.brandenburg.de)

**Kontakt:**

LfU, Referat T14 – Luftqualität und Nachhaltigkeit, in Zusammenarbeit mit den Studentinnen  
Stephanie Wenzel, Meike Dorfner, Marthe-Marlene Bahnsen (alle HU Berlin) und Belinda Sieg  
(Universität Potsdam)

Potsdam, im Sept. 2016

Die Veröffentlichung als Print und Internetpräsentation erfolgt im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbenden oder Dritten zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden.

# Klimareport Brandenburg 2016 - Das Klima von gestern, heute und in Zukunft

<b>1. Einleitung – Brandenburg im Klimawandel</b> .....	4
<b>2. Klima des 20. Jahrhunderts in Brandenburg</b> .....	6
2.1 Temperaturentwicklung .....	6
2.2 Entwicklung der jahreszeitlichen Mitteltemperatur .....	7
2.3 Niederschlagsentwicklung .....	9
2.4 Entwicklung des jahreszeitlichen mittleren Niederschlages in Brandenburg im 20. Jahrhundert .....	10
<b>3. Starkniederschläge in der Gegenwart</b> .....	12
3.1 Niederschlagsvariabilität.....	12
3.2 Ausgangslage und Methodik .....	13
3.3 Darstellung ausgewählter Starkregenereignisse .....	13
3.4 Zwischenfazit.....	16
<b>4. Entwicklung ausgewählter Klimaextreme zum Ende des 21. Jahrhunderts</b> .....	18
4.1 Methodik.....	18
4.1.1 Ensemblebildung .....	18
4.1.2 Ausgewählte Modelle .....	20
4.1.3 Ausgewählte Indizes.....	23
4.1.4 Betrachtete Zeiträume .....	24
4.2 Datenauswertung .....	25
4.2.1 Meteorologisches Jahr.....	26
4.2.2. Vergleichende Auswertung für das meteorologische Jahr .....	42
4.2.3 Jahreszeitliche Differenzierung für ausgewählte Niederschlagsparameter .....	44
4.2.4 Vergleichende Auswertung für die jahreszeitliche Differenzierung ausgewählter Niederschlagsparameter .....	56
<b>5. Fazit</b> .....	59
<b>Quellen, Literatur</b> .....	61

## 1. Einleitung – Brandenburg im Klimawandel

Das Klima ändert sich weltweit. Und mit dem Klima ändern sich die Lebensbedingungen der Menschen - auch im Land Brandenburg. Besonders in den letzten Jahren häuften sich die Meldungen von Extremereignissen auf der ganzen Welt und auch in der Region Brandenburg-Berlin. Fast jedes Jahr ist erneut die Rede vom „Jahrhunderthochwasser“ oder dem „Jahrhundertsommer“. Wahrscheinlicher ist jedoch die Annahme, dass zukünftig Extremwetter häufiger auftreten und so eine neue Definition für die jeweiligen „Jahrhundertereignisse“ gefunden werden muss.

Die Auswertung der beobachteten Klimadaten zeigt, wie stark Brandenburg bereits jetzt vom Klimawandel betroffen ist. Im Laufe des 21. Jahrhunderts wird mit einer Zunahme der jährlichen Durchschnittstemperatur sowie mit einer Verschiebung der mittleren jährlichen Niederschläge gerechnet. Bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat sich die durchschnittliche Jahrestemperatur im Flächenmittel in der Region Brandenburg-Berlin um fast ein Grad auf 9,3° C erhöht. Die Klimamodelle projizieren für die Region bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen weiteren Anstieg auf ca. 12-13° C im Jahresmittel.

Auch das Einsetzen der Jahreszeiten hat sich in den letzten Jahren bereits deutlich verändert. Der Beginn der Vegetationsphasen ist ein guter Indikator um die Klimaänderungen zu verdeutlichen. Die Verschiebung der Jahreszeiten, wie das frühere Einsetzen des Frühlings und die Verkürzung des Winters, zeigen deutlich die Auswirkungen des Klimawandels in Brandenburg.

Der Klimawandel wird zudem die Niederschlagsentwicklung beeinflussen. Die größten Veränderungen werden hierbei jedoch nicht in der Jahresdurchschnittsmenge zu bemerken sein, sondern in der jahreszeitlichen Verteilung der Niederschläge und dem Verhältnis aus Trockenperioden und Starkniederschlägen. Die Klimamodelle projizieren eine signifikante Abnahme der Sommerniederschläge, so dass die Wahrscheinlichkeit für eine Verlängerung der sommerlichen Trockenperioden und das Risiko für Hitzewellen zunimmt. Gleichzeitig nimmt jedoch die Wahrscheinlichkeit für Starkniederschläge im Sommer signifikant zu. Für die Winterniederschlagssummen ergibt sich aus den Modellen eine Zunahme. Bei gleichbleibendem oder sich kaum veränderndem Jahresniederschlag und gleichzeitiger Zunahme der Niederschlagssummen im Winter ist davon auszugehen, dass ein größerer Teil des Jahresniederschlags nicht mehr in Form eines lang anhaltenden Landregens zur Verfügung steht. Wahrscheinlicher ist hingegen, dass nun ein größerer Teil als Starkniederschlag fällt.

Starkniederschläge sind extreme Wetterereignisse. Ein Extremwetterereignis ist durch seltenes Auftreten hinsichtlich Größe, Wiederkehr und Andauer gekennzeichnet. Die Definition eines Extremereignisses kann durch die statistische Wiederkehrwahrscheinlichkeit und durch das Setzen von Schwellenwerten getroffen werden.

Für Brandenburg sind dies aufgrund des charakteristisch trockenen und warmen Klimas besonders die Niederschlags-, Trockenheits- und Hitzeextreme. Starkniederschlagsereignisse sind in der Region bereits heute keine Seltenheit. In den Jahren 2013 und 2014 wurden an 12 Klima- und Wetterstationen in Brandenburg 73 starke Niederschlagsereignisse registriert.

Die klimatischen Voraussetzungen, die gegenwärtigen Klimabeobachtungen und die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels machen die Region Berlin-Brandenburg zu einer der am stärksten verwundbaren Gebiete Deutschlands. Daher sind die Untersuchungen von Extremwerten der Klimaelemente und ihre Veränderung im Zuge des Klimawandels von großer Bedeutung. Ob sich der Klimawandel in Brandenburg auch auf die Häufigkeit und das Ausmaß von extremen Wetterereignissen auswirkt, soll die Untersuchung

acht ausgewählter, spezieller Klimaelemente aufzeigen. Zunächst wird jedoch der Ausgangszustand der Temperatur und des Niederschlags im Verlauf des 20. Jahrhunderts betrachtet. Hier stehen die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur, der jahreszeitlichen Mitteltemperaturen, des Jahresniederschlages und die Entwicklung des jahreszeitlichen mittleren Niederschlages in Brandenburg im Fokus.

Die Aussagen in den Kapiteln 2 und 3 gründen auf Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die Analyse der Entwicklung ausgewählter Klimaextreme zum Ende des 21. Jahrhunderts (Kap.4) basiert auf Klimamodelldaten. Der Arbeit liegt ein Multimodell-Multiszenario-Ensemble, bestehend aus 12 Ensemblemitgliedern, zu Grunde.

Hinweise zu den Datenquellen, der Datennutzung und methodische Hinweise sind den einzelnen Kapiteln vorangestellt.

Im Bericht werden Auswertungen für das Jahr und für einzelne Jahreszeiten vorgenommen. Die Zeiträume definieren sich wie folgt:

- Das kalendarische Jahr umfasst 12 Monate und reicht von Januar bis Dezember.
- Das meteorologische Jahr umfasst 12 Monate und reicht von Dezember (des ausgewiesenen Vorjahres) bis November (des angegebenen Jahres).
- Der meteorologische Winter umfasst ein Zeitraum von 3 Monaten und reicht von Dezember des Vorjahres bis einschließlich Februar eines Jahres (DJF).
- Der meteorologische Frühling umfasst einen Zeitraum von 3 Monaten und reicht von März bis einschließlich Mai eines Jahres (MAM).
- Der meteorologische Sommer umfasst einen Zeitraum von 3 Monaten und reicht von Juni bis einschließlich August eines Jahres (JJA).
- Der meteorologische Herbst umfasst einen Zeitraum von 3 Monaten und reicht von September bis einschließlich November eines Jahres (SON).

## 2. Klima des 20. Jahrhunderts in Brandenburg

Um die Dynamik und das Ausmaß der Klimaänderung beurteilen zu können, ist die Analyse des vergangenen Jahrhunderts für die Hauptparameter Temperatur und Niederschlag notwendig. Alle nachfolgenden Auswertungen zu diesem Zeithorizont basieren auf Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes und wurden im Rahmen einer vom LfU betreuten Bachelorarbeit erstellt (Wenzel, St. 2015). Es wurden die Rasterdaten Daten aus dem Climate Data Center (CDC) des DWD (mit Stand 2015) genutzt. Es wurden die Mittelwerte der 30-jährigen Zeiträume (Tricenien) gebildet und gegenüber gestellt (Ausnahmen: Abb.1 und 5). Betrachtungsraum ist immer die Region Brandenburg und Berlin.

### 2.1 Temperaturentwicklung

Bei der Analyse der Temperaturentwicklung innerhalb des 20. Jahrhunderts wird deutlich, dass sich die Jahresmitteltemperatur in Brandenburg-Berlin nicht gleichmäßig erhöht hat, sondern der größte Anstieg innerhalb der letzten 30 Jahre (1971 - 2000) erfolgte. Das fünfjährige gleitende Mittel macht diesen Anstieg gut sichtbar. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts lag die Mitteltemperatur leicht schwankend bei ca. 8,65 °C und stieg trotz zahlreicher Schwankungen bis zum Ende des 20. Jahrhunderts auf 9,3 °C im Mittel an (Abbildung 1).

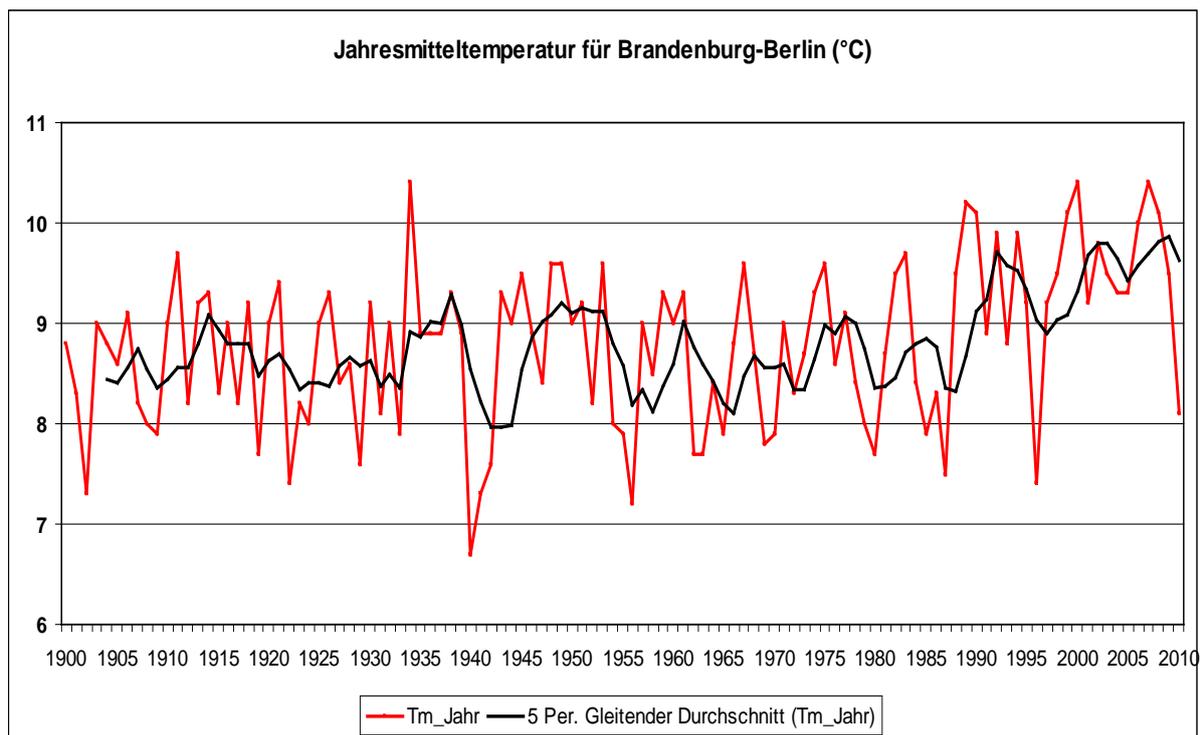


Abb. 1: Jahresmitteltemperaturentwicklung in Berlin-Brandenburg in °C im Zeitraum 1900 – 2010.

Die Tendenz zu einer Erhöhung der Jahrestemperatur wird verstärkt sichtbar durch die Veränderung der Maximalwerte innerhalb eines 30-jährigen Zeitraums. So steigen diese in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts noch stärker an als die Mittelwerte und erreichen im letzten Tricennium (30-Jahresabschnitt) einen Maximalwert von 10,4 °C. Dieser ist 1,2 K wärmer verglichen mit dem ersten Tricennium des 20. Jahrhunderts (Abbildung 2).

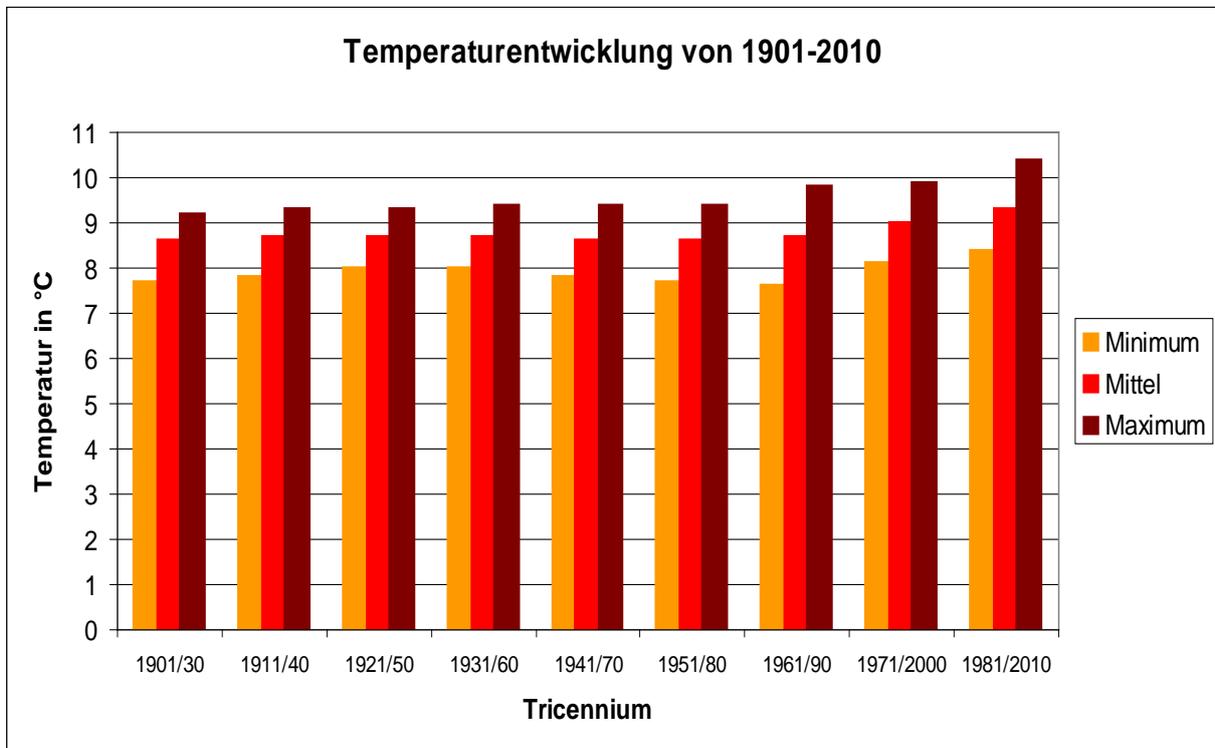


Abb. 2: Temperaturentwicklung vom Zeitraum 1901-2010 dargestellt in Tricennien für die Minimal-, Mittel- und Maximaltemperaturen.

## 2.2 Entwicklung der jahreszeitlichen Mitteltemperatur

Ein weiterer bedeutender Indikator zur Betrachtung des Klimawandels in Brandenburg ist die Entwicklung der Temperatur bezogen auf die meteorologischen Jahreszeiten. In Abbildung 3 ist die Änderung der jahreszeitlichen Mitteltemperatur ausgehend vom Tricennium 1901/30 bis zum Zeitraum 1981/2010 in K nach den Jahreszeiten unterteilt dargestellt.

Im Frühling wird ein Anstieg der Mitteltemperatur um 0,6 K bis zum Zeitraum 1981/2010 erkennbar. Zwischen der kältesten Periode 1951/80 und der wärmsten 1981/2010 beträgt der Temperaturunterschied sogar 1,1 K.

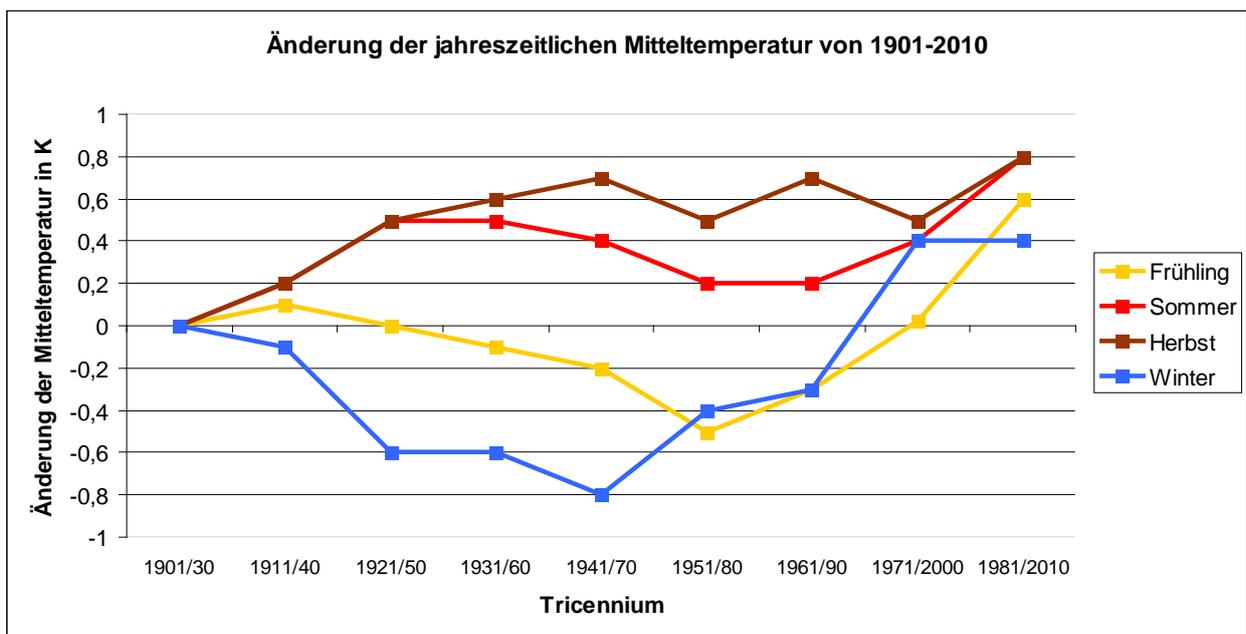


Abb. 3: Änderung der jahreszeitlichen Mitteltemperatur vom Zeitraum 1901/30 ausgehend, dargestellt in Tricennien bis zum Zeitraum 1981/2010.

Auch die jahreszeitliche Mitteltemperatur des Sommers entwickelte sich im Laufe des 20. Jahrhunderts deutlich. Es wurde um 0,8 K, von 17,1 °C auf 17,9 °C, wärmer (Abbildung 3 & 4).

Im selben Zeitraum ist eine gleich starke Erwärmung für die Herbsttemperaturen in Höhe von 0,8 K verzeichnet. Die Erwärmung fand verstärkt in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts statt, von 8,5 °C im Zeitraum 1901/1931 bis 9,2 °C im 1941/70.

Die Temperaturentwicklung im Winter ist bis zum Tricennium 1941/70 zunächst klar rückläufig, danach setzt eine Erwärmung ein, die bis zum Zeitraum 1981/2010 eine Temperaturzunahme vom ersten Betrachtungszeitraum um 0,4 K auf 0,8 °C im Mittel erreicht.

Alle Jahreszeiten zeigen für das 20. Jahrhundert deutliche Erwärmungstendenzen. Diese erfolgten verstärkt in der zweiten Hälfte, nachdem es zuvor, in allen vier Jahreszeiten unterschiedlich ausgeprägt, bis zur Mitte des Beobachtungszeitraums tendenziell kühler geworden war. Die Periode 1981-2010 ist in allen Jahreszeiten die wärmste des gesamten Beobachtungszeitraumes.

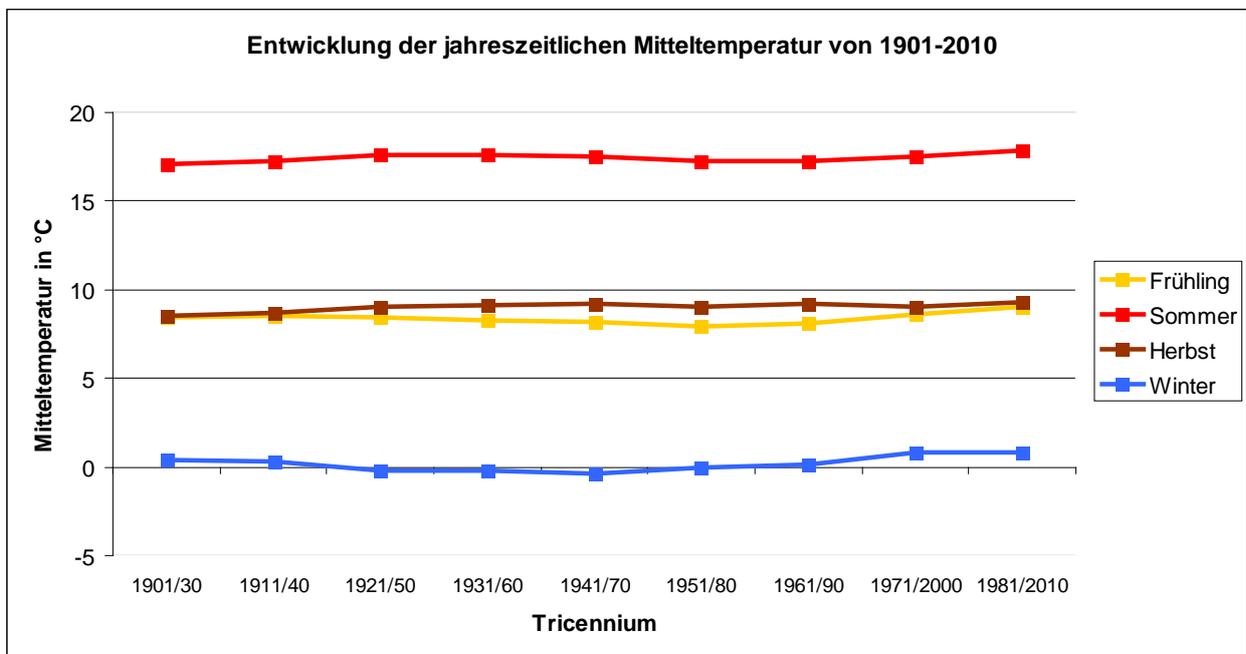


Abb. 4: Entwicklung der jahreszeitlichen Mitteltemperatur vom Zeitraum 1901/30 ausgehend, dargestellt in Tricennien bis zum Zeitraum 1981/2010.

## 2.3 Niederschlagsentwicklung

Die Entwicklung des mittleren Jahresniederschlags in Brandenburg zeigt für das vergangene Jahrhundert keine eindeutige Tendenz. Die Jahresmenge schwankt um 550-600 mm. Das fünfjährige gleitende Mittel macht jedoch einen Anstieg in der letzten Dekade sichtbar (Abbildung 5).

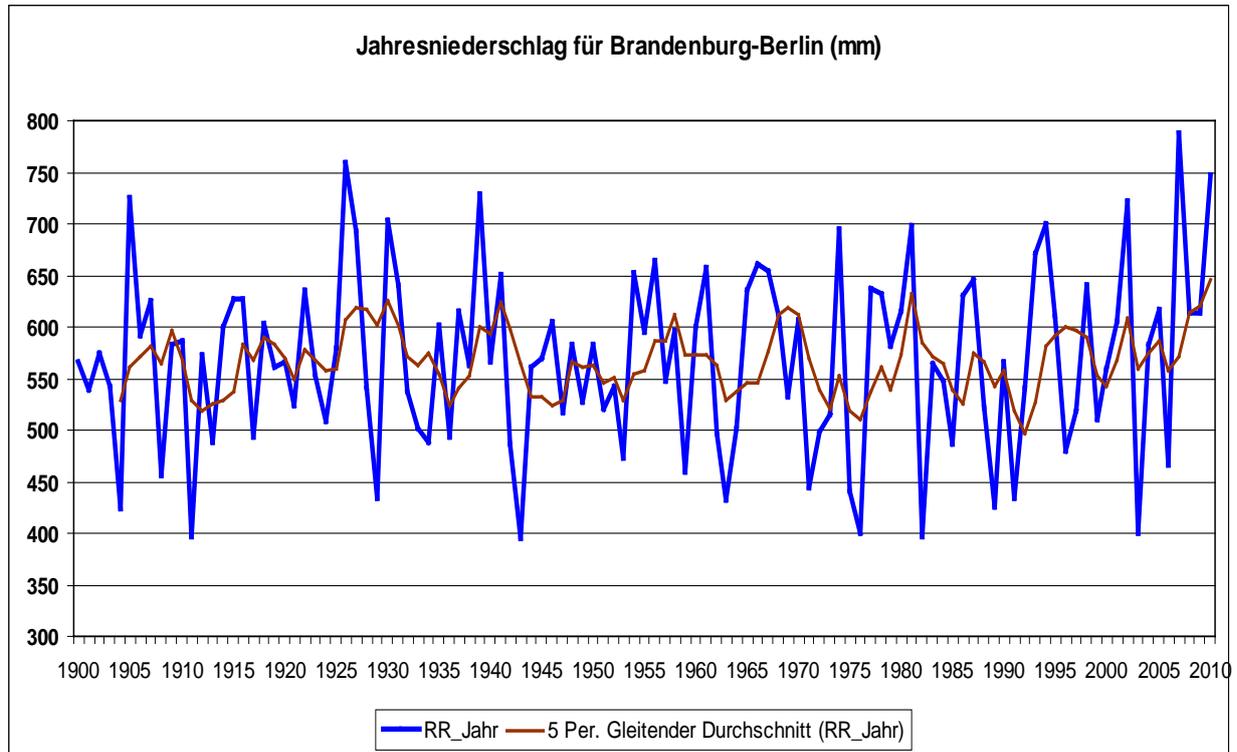


Abb. 5: Jahresniederschlagsentwicklung in Berlin-Brandenburg in °C im Zeitraum 1900 – 2010.

Die Betrachtung des Niederschlags in den Tricennien weist nach, dass es Änderungen im Niederschlagsangebot gab (Abbildung 6). Die mittleren 30-Jahreswerte liegen im ersten der drei Zeiträume (1901/30; 1911/40; 1921/50) bei ca. 570 mm. Dieser Wert sinkt bis 1971/2000 um knapp 20 mm, steigt aber anschließend im letzten Tricennium sprunghaft auf 580 mm. Ausnahme für Mittel und Minimum sind die Zeiträume 1961/90 und 1971/00. Diese Tricennien sind von allen Zeiträumen im gesamten Betrachtungszeitraum am trockensten.

Auffällig ist die starke Abnahme der maximalen Niederschlagswerte in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Hier ist ein deutlicher Rückgang des Niederschlags um fast 100 mm zu verzeichnen, von 781 mm im Zeitraum 1901/1930 auf 689 mm in 1941/1970. Im weiteren Verlauf des Jahrhunderts schwanken die Maximalwerte um 700 mm.

Besonders markant ist die deutliche Abnahme der Maximalwerte der Niederschläge für die Tricennien zum Ende des vergangenen Jahrhunderts. Im Gegensatz zu den Maximalwerten variieren die Mittelwerte oder Minimumwerte deutlich geringer.

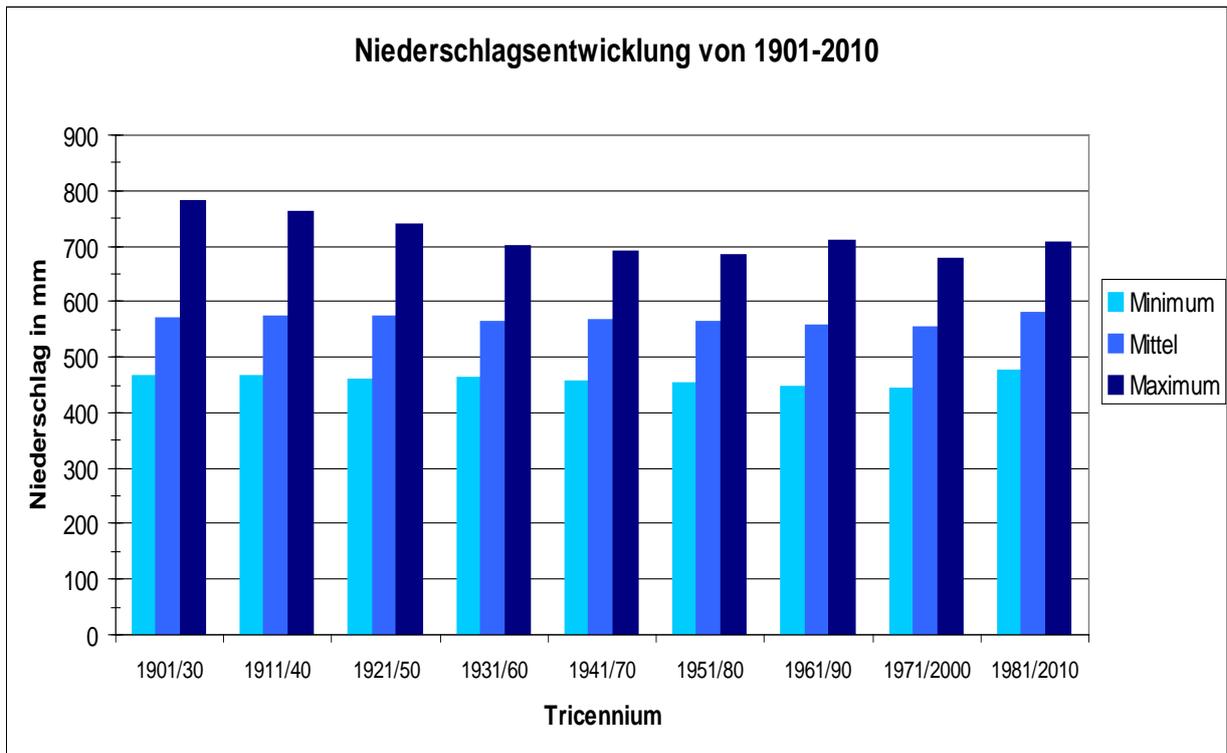


Abb. 6: Niederschlagsentwicklung vom Zeitraum 1901-2010 dargestellt in Tricennien für die Minimal-, Mittel- und Maximalniederschläge.

## 2.4 Entwicklung des jahreszeitlichen mittleren Niederschlages in Brandenburg im 20. Jahrhundert

Die mittlere Niederschlagssumme des meteorologischen Frühlings ändert sich bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts kaum. Nach 1951/80 setzt eine Zunahme des Niederschlags ein, so dass die Gesamtzunahme im Vergleich zwischen dem ersten und letzten Tricennium (1901-1930 und 1981-2010) 13 mm beträgt (Abbildung 8).

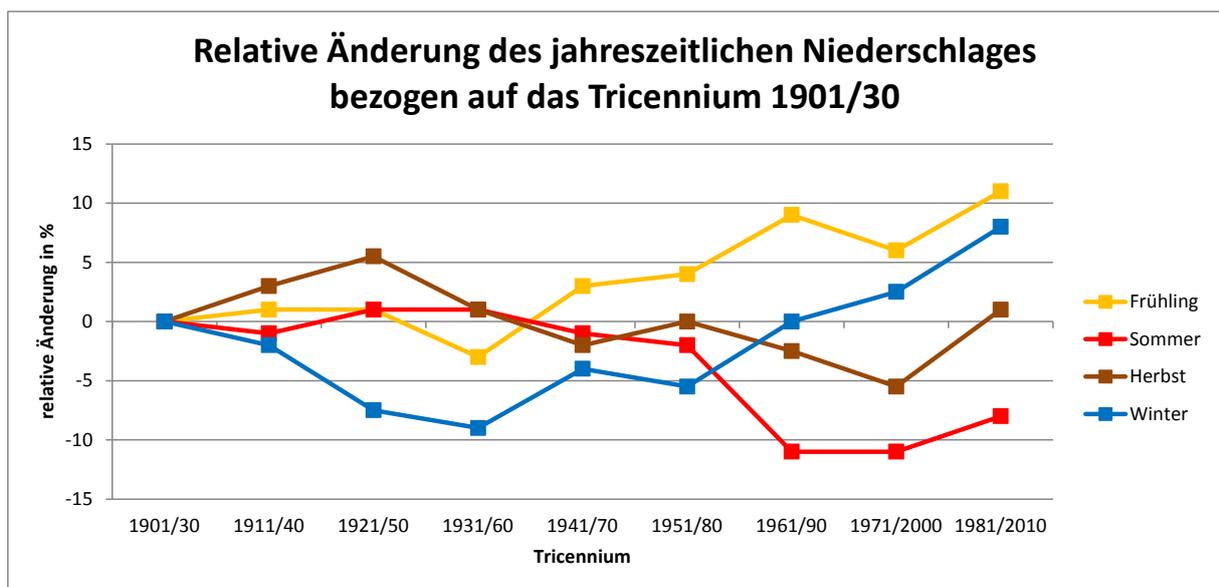


Abb. 7: Relative Änderung der jahreszeitlichen Niederschläge bezogen auf das Tricennium 1901/30.

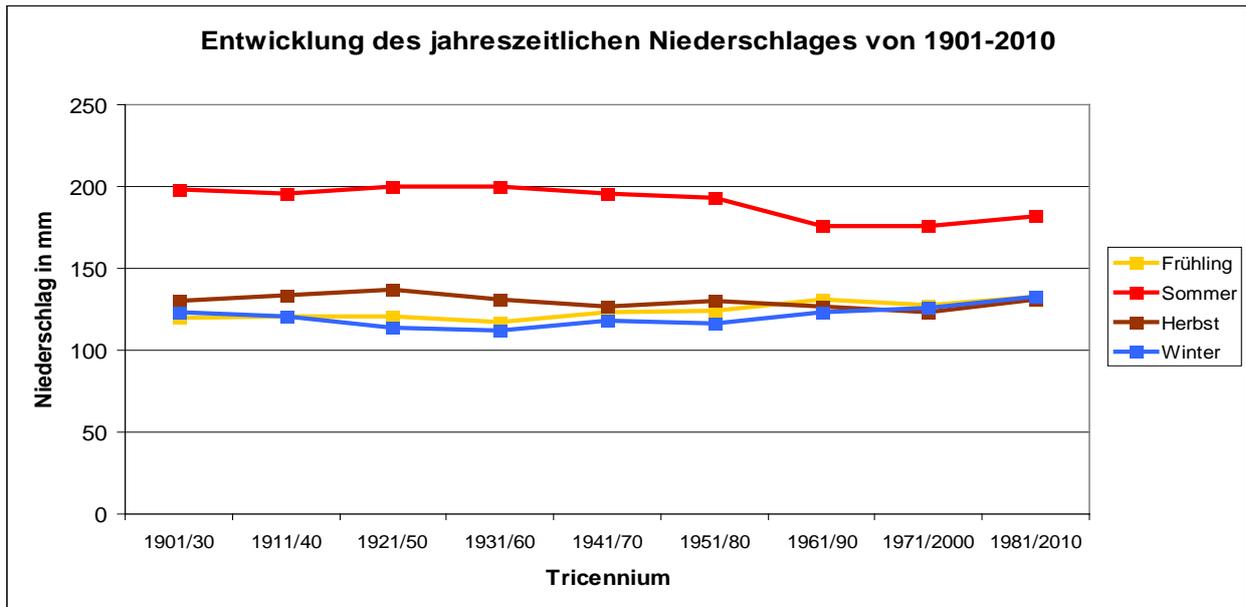


Abb. 8: Entwicklung des jahreszeitlichen Niederschlages von 1901-2010.

Somit hat sich der relative Niederschlag um 11% erhöht (Abbildung 7). Für die mittlere Niederschlagsmenge im Sommer ist im Verlauf des 20. Jahrhunderts insgesamt eine Abnahme des Niederschlages zu verzeichnen. In der ersten Hälfte des Jahrhunderts schwanken die mittleren Niederschläge zwischen 193 und 200 mm und sind somit bis zum 30-Jahres-Zeitraum 1951/81 konstant. Ab 1961/90 sind rückläufige Mengen festzustellen. So fielen in den letzten drei Perioden zwischen 176 und 182 mm Niederschlag (Abbildung 8). Prozentual hat sich die Niederschlagsmenge vom ersten zum letzten beobachteten Tricennium um ca. 8% verringert (Abbildung 7).

Im Herbst ist kein einheitlicher Trend zur Veränderung der mittleren Niederschlagssummen zu erkennen. Die mittlere Niederschlagsmenge variiert nur gering und liegt im Bereich um 130 mm (Abbildung 8).

Für den Winter ist hingegen eine leichte Zunahme der Niederschlagsmenge bis zum Ende des 20. Jahrhunderts erkennbar. Lagen die Mengen zu Beginn noch knapp über und im Verlauf sogar unter der 120 mm-Marke, ist ab dem 30-Jahres-Zeitraum 1941/70 ein relativ gleichmäßig verlaufender Anstieg bis auf 133 mm im letzten Abschnitt sichtbar (Abbildung 8). Prozentual liegt die Zunahme der winterlichen Niederschläge bei ca. 8% (Abbildung 7).

### 3. Starkniederschläge in der Gegenwart

Für die Beurteilung des Niederschlages und seines Änderungsverhaltens sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Die Niederschlagsmenge pro Jahr ist nur ein Beurteilungskriterium. Die mögliche Verschiebung der Niederschlagsmenge innerhalb der Jahreszeiten ist ein weiteres Bewertungskriterium. Besonderes Augenmerk gilt aber der steigenden Variabilität von Niederschlagsmengen (z.B.: Monatsniederschlägen) und der wachsenden Intensität von Ereignissen mit hohen Niederschlägen.

#### 3.1 Niederschlagsvariabilität

Der Niederschlag ist einem Wandel unterworfen. Zwar finden nur geringe Veränderungen bei der Jahresdurchschnittsmenge statt, es ist jedoch eine neue jahreszeitliche Verteilung erkennbar. Schon im letzten Jahrhundert haben die Niederschläge im Sommer ab- und im Winter hingegen zugenommen.

Bereits heute zeigt sich eine hohe Niederschlagsvariabilität mit Defiziten im Frühjahr und Extremen im Sommer (Abbildung 9). Das stellt zahlreiche Landnutzungen vor große Herausforderungen. Die Analyse macht deutlich, dass zunehmend extreme Niederschlagsereignisse oder das Ausbleiben von Niederschlag die Situation charakterisieren.

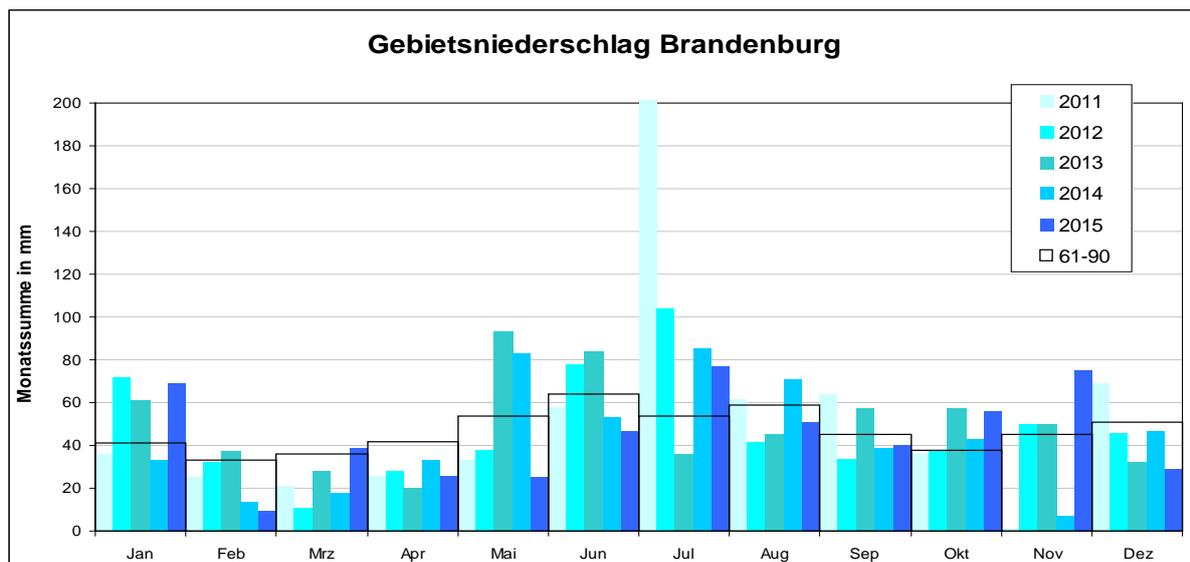


Abb. 9: Gebietsniederschlag Brandenburg im Zeitraum 2011-15 im Vergleich zum Tricennium 1961-90 (Göritz, LfU-W14)

Besonders auffällig sind die geringen Niederschläge der letzten Jahre in den Monaten Februar bis April. Diese liegen deutlich unter dem Durchschnittswert der Referenz- bzw. Klimanormalperiode 1961-1990, welche an sich schon ein niederschlagsarmes Tricennium darstellt. Die hohe Niederschlagsvariabilität im Juli verdeutlicht, dass eine tendenzielle Abnahme der Sommerniederschläge nicht gleichzusetzen ist mit der Annahme, dass jeder Sommer geringere Niederschläge zu verzeichnen hat.

Das Jahr 2011 weist nicht nur geringe Frühjahrsniederschläge und einen Spitzenwert im Juli auf, sondern auch das Ausbleiben von Niederschlag im November. Trotz dieser Spezifika für einzelne Monate ist das Jahr 2011 bezogen auf den Jahresniederschlag mit 632 mm das Feuchteste der letzten fünf Jahre.

### **3.2 Ausgangslage und Methodik**

Für die Anpassung an den Klimawandel sind besonders das Auftreten und die Abfolge von Extremereignissen (z.B. Trockenperioden und Starkniederschlag) von Interesse. Letztere werden aber methodisch bedingt nur unzureichend an den Niederschlagsstationen erfasst, da die Zentren des meist kleinräumigen Starkniederschlags i.d.R. nicht mit den Niederschlagsmessstellen identisch sind. Das bedeutet, dass die Aussagen in den Abbildungen 10 und 11 lediglich Anhaltspunkte über die Anzahl der Ereignisse, nicht aber über ihre eigentliche Intensität geben können. Diese ist aber der entscheidende Faktor für die Anpassungsleistung diverser Akteure (z.B. Abwasserwirtschaft, Landwirtschaft).

Mithilfe von Wetterradardaten lassen sich Starkniederschlagsereignisse detaillierter beschreiben. Da sie nicht wie die Klima- und Wetterstationen nur punktuelle Messungen durchführen, sondern flächenhafte, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Ergebnisse liefern, lassen sich genauere Rückschlüsse auf die Ausbreitung und Intensität eines solchen Ereignisses ziehen. Wetterradarsysteme senden elektromagnetische Strahlung in die Atmosphäre aus und diese wird von sich in der Atmosphäre befindlichen Wassertropfen zurückgeworfen. Aus der Intensität des zum Sender zurück gestreuten Signals lässt sich die Art und Menge des Niederschlags sowie aus der Übertragungszeit die Entfernung zwischen der Radarstation und dem Niederschlagsereignis ableiten.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt in Deutschland ein Radarmessnetz mit 17 Radarstationen. Für Brandenburg ist die Station in Prötzel maßgebend. Zudem gibt es noch Überschneidungen mit den Radarstationen in Dresden, Rostock und Ummendorf.

Die Radarbilder liefern recht genau Auskunft darüber, wo sich das Zentrum eines Starkniederschlagsereignisses befand. Zudem kann mithilfe der Radarbilder die zeitliche Entwicklung eines Starkniederschlags verfolgt werden, da es sich meist um sehr kurze aber dafür umso intensivere Ereignisse handelt.

Für diese Auswertung wurde nicht mit den primären Reflektivitätsdaten gearbeitet, sondern mit Radolan-Daten (Radar-Online-Aneichung). Hierfür werden die Radarmessungen mit Niederschlagswerten von Bodenmessstationen angeeicht, sodass ein zusammengefügt Produkt aus beiden entsteht. Somit kann der tatsächlich gefallene Niederschlag ermittelt werden. Es ergeben sich Stundenwerte für Niederschlagshöhen in Deutschland mit einer Auflösung von 1 km × 1 km. Die angeeichten stündlichen Radarmessungen werden RW-Produkt (Abbildung 12) genannt und aufsummiert über 24 Stunden ergibt sich das SF-Produkt (Abbildung 13). Alle nachfolgenden Auswertungen zu Thema Starkniederschlag wurden im Rahmen einer Praktikumsarbeit im LfU erstellt (Sieg, B. 2015).

### **3.3 Darstellung ausgewählter Starkregenereignisse**

An den 12 ausgewählten Klima- und Wetterstationen des Deutschen Wetterdiensts in Brandenburg wurden in den Jahren 2013 und 2014 73 Niederschlagsereignisse mit mehr als 20 mm/d verzeichnet (Abbildung 10). Der Schwellenwert zur Vorsortierung wurde bewusst abweichend zu anderen Festsetzungen auf 20 mm/d gesetzt, da in Brandenburg mit durchschnittlich 550-580 mm Jahresniederschlag vergleichsweise wenig Niederschlag fällt, denn jedes dieser „gemessenen“ Ereignisse ist ein Indiz dafür, dass sich im Umfeld der jeweiligen Station ein Starkniederschlag mit mehr als 25 mm/d ereignet hat. Das entspricht fünf oder mehr Prozent der Jahresniederschlagsmenge je Ereignis.

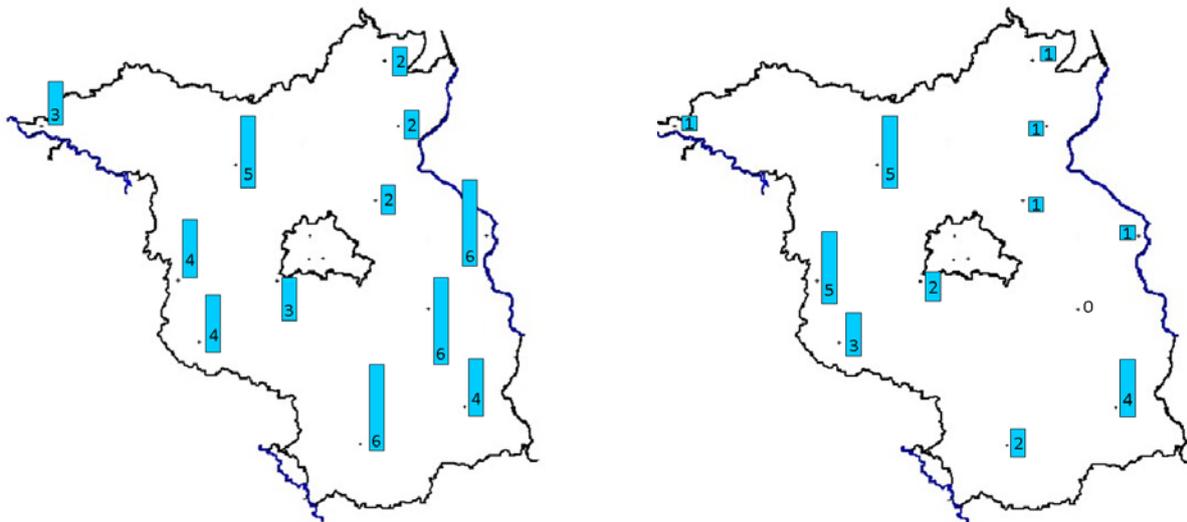


Abb. 10: Erfasste Starkniederschlagsereignisse ab 20 mm/d in den Jahren 2013 (links) und 2014 (rechts).

Die Abbildung 11 zeigt, welche Bedeutung diese Starkniederschläge in Brandenburg bereits heute haben. Im Zeitraum 2013-2014 sind an den Stationen zwischen 9 und 30 % der jährlichen Niederschläge bei Starkniederschlagsereignissen gefallen. Über das Zentrum und die Maximalmenge je Niederschlagsereignis geben diese Daten keine Auskunft.

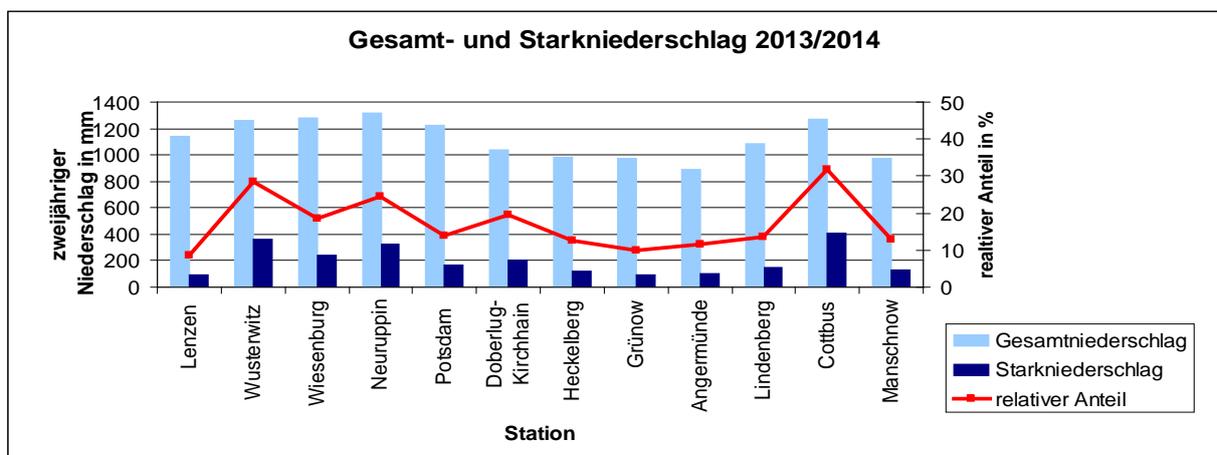


Abb. 11: Gesamt- und Starkniederschlag der Jahre 2013 und 2014 .

Die detaillierte Analyse der Ereignisse zeigt weiterhin, dass sich diese Starkniederschläge auf die Monate Mai bis August konzentrieren und nur in Ausnahmefällen im September oder Oktober stattfinden.

Anhand der Starkregenereignisse des 20.06.2013 und 28.07.2014, die deutschlandweit für sehr große Regenmengen gesorgt haben, sollen die Möglichkeiten der detaillierten Auswertung mithilfe von Radaraufnahmen gezeigt werden.

### 20.06.2013

Am 20.06.13 war besonders der Westen Brandenburgs von heftigen Starkniederschlägen geprägt. Wie auf dem SF-Produkt (Abbildung 13) zu erkennen ist, hat es rund um die Station Wusterwitz mehr als 100mm Niederschlag gegeben. An der Station selber wurde mit 73 mm ebenfalls ein sehr hoher Wert gemessen. In diesem Fall stimmt auch der vom Radolan ergebende Wert gut mit dem der Station überein. Es gab zwei Zentren des

Starkniederschlags, der vermutlich innerhalb eines Gewitters gefallen ist: nordöstlich und südwestlich der Station in Wusterwitz. Auch in der Ostprignitz und Prignitz, sowie ganz im Süden Brandenburgs gab es an diesem Tag schwere Starkniederschläge. Auch dort sind bis zu 90 mm Regen an diesem Tag gefallen. Neben Wusterwitz wurde auch an den Stationen Doberlug-Kirchhain, Lindenberg, Manschnow, Neuruppin und Wiesenburg ein Starkniederschlag verzeichnet. Die Gewitter zogen an diesem Nachmittagstag von Südwesten herein, wie die RW-Produkte (Abbildung 12) zeigen. Es sollte dabei beachtet werden, dass die Skala in Abbildung 13 ein höheres Niederschlagspektrum abdeckt, als in der Abbildung 12.

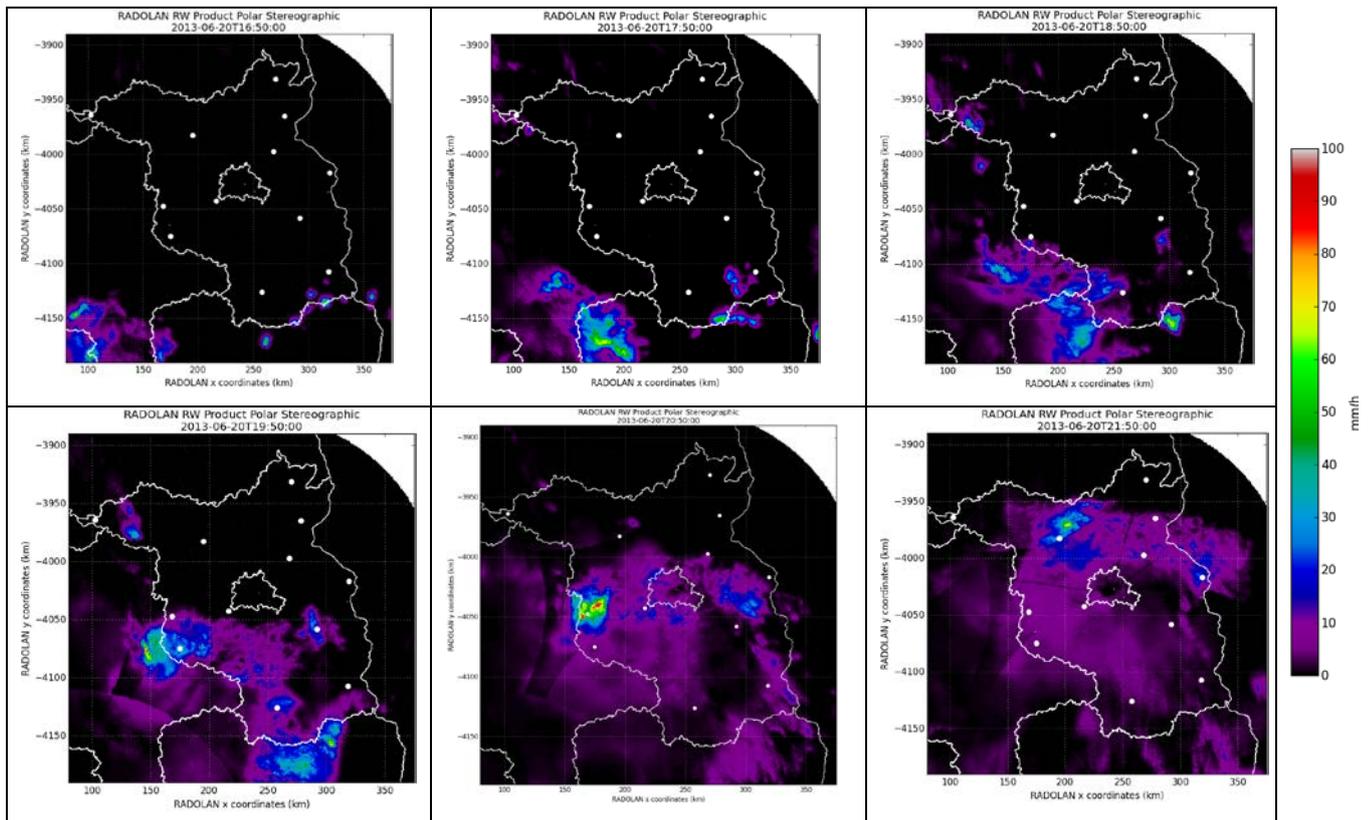


Abb. 12: RW-Produkte des 20.06.13.

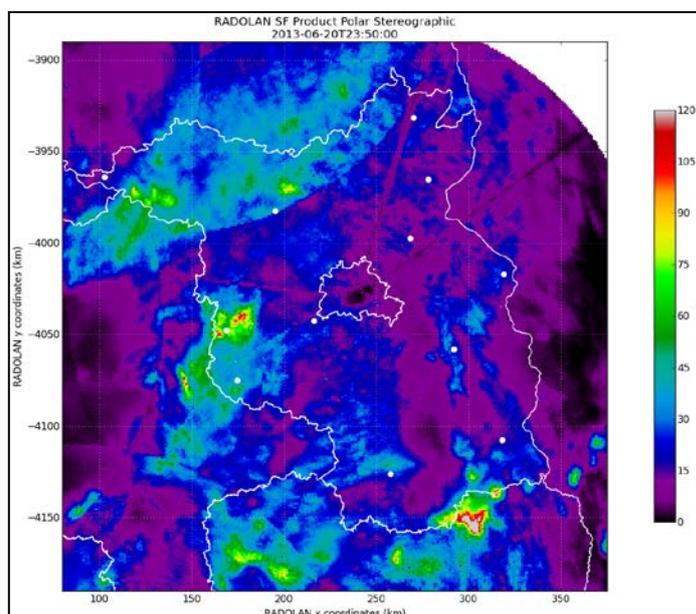


Abb. 13: SF-Produkt des 20.06.13.

29.07.2014

Ein weiteres, bedeutendes Starkniederschlagsereignis erfolgte am 29.07.2014 (Abbildung 14 und 15). An diesem Tag gab es mehrere kleinere Gewitterzellen, die mit hohen Intensitäten über Brandenburg gezogen sind. Dabei war der Westen stärker betroffen als der Osten Brandenburgs. Bei den Stationen wurden in Potsdam und erneut in Neuruppin jeweils ein Starkniederschlag verzeichnet. In Potsdam betrug der gemessene Wert knapp 50 mm. Dass über Potsdam ein Zentrum des Starkniederschlags lag, wird auf dem SF-Produkt ersichtlich (Abbildung 15). Auch bei den RW-Produkten ist zu erkennen, wie sich lokal und zeitlich sehr begrenzte Niederschläge gebildet haben, welche aber eine hohe Intensität von bis zu über 50 mm/h hatten.

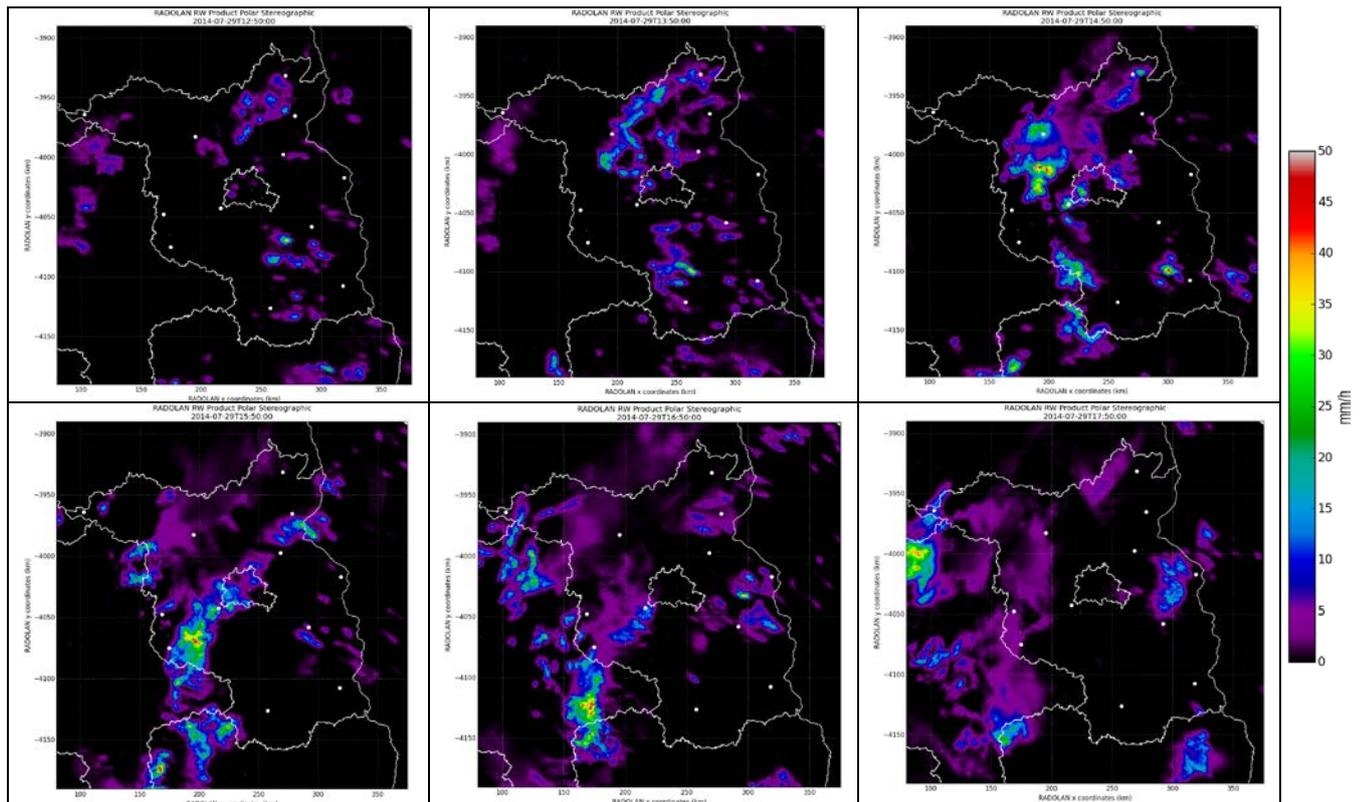


Abb. 14: RW-Produkt des 29.07.14

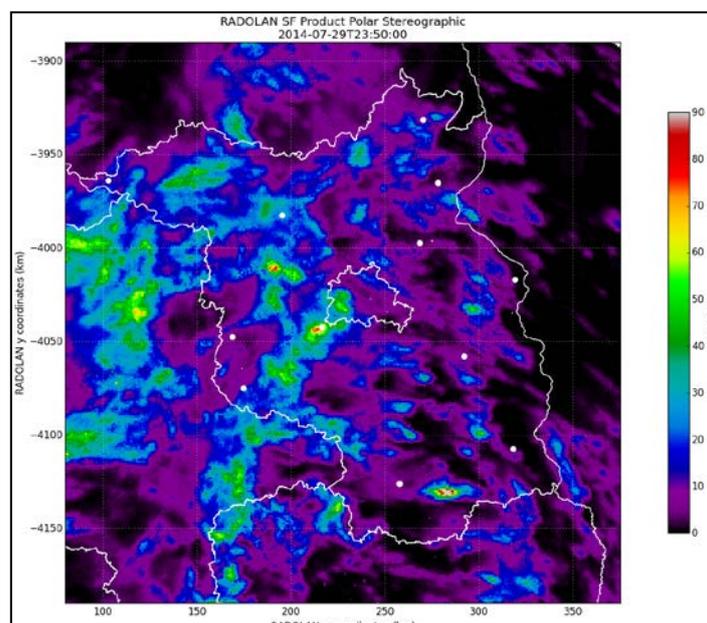


Abb. 15: SF-Produkt des 29.07.14

### 3.4 Zwischenfazit

Die Tendenzen der vergangenen Temperaturentwicklungen zeigen deutliche Zunahmen der Minimal-, Mittel- und Maximaljahrestemperatur bis in die heutige Zeit. Die Jahresniederschlagsentwicklung zeigt ein weniger einheitliches Bild. Bei der Betrachtung der Jahreszeiten wird ersichtlich, dass die Winter- und Frühlingsmonate tendenziell feuchter, die Sommermonate bis zum Ende des 20. Jahrhunderts dagegen trockener wurden. Aktuell sind feuchte Sommer und die anhaltende Frühjahrstrockenheit festzustellen. Seit 2009 gibt es ein Niederschlagsdefizit im Vor- und Vollfrühling (Februar-April), also zu Beginn der Vegetationsperiode. Dennoch zeigt die Variabilität der Niederschläge, dass lokal hohe Niederschlagssummen trotz zunehmender Hitze und Trockenheit typisch für die Sommermonate sind. Die hohen Temperaturen, starke Sonneneinstrahlung und hohe absolute Luftfeuchtigkeit bewirken Gewitterereignisse, die häufig von konvektiven Starkniederschlägen begleitet werden.

Die Kombination dieser Parameter zeigt mögliche Risiken bei einer Verschärfung der Situation in Zukunft auf. Kaum Veränderungen der jährlichen Niederschlagssummen, zunehmende Starkniederschlagsereignisse und ein starker Anstieg der Temperaturen lassen vermuten, dass künftige Sommer von Hitze und längeren Dürrephasen zwischen einzelnen Niederschlagsereignissen geprägt sein werden und auch das Risiko für lokale Überschwemmungen stark zunehmen werden.

Die Auswirkungen des Klimawandels werden voraussichtlich durch Extremereignisse besonders spürbar werden. Nach Betrachtung der Vergangenheit und der Gegenwart, steht im Folgenden nun die zukünftige Veränderung des Klimas bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Fokus. Anhand ausgewählter Klimaelemente soll mithilfe der Klimamodellierung die möglichen Auswirkungen auf das verstärkte oder verminderte Auftreten von Starkniederschläge, Hitzeperioden und Feuchteperioden untersucht werden.

## 4. Entwicklung ausgewählter Klimaextreme zum Ende des 21. Jahrhunderts

Für die regionalen Folgen des Klimawandels sind neben dem allgemeinen Verständnis für das sich wandelnde Klima und den mittleren Trends der Änderung einzelner Klimaelemente, vor allem die möglichen Veränderungen von Extremereignissen wie Hitzeperioden, Starkniederschlägen, Hochwasserereignissen und Stürmen von Bedeutung.

Diese Ereignisse sind von hoher gesellschaftlicher und ökonomischer Relevanz. Sie können zu Naturkatastrophen mit erheblichen Schäden und dem Verlust von Menschenleben führen. Die hiesigen Katastrophen der letzten Jahre wie die zahlreichen „Jahrhunderthochwasser“ an der Oder (1997, 2010) und an der Elbe (2002, 2010, 2013), der europäische Hitzesommer 2003 oder die Orkane Lothar (1999) und Kyrill (2007) sind nur einige Beispiele. Alle nachfolgenden Auswertungen zu den Klimaextremen wurden im Wesentlichen im Rahmen einer vom LfU betreuten Praktikumsarbeit erstellt (Dorfner, M. 2015).

### 4.1 Methodik

Es existiert keine einheitliche Definition für Extreme der einzelnen Klimaelemente. Grundsätzlich lassen sich aber zwei Ansätze unterscheiden:

1. die Erreichung oder Überschreitung eines bestimmten (Grenz-)Wertes,
2. die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses.

Der erste Ansatz bezieht sich auf die Überschreitung eines definierten absoluten Grenzwertes. So kann ein heißer Tag dadurch definiert werden, dass die Maximumtemperatur über 30 °C liegt. Mit dieser Methode werden zahlreiche Kerntage definiert (z.B. Heißer Tag, Tropische Nacht, Eistag...). Für diese Definition spricht die einfache Handhabung. Der Nachteil liegt jedoch darin, dass die Beurteilung des Kerntages global unterschiedlich ausfällt. Das Auftreten von heißen Tagen hat in Skandinavien einen anderen Stellenwert als ein heißer Tag im Mittelmeerraum. Die Eintrittswahrscheinlichkeit arbeitet dagegen mit relativen Werten und passt sich dadurch den jeweiligen klimatischen Gegebenheiten an.

Bei dem zweiten Ansatz geht es um die statistische Häufigkeit von definierten Werten in einem bestimmten Zeitraum. So kann ein Extremereignis, z.B. eine bestimmte hohe Menge Niederschlag an einem Tag, dadurch definiert werden, dass es einmal in 100 oder einmal in 10 Jahren auftritt. Eine andere Möglichkeit ist die Bestimmung des prozentualen Anteils. So ließen sich die Tage, an denen 5% der höchsten Niederschläge eines Jahres vorkommen, als „heftiger Starkniederschlag“ definieren. Man benutzt hier auch den Ausdruck Perzentil. Heftige Starkniederschläge liegen dann über dem 95%-Perzentil des Jahresniederschlages. Zur Charakterisierung eines Extremereignisses sind aber nicht nur die Häufigkeit des Eintretens, sondern auch die Andauer des Ereignisses relevant. Ein Wetterextrem kann sich in wenigen Stunden (z.B. heftiger Starkniederschlag) oder bis zu einigen Wochen (z.B. Dürre) ereignen.

#### 4.1.1 Ensemblebildung

Als Darstellungsform für die Untersuchung wurde das Ensemble gewählt. Hier werden mehrere Klimamodelle zusammen hinsichtlich des jeweiligen Klimaelementes untersucht, so dass das Ergebnis aller Modellläufe in einem Bild dargestellt wird. Hierdurch ist es möglich, eine Gruppe von Klimamodellsimulationen gleichzeitig zu betrachten und somit die Gesamtrendenz aller Modelle in einem Bild zu visualisieren. Je besser alle Modelle miteinander übereinstimmen, desto wahrscheinlicher ist das Eintreten dieser Entwicklung. Andersherum sinkt die Wahrscheinlichkeit, wenn die Projektionen aller Modelle stark zueinander variieren.

Mithilfe von Ensemble-Darstellungen in der Klimamodellierung soll verhindert werden, dass Fehler und Unsicherheiten einzelner Modelle die Projektionen verfälschen. Auch wenn keines der verwendeten Modelle einzeln als „richtig“ oder „falsch“ betrachtet werden kann, besitzen einige Modelle nachgewiesenermaßen einige Schwachstellen, die sich mit der beobachteten Realität nicht decken. Einige Modelle projizieren die Zukunft im Vergleich zu anderen Modellen als „zu feucht“ oder „zu trocken“.

Bei der Kopplung möglichst vieler Modelle und dem Vergleich dieser Modelle miteinander, ergibt sich eine Gesamttendenz. Je mehr Ensemblemitglieder hierbei zum Einsatz kommen, desto eher können Unsicherheiten und Unterschiede der Modelliererergebnisse bewertet werden (Jacob et al., 2012, S.11).

Für diese Arbeit wird ein Multimodell-Multiszenario-Ensemble verwendet. Dies bedeutet, dass verschiedene Modelle und Szenarien innerhalb eines Ensembles genutzt werden. Damit ist es möglich, die Projektionen der SRES-Szenarien um die RCP-Szenarien zu erweitern. Die grundsätzliche Empfehlung der Leitlinien des Bund-Länder-Fachgesprächs zur Interpretation von regionalen Klimamodellen geht dahin, nur Multi-Modell-Ensembles, also einheitliche Szenarien als gemeinsames Merkmal, zu verwenden.

Die Emissionsszenarien SRES (Special Report on Emissions Scenarios), sind im Zuge des dritten IPCC-Berichtes im Jahre 2000 entwickelt worden und liefern 40 verschiedene Szenarien unter der Annahme verschiedenster zukünftiger Entwicklungen der menschlichen Gesellschaft, der Technologien, des Bevölkerungswachstums, der Entwicklung der Ökonomie und dem Einsatz fossiler oder nicht fossiler Energieträger (IPCC, 2000, S.4). Die 40 möglichen Entwicklungspfade können in vier Familien („storylines“) unterteilt werden: A1, A2, B1 und B2, wobei das Szenario A1 in drei Unterkategorien aufgeteilt wird (Treber, 2008).

Representative Concentration Pathways (RCP), also repräsentative Konzentrationspfade, beschreiben „die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre“ bezüglich ihres Strahlungsantriebes in Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ) (Imbery und Plagemann, 2011). Nach diesem Strahlungsantrieb werden die 4 RCP-Szenarienfamilien benannt: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5. RCP2.6 bedeutet beispielhaft einen zusätzlichen Strahlungsantrieb von  $2,6 W/m^2$  bis zum Jahr 2100 verglichen zum vorindustriellen Stand zur Mitte des 19. Jahrhunderts. Das RCP2.6 wird auch als Klimaschutzszenario bezeichnet und ist durch den Anstieg der THG-Emissionen bis 2020 auf 490 ppm sowie einem Rückgang von Treibhausgas-Emissionen auf null bis 2100 gekennzeichnet. Das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) beschreibt eine Welt, in der die Energieversorgung im Wesentlichen auf der Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte beruht. Die Treibhausgaskonzentration erhöht sich im Szenario RCP8.5 von heute ca. 400 auf über 1370 ppm  $CO_2$ -Äquivalent bis zum Jahr 2100.

Für die Ergebnispräsentation wird das Interaktive Diagnosetool (IDP) der Firma Climate & Environment Consulting GmbH Potsdam (CEC) genutzt. Es werden zwei Darstellungsformen verwendet. Jedes entstandene Bild zeigt sowohl die mittlere, minimale und maximale Spannweite der Werte auf und ist in der Ensemble-Darstellung mit a), c) und d) bezeichnet. Zudem werden in den Abbildungen die Bänder der Häufigkeiten dargestellt, um die unterschiedlichen Modellausprägungen aufzuzeigen. Diese Darstellung ist in der oberen rechten Ecke abgebildet (Abbildung 16, Kreienkamp und Spekat, 2013, S. 118f.). Die Bänder zeigen die gesamte Spannweite der Werte der zwölf Modelle an (siehe 4.1.2). Als schwarzer Balken sind die mittleren 50% des Wertebereichs visualisiert. Werte unterhalb des 25- und oberhalb des 75%-Perzentil sind gestrichelt dargestellt. Der rote Strich markiert den Median je Modell. In Abbildung 16 sind beispielhaft die modellierten Ergebnisse für den Projektionszeitraum 2071 – 2100 gegenüber dem Basiszeitraum 1971 – 2000 für den Index Trockentage in Folge (Consecutive Dry Days - CDD) dargestellt. Die Skala zeigt hier

beispielhaft die Abnahme der Trockenheit in blau und die Zunahme der Trockenheit in rot als mittlere Anzahl der Tage im Jahr.

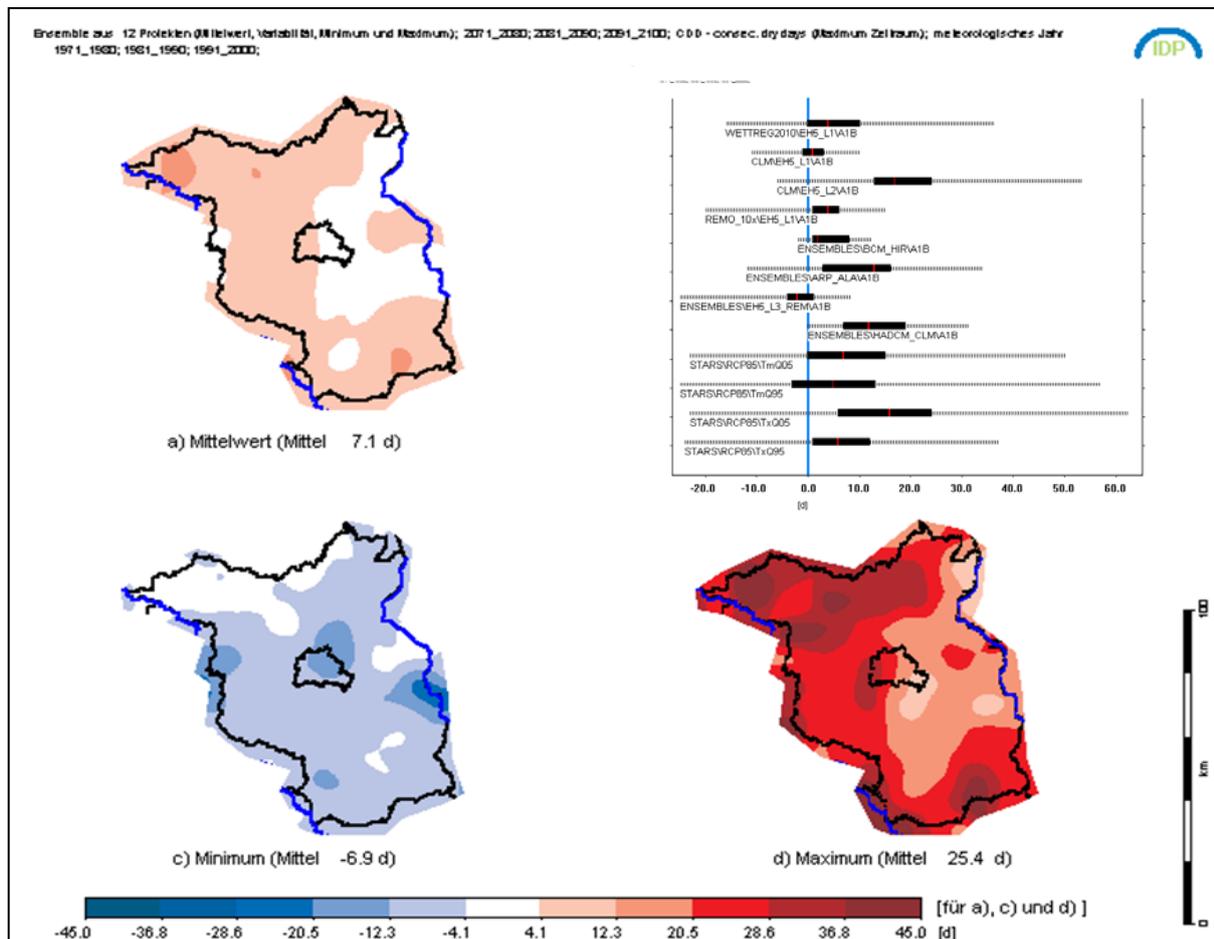


Abb. 16: Beispielabbildung des Änderungssignals des CDD (Anzahl der aufeinander folgenden Trockentage) im Projektionszeitraum 2071- 2100 gegenüber 1971-2000 mit der Darstellung der Mittel- (a), Minimum- (c) und Maximumwerte (d) und der Bänder der Häufigkeiten in der oberen rechten Ecke.

#### 4.1.2 Ausgewählte Modelle

Für die Zusammenstellung des Multimodell-Multiszenario-Ensembles wurden zwölf Regionalmodelle verwendet, von denen acht dem SRES-A1B-Szenario und vier dem RCP8.5-Szenario zuzuordnen sind.

Für die Klimafolgenabschätzung stehen vier deutsche Regionalmodelle zur Verfügung, die von verschiedenen Einrichtungen entwickelt wurden und unterschiedliche Charakteristika aufweisen (WETTREG, CCLM, REMO, STARS). Darüber hinaus werden für die vorliegende Auswertung vier Modellläufe aus dem europäischen ENSEMBLES-Projekt verwendet.

Das ENSEMBLES-Projekt war ein integriertes Forschungsprojekt der Europäischen Union von 2004 – 2009 und hat Projektionen für Europa generiert. Am ENSEMBLES-Projekt waren 66 Institutionen aus 20 Ländern beteiligt (van der Linden und Mitchell, 2009, S. 4).

Die vier deutschen Modelle wurden bereits in vorangegangenen Untersuchungen ausgewertet. Die detaillierten Eigenschaften der Modelle und die Ergebnisse der Auswertungen sind in den LUA-Fachbeiträgen Nr.113 und 115 dokumentiert.<sup>1</sup>

Die stichprobenartig ausgewählten ENSEMBLES-Modelle (siehe Zeile 1-8 in Tabelle 1) setzen sich aus unterschiedlichen GCM (Global Climate Model) und RCM (Regional Climate Model) zusammen. Gemeinsam ist diesen Modellen das A1B-Szenario. STARS hingegen nutzt als Antrieb das RCP8.5-Szenario bzw. die Temperaturentwicklung aus 21 GCM als Eingangsgröße (Tabelle 1).

Szenario	GCM	RCM	Modellkette
SRES-A1B	ECHAM5_L1	Wettreg2010	Wettreg2010/EH5_L1/A1B
SRES-A1B	ECHAM5_L1	CCLM_L1	CLM_L1/EH5_L1/A1B
SRES-A1B	ECHAM5_L1	CCLM_L2	CLM_L2/EH5_L1/A1B
SRES-A1B	ECHAM5_L1	REMO10x	REMO10x/EH5_L1/A1B
SRES-A1B	BCM	HIRHAM	ENSEMBLES_BCM_HIR
SRES-A1B	ARPEGE	ALADIN	ENSEMBLES_ARP_ALA
SRES-A1B	ECHAM5_L3	REMO	ENSEMBLES_EH5_L3_REM
SRES-A1B	HadCM	CCLM	ENSEMBLES_HADCM_CLM
RCP8.5	Temperaturentwicklung aus 21 GCM	STARS TmQ05	STARSRCP8.5TmQ05
RCP8.5		STARS TmQ95	STARSRCP8.5TmQ95
RCP8.5		STARS TxQ05	STARSRCP8.5TxQ05
RCP8.5		STARS TxQ95	STARSRCP8.5TxQ95

Tab. 1 Auflistung der verwendeten Modelle und ihrer Szenarien.

Die Modellzusammensetzung soll eine möglichst große Bandbreite aus vielen unterschiedlichen Modellen reflektieren, die sich hinsichtlich ihrer Modellart wie dynamisch oder statistisch, aber auch hinsichtlich ihrer Modellspezifika unterscheiden. Der Tabelle 1 sind alle verwendeten Szenarien, die jeweiligen Globalen Klimamodelle (GCM) und Regionalen Klimamodelle (RCM) sowie die verwendeten Modellketten zu entnehmen. Die Modellkette findet sich als Erläuterung auch in den „Bändern der Häufigkeit“ wieder (siehe Erläuterungen zur Abb.16).

Mit der folgenden Abbildung 17 soll verdeutlicht werden, dass verschiedenste Modelle in die Ensemble-Darstellung mit einfließen. Diese besitzen ganz unterschiedlich hohe Auflösungen, errechnen sich teilweise aus Stations-, größtenteils jedoch aus Rasterdaten.

In der vergleichenden Abbildung werden die Modellergebnisse für die mittlere Temperatur im Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt. Neben den unterschiedlichen Flächencharakteristika werden durch die einheitlichen Farb- und Werteskala auch die leicht unterschiedlichen quantitativen Ergebnisse der Reanalyse ersichtlich. STARS (Bildmitte) hingegen nutzt für die verschiedenen Realisierungen im betrachteten Zeitraum Beobachtungsdaten.

<sup>1</sup> <http://www.lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.296662.de>

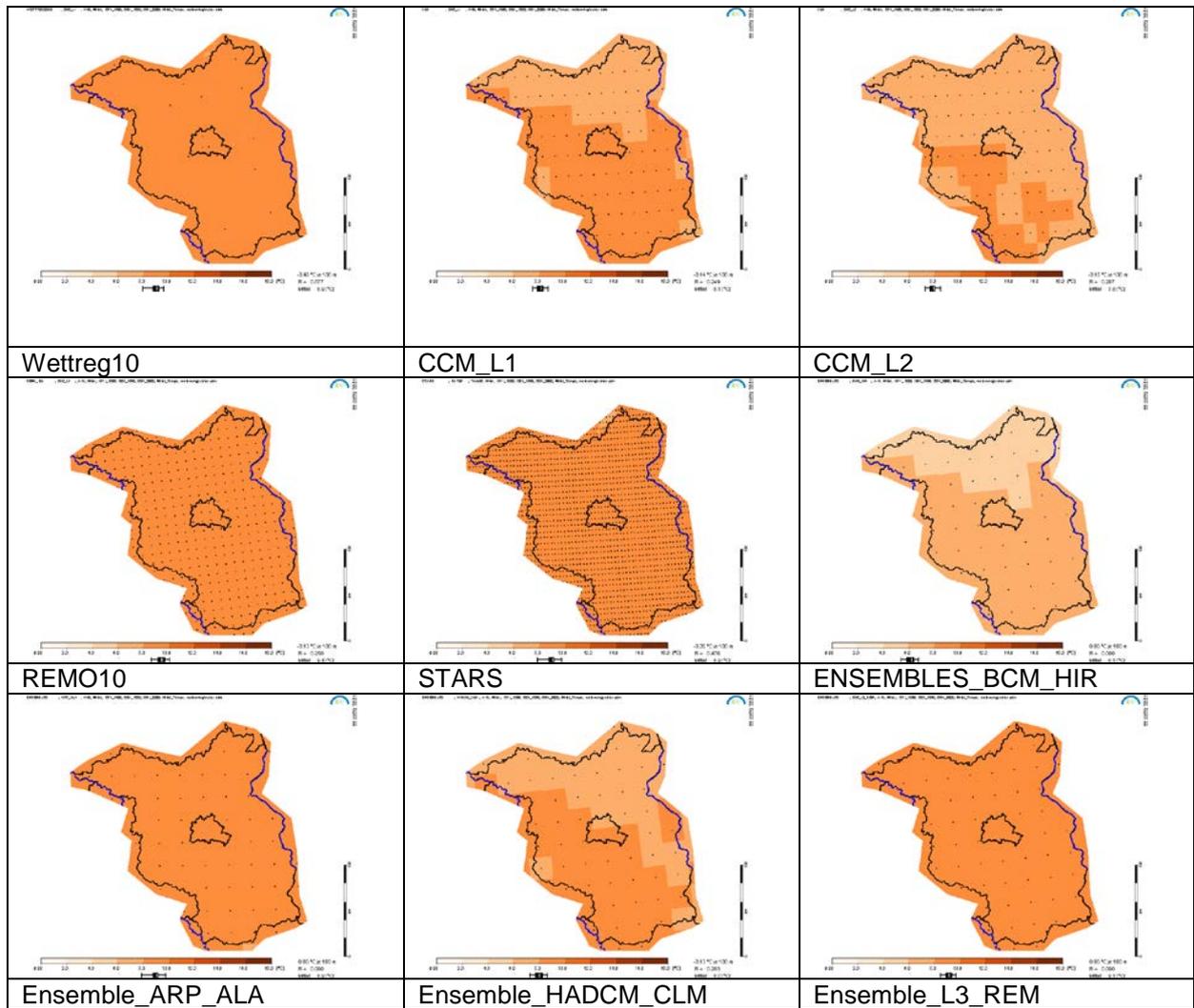


Abb. 17: Vergleich aller verwendeten Modelle bezüglich der errechneten mittleren Temperatur im Zeitraum 1971 – 2000 (Ausnahme: STARS verwendet Beobachtungsdaten für diesen Zeitraum)

### **4.1.3 Ausgewählte Indizes**

Als Extremwetterparameter sind folgende acht Indizes ausgewählt worden: vier Feuchte-, zwei Trockenheits- und zwei Hitzeindikatoren. Alle Angaben für die folgenden Klimaextremparameter stammen aus dem Indizes Dictionary (European Climate Assessment & Dataset, Stand: 02.06.2016).

#### **1-Tages-Niederschläge (RX1)**

Der Index für die höchsten 1-Tages-Niederschläge gibt die maximale Niederschlagsmenge an, die an einem Tag in einem betrachteten Zeitraum gefallen ist. Dieser Wert gilt als der maximale Höchstwert im betrachteten Zeitraum. Die Einheit wird in Millimeter (mm) angegeben.

#### **5-Tages-Niederschläge (RX5)**

Die 5-Tages-Niederschläge weisen den höchsten Niederschlag innerhalb eines 5-Tages-Intervalls des Betrachtungszeitraums als Maximalwert aus. Die Einheit wird in mm angegeben.

#### **Starkniederschläge Total (R90thTOT)**

Der Starkniederschlagsindex R90thTOT beschreibt die Niederschlagssumme, die oberhalb des 90%-Perzentils gefallen ist. Die Angabe erfolgt in mm.

#### **Aufeinander folgende Niederschlagstage (CWD)**

Der Index CWD (Consecutive Wet Days), also aufeinander folgende Niederschlagstage, beschreibt einen Zeitraum, in dem an jedem Tag eine Mindestniederschlagsmenge von 1 mm in 24 Stunden gefallen ist. Die Angabe erfolgt in Tagen (d).

#### **Aufeinander folgende Trockentage (CDD)**

Der Index CDD (Consecutive Dry Days), also die Anzahl aufeinander folgender Trockentage, beschreibt einen Zeitraum, in dem an keinem Tag, die Niederschlagsmenge von 1 mm in 24 Stunden überschritten wird. Diese Tage werden als Trockentage bezeichnet. Die Angabe erfolgt in Tagen (d).

### **Trockenperioden (DP)**

Der Index für die Trockenperioden gibt die mittlere Anzahl von Trockenperioden im Jahr an. Eine Trockenperiode wird definiert als Zeitraum von mindestens elf Tagen in Folge ohne Niederschlag. Die Angabe für diesen Index erfolgt als Perioden pro Jahr (1/a).

### **Hitzetage ( $TX \geq 30^\circ \text{ C}$ )**

Der Hitzeparameter  $TX \geq 30^\circ \text{ C}$  zeigt die mittlere Anzahl der Tage im Jahr mit einem Überschreiten der  $30^\circ \text{ C}$ -Grenze innerhalb von 24 Stunden auf. Die Angabe erfolgt als Tage pro Jahr (d/a).

### **Tropennächte ( $TN \geq 20^\circ \text{ C}$ )**

Der Hitzeparameter  $TN \geq 20^\circ \text{ C}$  zeigt die mittlere Anzahl der Tage im Jahr mit einer Tagesminimumtemperatur  $\geq 20^\circ \text{ C}$ . Die Angabe erfolgt als d/a.

#### **4.1.4 Betrachtete Zeiträume**

Für Klimadatenauswertungen kann und sollte die Klimanormalperiode 1961 – 1990 als Basiszeitraum herangezogen (Paeth, 2007, S.44). Hier wird jedoch als Basiszeitraum der 30-jährige Zeitraum von 1971 – 2000 verwendet, da für diesen Zeitraum eine höhere Datendichte vorhanden ist.

Als Projektionszeitraum wird dem folgend der 30-Jahres-Zeitraum von 2071 – 2100 als Ende des 21. Jahrhunderts gewählt. Dadurch ist ein Vergleich der hundertjährigen Entwicklung möglich.

## 4.2 Datenauswertung

Der Tabelle 2 sind alle Bezeichnungen der verwendeten Indizes, der verwendeten Skalierung, Einheit und jeweiligen Farbskala zu entnehmen. Die Farbskala wurde so gewählt, dass blau für eine Darstellung von Feuchte oder für den Projektionszeitraum eine Zunahme von Feuchte darstellt. Rot und orange zeigen jeweils eine Abnahme von Feuchte bzw. eine Zunahme von Trockenheit. Rosa- und Lilatöne beziehen sich auf die Zunahme von Hitze.

Zunächst erfolgt eine Untersuchung der ausgewählten Parameter bezogen auf das kalendarische Jahr. Anschließend werden die Niederschlagsindikatoren zusätzlich auf Unterschiede zwischen den meteorologischen Jahreszeiten Sommer und Winter analysiert.

Parameter	Skalierung BZ	Einheit BZ/PJ	Farbskala BZ	Skalierung PJ	Farbskala PJ
<b>RX1</b>	0 – 280	mm	weiß-dunkelblau	-180; 180	rot-weiß-blau
<b>RX5</b>	0 – 280	mm	weiß-dunkelblau	-180; 180	rot-weiß-blau
<b>R90thTOT</b>	0 – 70	mm	weiß-dunkelblau	-18; 18	rot-weiß-blau
<b>CWD</b>	0 – 81	d	weiß-dunkelblau	-45; 45	rot-weiß-blau
<b>CDD</b>	0 – 81	d	weiß-orange	-45; 45	blau-weiß-rot
<b>DP</b>	0 – 9	1/a	weiß-orange	-9; 9	blau-weiß-rot
<b>TX ≥ 30° C</b>	0 – 35	d/a	weiß-rosa	0 – 35	weiß-rosa
<b>TN ≥ 20° C</b>	0 – 35	d/a	weiß-lila	0 – 35	weiß-blaulila

Tab. 2 Abkürzungen für alle verwendeten Parameter, Skalierungen und Farbskalen für den Basiszeitraum (BZ) und den Projektionszeitraum (PJ), eigene Darstellung.

## 4.2.1 Meteorologisches Jahr

### 1-Tages-Niederschläge (RX1)

Die Werte für den Index RX1 variieren zwischen 51,5 mm als Minimum und 132,2 mm als Maximum. Im Mittel betragen die durchschnittlichen 1-Tages-Niederschläge in der Summe 83,7 mm (Abbildung 18).

Im Mittel wird im Projektionszeitraum eher eine leichte Abnahme der 1-Tages-Niederschläge projiziert. Die Werte variieren hier jedoch sehr stark zwischen einer deutlichen Abnahme von -58,5 mm und einer starken Zunahme von 70,9 mm. Als Gesamttendenz aller Ensemblemitglieder wird eine leichte Abnahme der 1-Tages-Niederschläge von 3,5 mm dargestellt (Abbildung 19).

Der gemeinsame Trend aller Modelle zusammen zeigt eher eine leichte Abnahme, wobei besonders die RCP8.5-Szenarien eine trockene Zukunft darstellen. Die A1B-Szenarien projizieren deutlich feuchter.

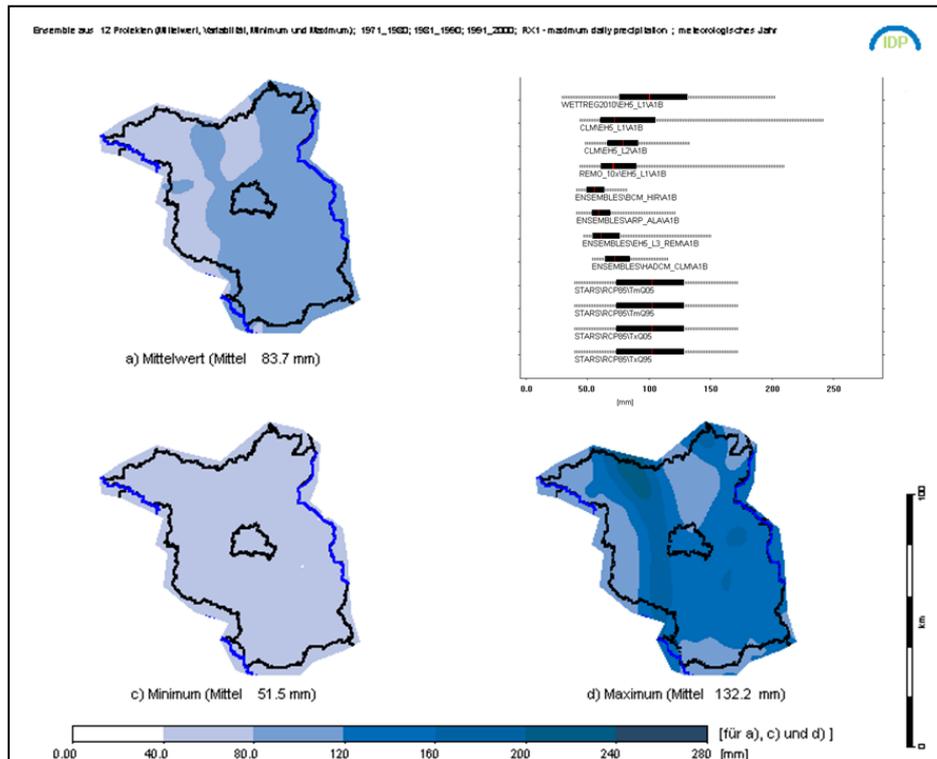


Abb. 18: 1-Tages-Niederschläge im Basiszeitraum 1971 – 2000.

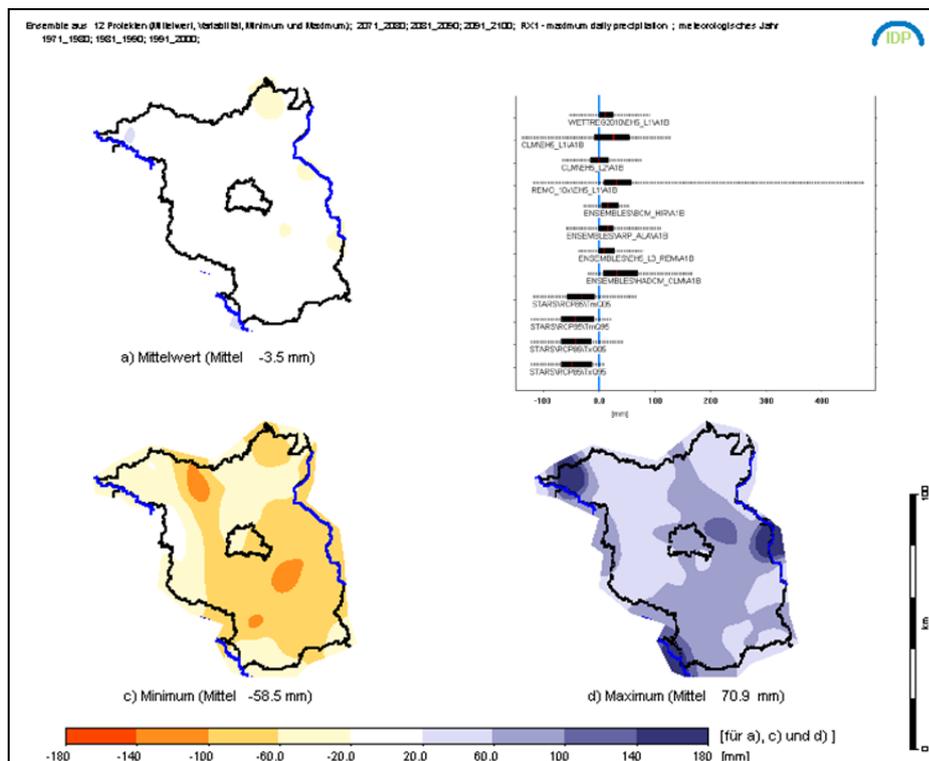


Abb. 19: Änderung der 1-Tages-Niederschläge zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

### **5-Tages-Niederschläge (RX5)**

Für den **Basiszeitraum** variieren die Werte der 5-Tages-Niederschläge zwischen 79,5 und 161,3 mm. Im Mittel liegt die Summe der modellierten 5-Tages-Niederschläge bei 112,4 mm (Abbildung 20).

Für den Projektionszeitraum ist eine starke Spannweite der Werte zwischen Minimum und Maximum zu erkennen. Als Minimum wird eine Abnahme der 5-Tages-Niederschläge um 61,8 mm projiziert. Die Höchstwerte weisen eine Zunahme um 82,5 mm auf. Im Mittel wird eine nur leichte Zunahme der 5-Tages-Niederschläge um 1,6 mm modelliert (Abbildung 21).

Die Modellergebnisse zeigen für den Projektionszeitraum starke Schwankungen zwischen den einzelnen Modellen auf. Hier modellieren die RCP8.5-Szenarien am trockensten, während die A1B-Szenarien feuchtere Verhältnisse aufzeigen.

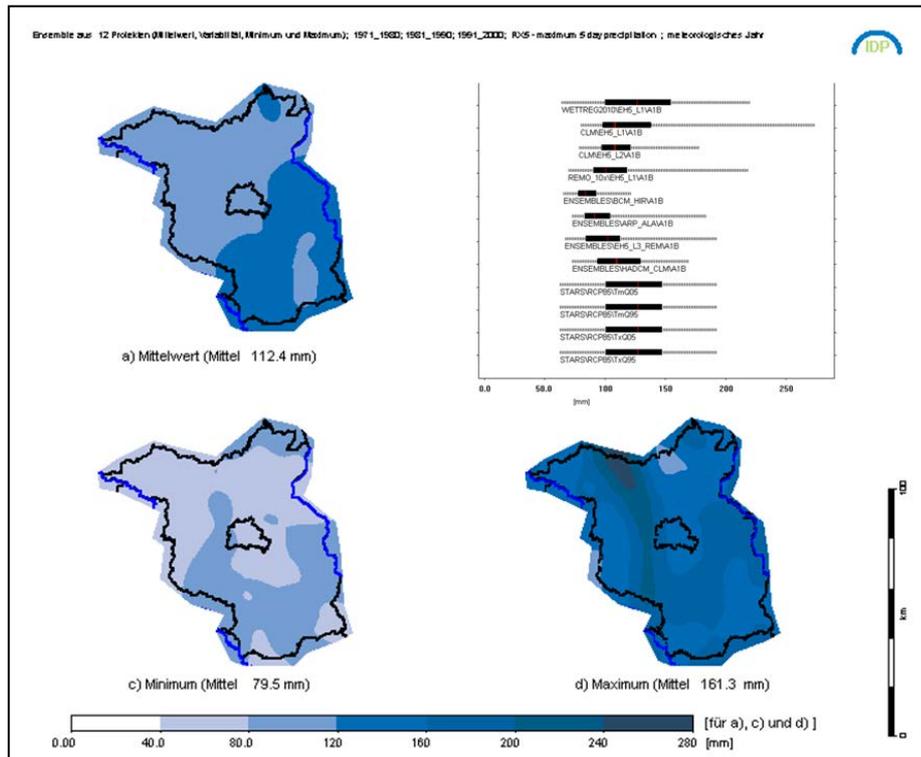


Abb. 20: 5-Tages-Niederschläge im Basiszeitraum 1971 – 2000.

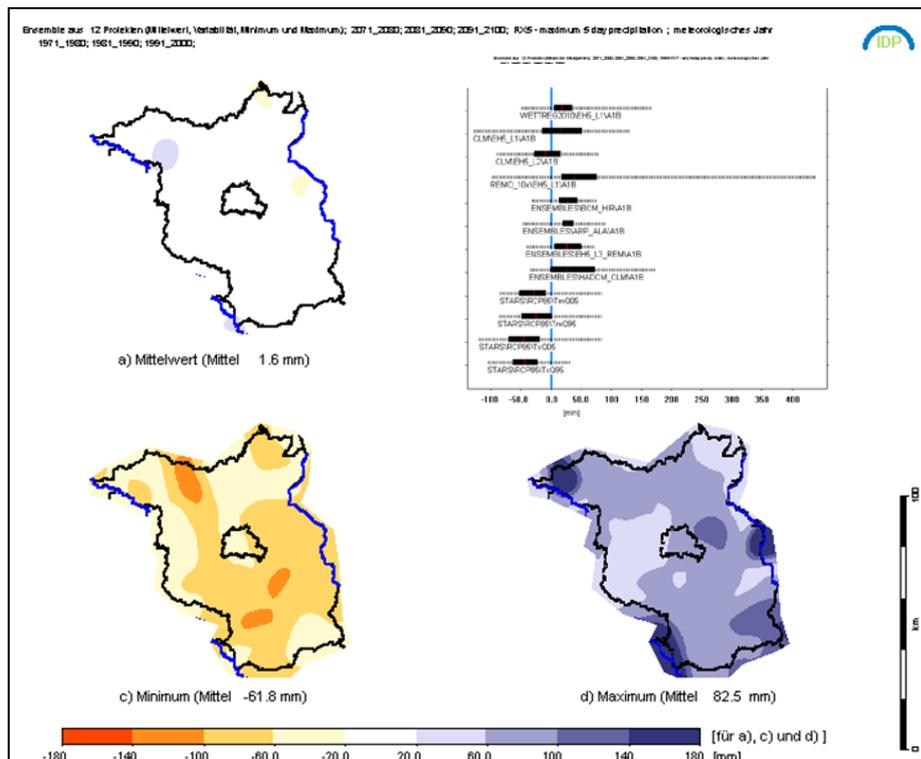


Abb. 21 : Änderung der 5-Tages-Niederschläge zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

### **Starkniederschläge Total (R90th TOT)**

Die Werte für die Summe der Starkniederschläge variieren für den Basiszeitraum nur leicht zwischen 29,1 mm bis 32,4 mm. Im Mittel werden 31,0 mm Starkniederschlagsmengen projiziert. In der Darstellung der Bänder der Häufigkeiten liegen alle Werte sehr nahe beieinander (Abbildung 22).

Die Starkniederschlagswerte für den Projektionszeitraum liegen eng beieinander. Hier liegt die Spannweite der Werte bei einer Abnahme um 2,0 mm bis zu einer Zunahme um 7,0 mm. Im Mittel wird eine Zunahme um 2,7 mm erwartet (Abbildung 23).

Die RCP-Szenarien modellieren hierbei etwas trockener als die A1B-SRES-Szenarien. Der Gesamttrend aller Modelle zeigt jedoch nur schwache Veränderungen der totalen Starkniederschläge im Projektionszeitraum.

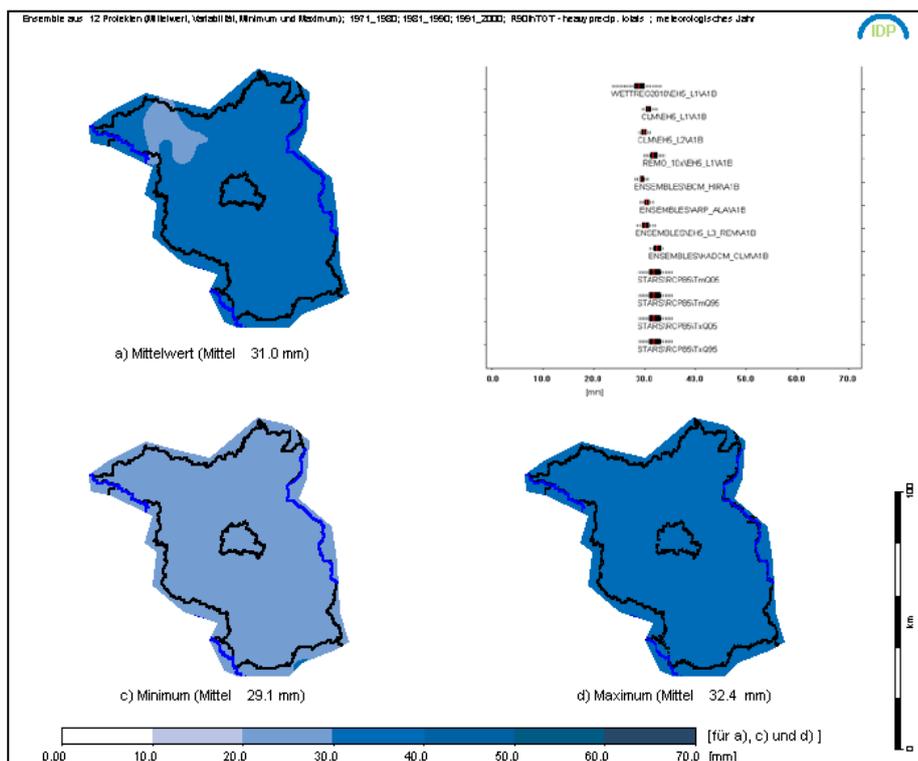


Abb. 22: Starkniederschläge Total im Basiszeitraum 1971 – 2000.

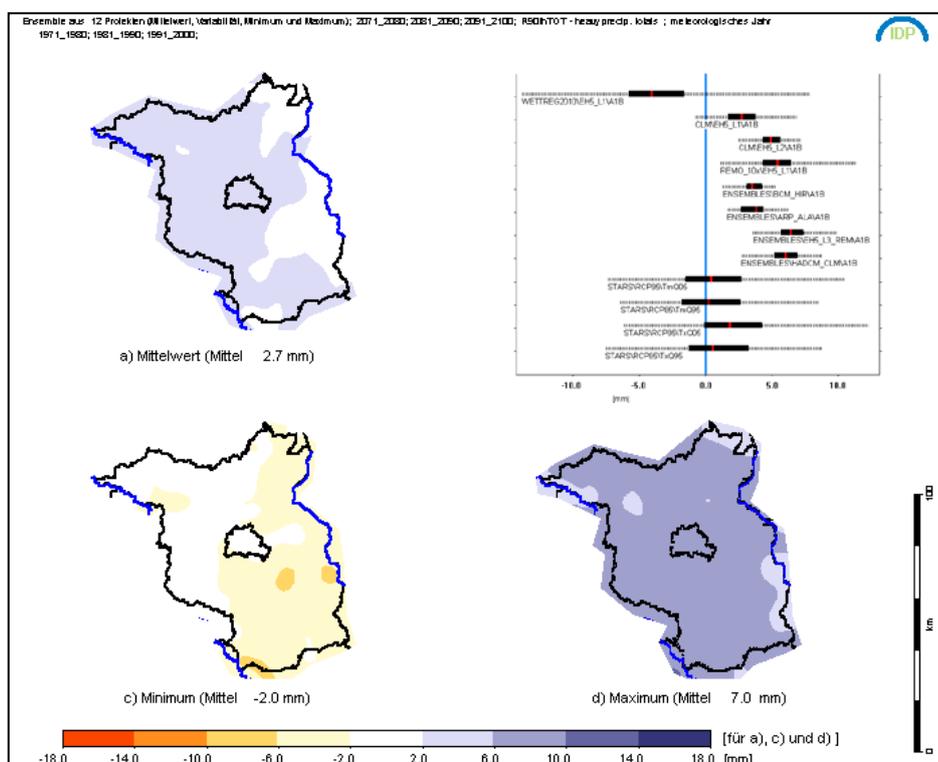


Abb. 23: Änderung der Starkniederschläge Total zwischen 1971- 2000 und 2071 – 2100.

### **Anzahl aufeinander folgender Niederschlagstage (CWD)**

Für die Anzahl aufeinander folgender Niederschlagstage werden als Spannweite der Werte im Basiszeitraum 11,6 bis 27,3 Tage modelliert. Im Mittel werden 15,9 Tage in Folge, an denen es mindestens 1 mm Niederschlag gab, dargestellt (Abbildung 24).

Für den Projektionszeitraum wird im Mittel kaum eine Veränderung, nur eine leichte Zunahme um 0,2 Tage der aufeinander folgenden Niederschlagstage dargestellt. Die Bandbreite der Werte schwankt hierbei jedoch wieder recht stark zwischen einer Abnahme um 5,4 Tage bis hin zu einer Zunahme von 7,7 Tagen (Abbildung 25).

Alle Modelle modellieren sehr ähnlich geringe Veränderungen für die Anzahl aufeinander folgender Niederschlagstage.

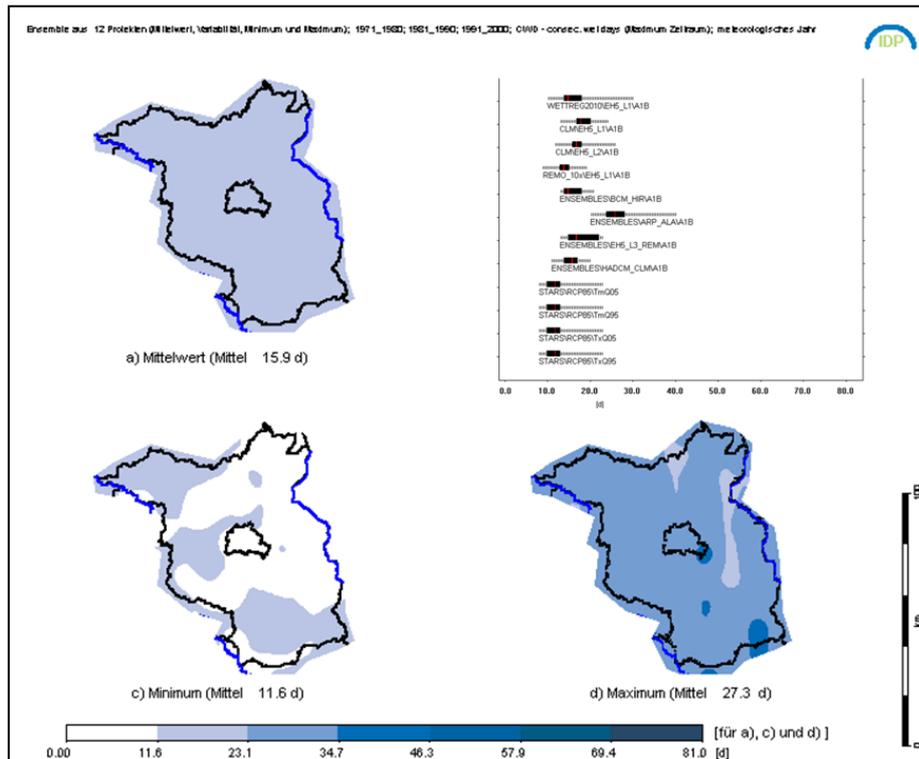


Abb. 24: Anzahl der Niederschlagstage in Folge im Basiszeitraum 1971 – 2000.

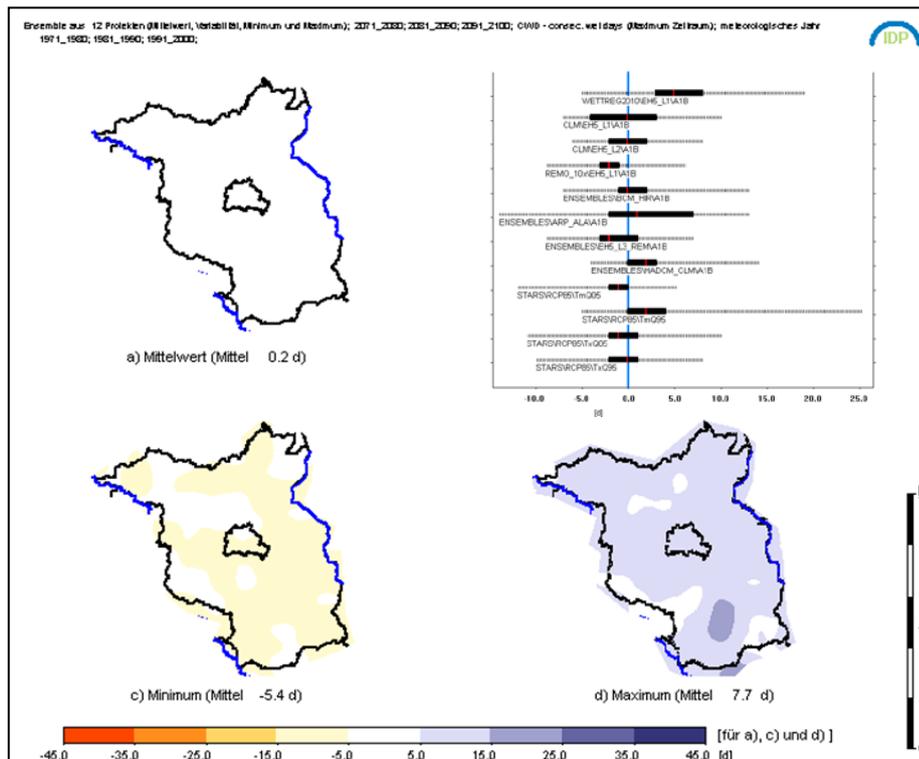


Abb. 25: Änderung der Anzahl der Niederschlagstage in Folge zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

### **Anzahl aufeinander folgender Trockentage (CDD)**

Für die Vergangenheit wird eine Spannweite der Anzahl aufeinander folgender Trockentage von 25,6 bis 49,5 Tagen modelliert. Im Mittel folgen 38 Tage aufeinander, an denen kein Niederschlag oder eine Niederschlagsmenge unter 1 mm gefallen ist (Abbildung 26).

Für den Projektionszeitraum wird eine deutliche Zunahme der Anzahl aufeinander folgender Trockentage im Mittel von 7,1 Tagen projiziert. Die Werte variieren hier zwischen einer Abnahme der aufeinander folgenden Trockentage um 6,9, bis zu einer sehr starken Zunahme von 25,4 Tagen (Abbildung 27).

Für die Anzahl aufeinander folgender Trockentage liegen die Modellergebnisse alle in einem ähnlichen Bereich, sodass eine Zunahme der Trockenheitsphasen als gemeinsamer Trend erkennbar wird.

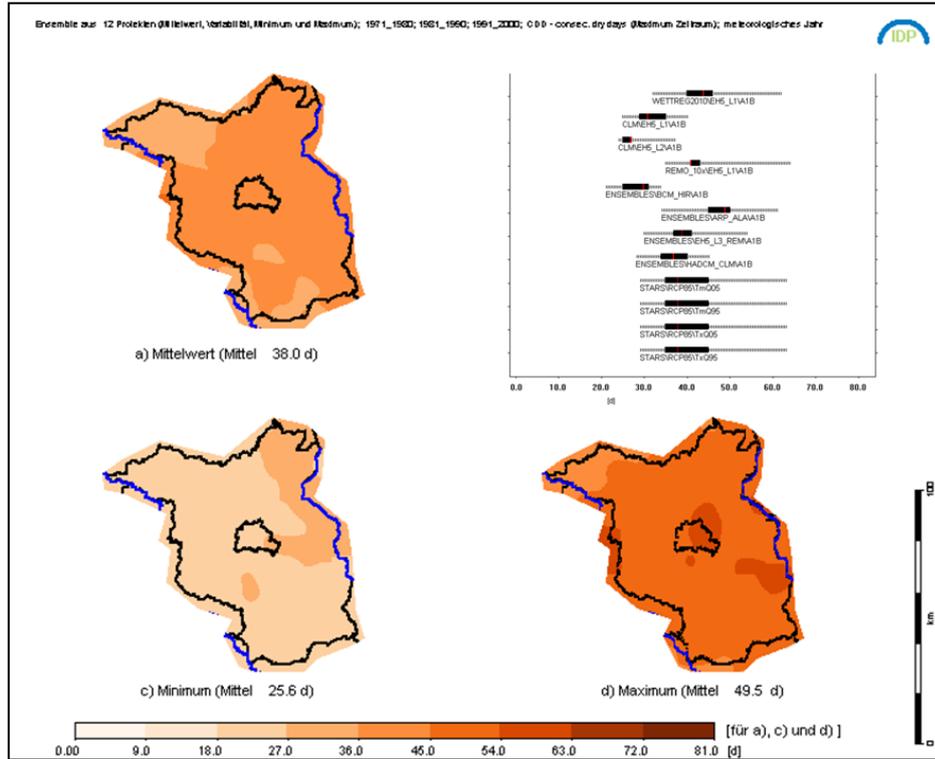


Abb. 26: Anzahl der Trockentage in Folge im Basiszeitraum 1971 – 2000.

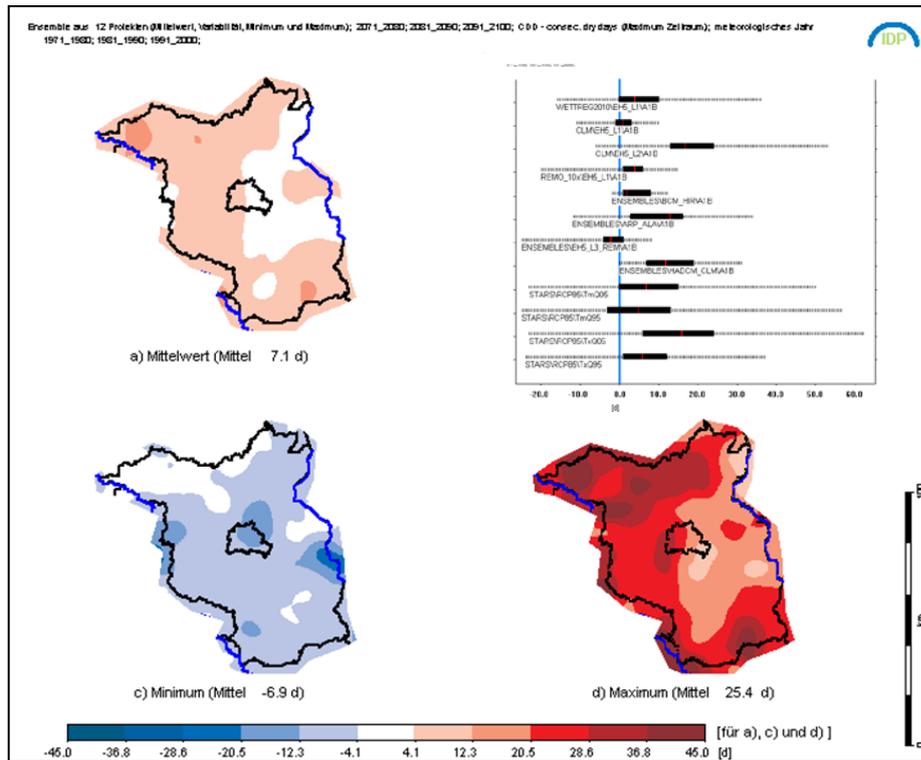


Abb. 27: Änderung der Anzahl der Trockentage in Folge zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

### **Trockenperioden mit einer Mindestlänge von elf Tagen**

Für den Basiszeitraum wird für die Vergangenheit eine mittlere Anzahl von 4,1 Trockenperioden im Jahr dargestellt. Hierbei variieren die Werte zwischen 1,6 bis zu 5,8 Trockenperioden pro Jahr (Abbildung 28).

Für das Auftreten von Trockenperioden im Projektionszeitraum wird eine leichte Abnahme von 0,8, bis zu einer Zunahme von 1,7 Trockenperioden im Jahr projiziert. Im Mittel wird eine leichte Zunahme von 0,4 Trockenperioden im Jahr dargestellt (Abbildung 29).

Für diesen Trockenheitsindex liegen alle Modellergebnisse nahe beieinander, sodass als gemeinsamer Trend von einer leichten Zunahme der jährlich auftretenden Trockenperioden zu erkennen ist.

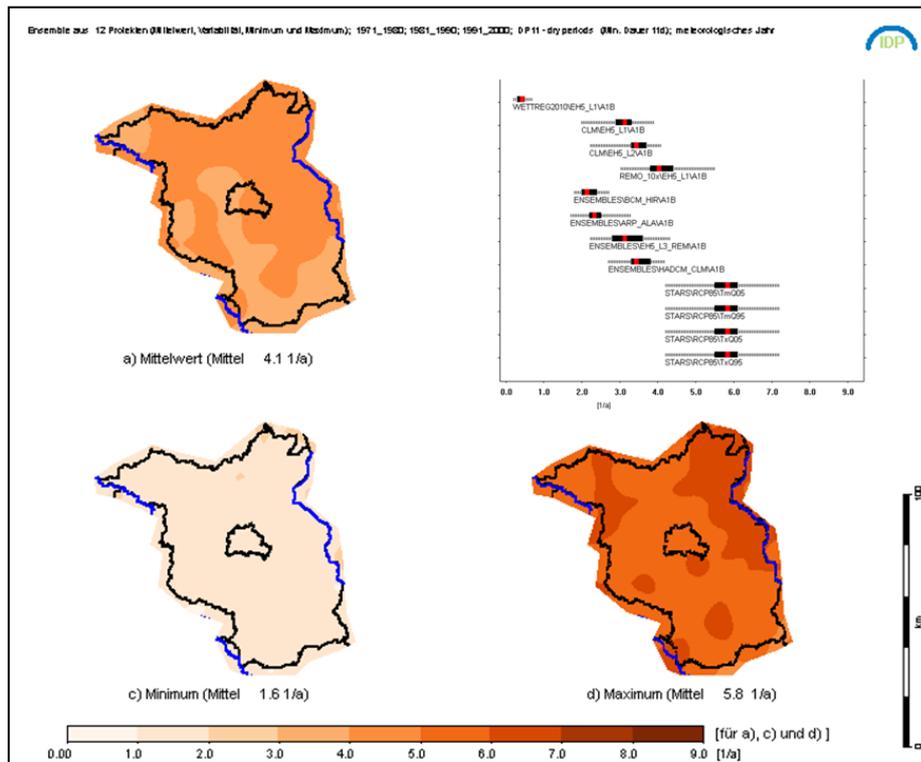


Abb. 28: Anzahl der Trockenperioden pro Jahr im Basiszeitraum 1971 – 2000.

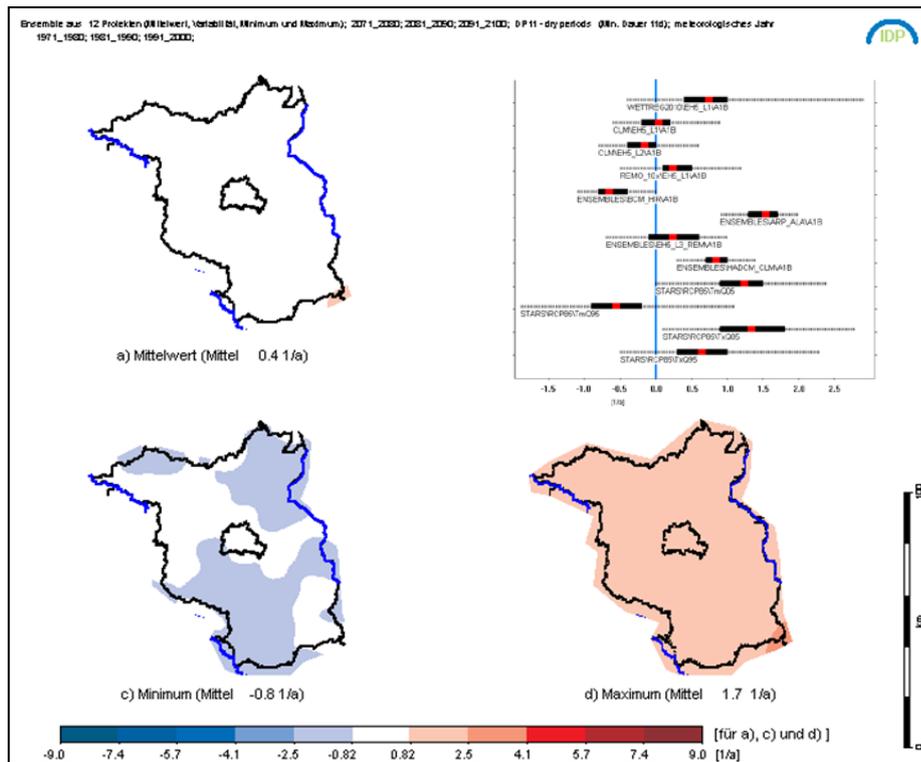


Abb. 29: Änderung der Anzahl der Trockenperioden im Jahr zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

## Hitzetage ( $TX \geq 30^\circ \text{ C}$ )

Im Basiszeitraum wird eine Anzahl von Hitzetagen im Mittel zwischen 0,2 Tagen bis zu 13 Tagen dargestellt. Im Mittel werden 5,6 Tage pro Jahr mit Temperaturen über  $30^\circ \text{ C}$  für den Basiszeitraum projiziert. Zehn von zwölf Modellen liegen hierbei auch nah beieinander, nur zwei Läufe des Ensemble-Projektes zeigen hier höhere Werte an (Abbildung 30).

Für den Projektionszeitraum wird von einer minimalen Zunahme der Hitzetage im Jahr von 1,6 bis zu einer enormen Zunahme um 32,2 Tage im Jahr ausgegangen. Im Mittel werden 14,3 Tage mehr im Jahr mit Temperaturen über  $30^\circ \text{ C}$  modelliert (Abbildung 31).

Die RCP8.5-Szenarien zeigen hier mit Ausnahme des ARP\_ARLA-Laufes des Ensemble-Projektes die höchsten Zunahmewerte auf. Der Großteil der A1B-SRES-Szenarien modelliert die Zunahme von Hitzetagen deutlich gemäßiger. Als gemeinsame Aussage wird jedoch weiterhin ein einheitlicher Trend dargestellt.

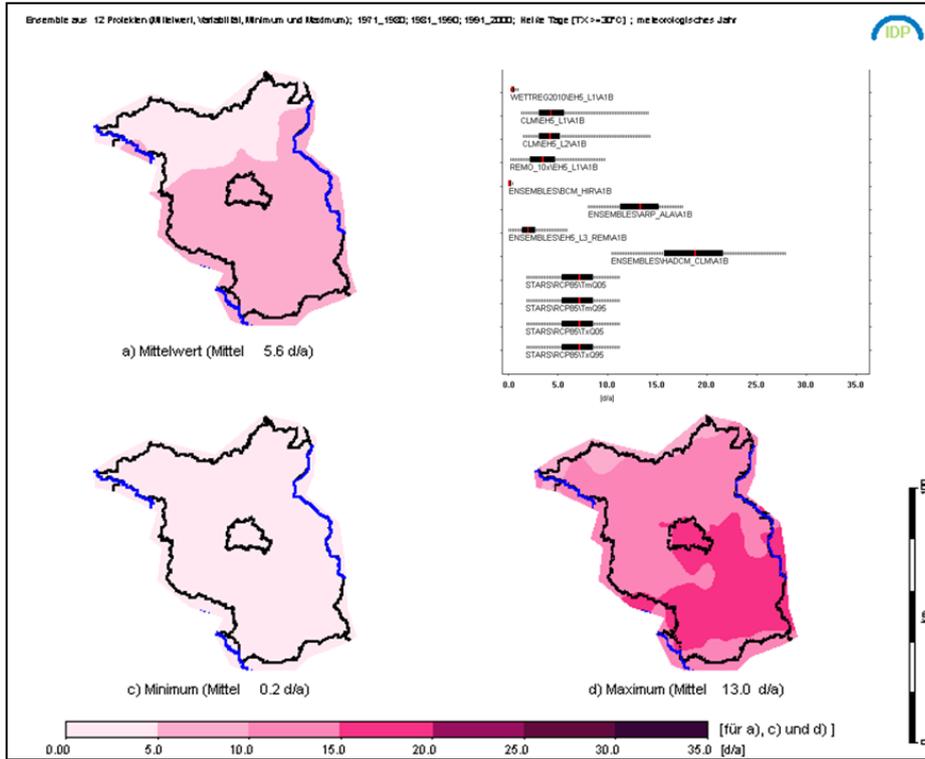


Abb. 30: Anzahl der Hitzetage im Basiszeitraum 1971 – 2000.

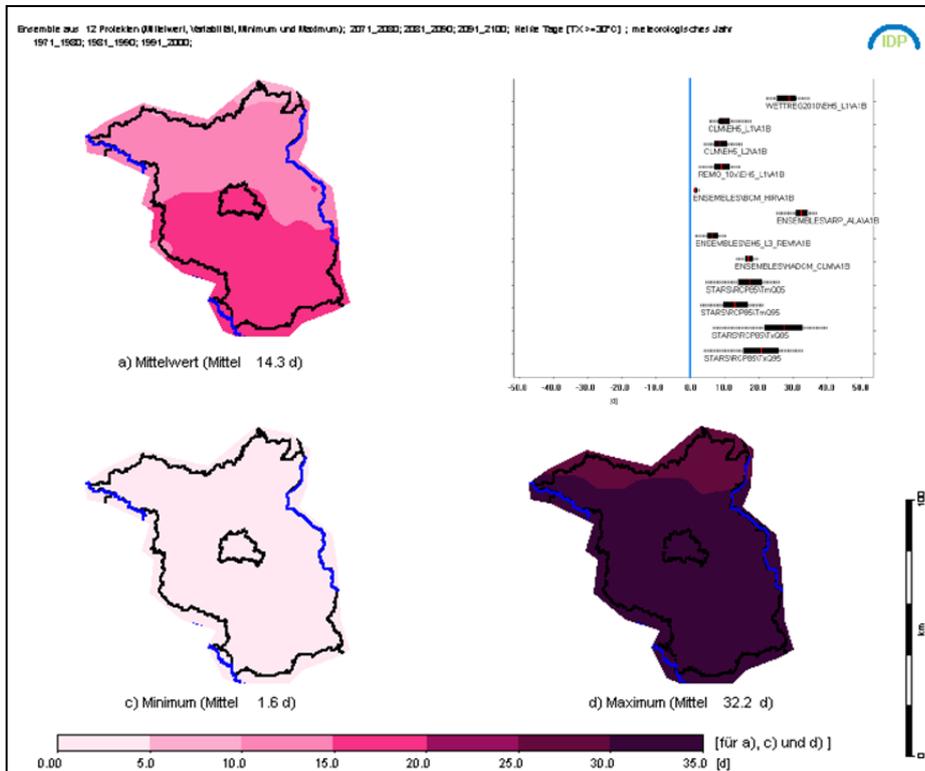


Abb. 31: Änderung der Anzahl der Hitzetage zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

### **Tropennächte ( $TN \geq 20^\circ C$ )**

Die Zahl der Tropennächte liegt für den Basiszeitraum auf niedrigem Niveau, zwischen 0,2 bis maximal 2,4 Nächten pro Jahr. Im Mittel werden 0,6 Nächte mit Nachttemperaturen über  $25^\circ C$  dargestellt (Abbildung 32).

Die Zunahme für den Projektionszeitraum ist deutlich. Als Minimum kann kaum eine Änderung, nur eine sehr geringe Zunahme um 0,1 Tropennächte erkannt werden. Als Maximum wird jedoch eine Zunahme der Tropennächte um 16,6 pro Jahr dargestellt. Im Mittel wird eine Zunahme von 4,2 Nächten im Jahr erwartet (Abbildung 33).

Die RCP8.5-Szenarien projizieren fast keine Veränderung der Anzahl der jährlichen Tropennächte, obwohl eine sehr starke Zunahme für die Hitzetage dargestellt wird. Dies könnte auf eine Modelleigenheit zurückzuführen sein, da – stark vereinfacht - davon auszugehen ist, dass sich bei einer so starken Zunahme der Tage mit Temperaturen über  $30^\circ C$  auch eine, wenn auch vielleicht geringere, Zunahme der Tropennächte ergeben müsste.

Die Tendenz aller Modelle jedoch zeigt eine deutliche Zunahme der Tropennächte.

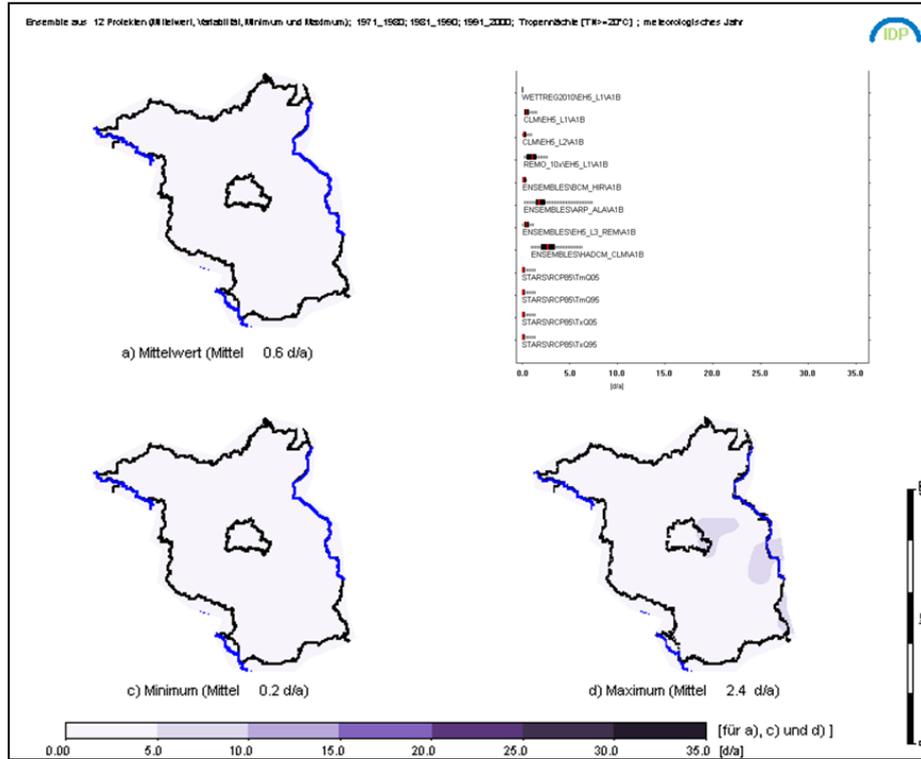


Abb.32: Anzahl der Tropennächte im Jahr im Basiszeitraum 1971 – 2000.

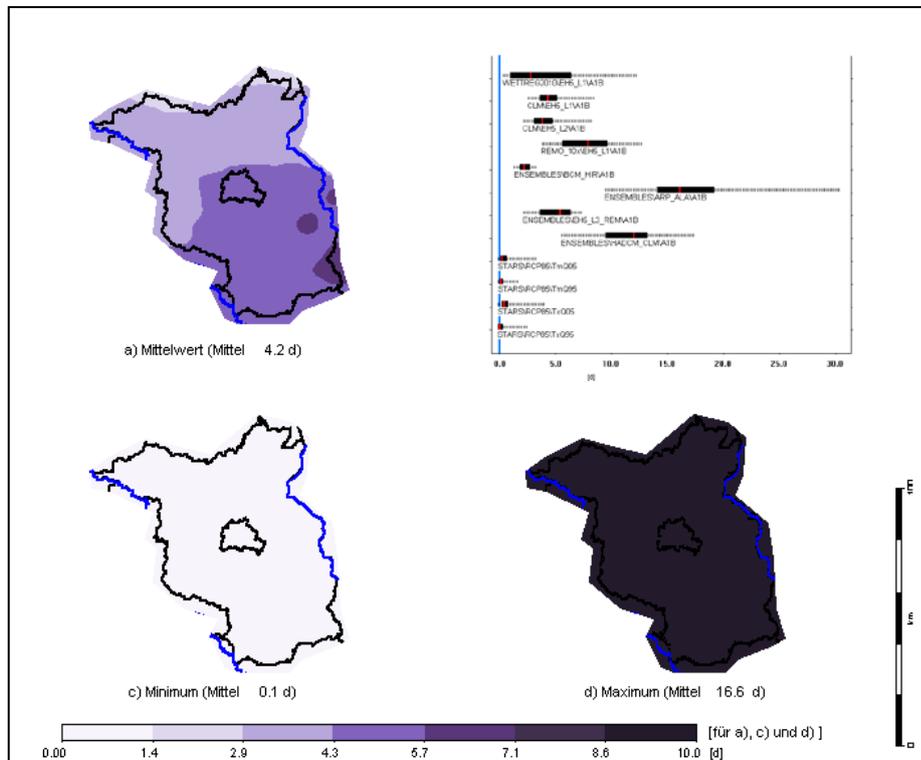


Abb. 33: Änderung der Anzahl der Tropennächte im Jahr zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

#### 4.2.2. Vergleichende Auswertung für das meteorologische Jahr

In Tabelle 3 sind alle Minimum-, Mittel- und Maximalwerte für die vier Feuchte-, die zwei Trockenheits- und die beiden Temperaturindizes im Vergleich vom Basiszeitraum BZ (linke Hälfte) zum Projektionszeitraum PJ (rechte Hälfte) in einer Übersicht dargestellt. Die Werte wurden farblich markiert, um aufzuzeigen, ob und wie stark sich die Parameter im Zuge des Klimawandels verändern. Sie lassen sich unterteilen in „keine/kaum Veränderung“ (hier grün dargestellt), in „Zunahme von Feuchte/ Abnahme von Trockenheit“ (blau), „Zunahme von Trockenheit/ Abnahme von Feuchte“ (rot) und als „Zunahme von Hitze“ (lila).

Für die vergleichende Auswertung werden die Änderungswerte ab 10%-Änderungsrate als signifikant eingestuft.

Index	Ausgangswerte			Änderungssignal			Einheit
	Min BZ	Mittel BZ	Max BZ	Min PJ	Mittel PJ	Max PJ	
RX1	51,5	83,7	132,2	-58,5	-3,5	70,9	mm
RX5	79,5	112,4	1613	-61,8	1,6	82,5	mm
R90thTOT	29,1	31,0	32,4	-2,0	2,7	7,7	mm
CWD	11,6	15,9	27,3	-5,4	0,2	7,7	d
CDD	25,6	38	49,5	-6,9	7,1	25,4	d
DP	1,6	4,1	5,8	-0,8	0,4	1,7	1/a
TX ≥ 30° C	0,2	5,6	13	1,6	14,3	32,2	d/a
TN ≥ 20° C	0,2	0,6	2,4	0,1	4,2	16,6	d/a

	keine / kaum Veränderung ≤ 10%
	Zunahme von Feuchte/ Abnahme von Trockenheit > 10%
	Zunahme von Trockenheit/ Abnahme von Feuchte > 10%
	Zunahme von Hitze > 10%

Tab. 3 Auswertung für Minimal-, Mittel- und Maximalwerte für das meteorologische Jahr für den Basiszeitraum (BZ) und den Projektionszeitraum (PJ).

Eindeutige Aussagen sind bezüglich der Zunahme von **Hitze** möglich. Im Mittel kann sich die Zahl der Hitzetage (TX) im Jahr im Vergleich vom Basiszeitraum zum Projektionszeitraum zum Ende des 21. Jahrhunderts fast verdreifachen, auf etwa 20 Tage im Jahr, die die 30°C-Marke überschreiten. Für die Anzahl der Tropennächte (TN) wird eine Zunahme auf etwa fünf Nächte im Jahr mit Temperaturen über 20° C erwartet.

Ebenfalls zunehmen wird nach den Ergebnissen der Klimamodelle die **Trockenheit**. Zwar ist sowohl eine Abnahme als auch eine Zunahme laut den Modellergebnissen möglich, doch die Gesamtheit der Modelle projiziert eine zunehmende Anzahl von Trockenperioden (DP) mit einer Mindestlänge von elf Tagen ohne Niederschlag um 0,4 auf 4,5 Trockenperioden pro Jahr. Hierbei ist zu beachten, dass eine Trockenperiode auch deutlich länger als elf Tage andauern kann. Dafür muss auch die Anzahl aufeinander folgender Trockenperioden betrachtet werden.

Im Mittel treten bereits heute 38 Tage in Folge ohne Niederschlag auf. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts kann diese Zahl sogar im Mittel auf 45 Tage ansteigen (im Extremfall auf 75 Tage). Dies bedeutet, dass bei einem Anstieg der **Trockentage in Folge** (CDD) und einem gleichzeitigen Anstieg der Anzahl der Trockenperioden das Risiko von Dürre und Wasserknappheit deutlich ansteigt.

Schwieriger hingegen ist die Interpretation der Parameter für extreme **Feuchte**, da hier die Spannweite der Werte sehr groß ist, sodass im Mittel kaum Veränderungen für den Niederschlag zu erkennen sind. Dies bestätigt jedoch, dass die Zu- oder Abnahme für den Jahresniederschlag kaum ausgeprägt ist. Daher ist die Betrachtung der Verteilung der Niederschläge auf die Jahreszeiten von Nöten.

Im Folgenden wird daher für die Niederschlags-Indizes 1-Tages-Niederschläge (RX1), 5-Tages-Niederschläge (RX5), Starkniederschläge Total (R90th TOT) und Anzahl der aufeinander folgenden Niederschlagstage (CWD) eine Unterscheidung für die Jahreszeiten Sommer und Winter und für den Basis- und Projektionszeitraum durchgeführt.

### 4.2.3 Jahreszeitliche Differenzierung für ausgewählte Niederschlagsparameter

#### Anzahl der aufeinander folgenden Niederschlagstage (CWD)

Für den Basiszeitraum variiert die Anzahl der Feuchtetage in Folge zwischen 8,5 und 23,7 Tagen. Im Mittel ist im **Sommer** im Basiszeitraum eine Feuchteperiode mit einer Länge von 12,7 Tagen zu erwarten (Abbildung 34).

Das Ergebnis der Ensembledarstellung zeigt für die Entwicklung der Anzahl aufeinander folgender Niederschlagstage im Projektionszeitraum eine Abnahme von 6,9 Tagen bis hin zu einer leichteren Zunahme von 3,5 Tagen. Im Mittel wird für den Sommer projiziert, dass die Anzahl aufeinander folgender Niederschlagstage um 2,3 Tage annehmen wird (Abbildung 35).

Für die Tage mit Niederschlag in Folge im Sommer liegen alle Modellergebnisse nah beieinander, sodass als gemeinsamer Trend aller Modelle eine deutliche Abnahme erkennbar wird.

Ähnlich sehen die Werte für den Winterzeitraum im Basiszeitraum aus. Hier liegt die Spannweite der Werte zwischen 9,4 und 17,8 Tagen. Im Mittel wird mit 12,6 Niederschlagstagen in Folge gerechnet (Abbildung 36).

Die Entwicklung für den **Winter** ist in etwa umgekehrt. Die Modellierung zeigt eine mögliche Abnahme um 3,5 bis zu einer Zunahme von 7,2 Tagen im Projektionszeitraum. Im Mittel wird für den Winter projiziert, dass mit 1,2 Tagen mehr für Feuchteperioden ausgegangen werden kann (Abbildung 37).

Für die Feuchtetage in Folge im Winter ist ebenfalls als größtenteils einheitlicher Trend eine leichte Verlängerung der Feuchteperioden zu erkennen.

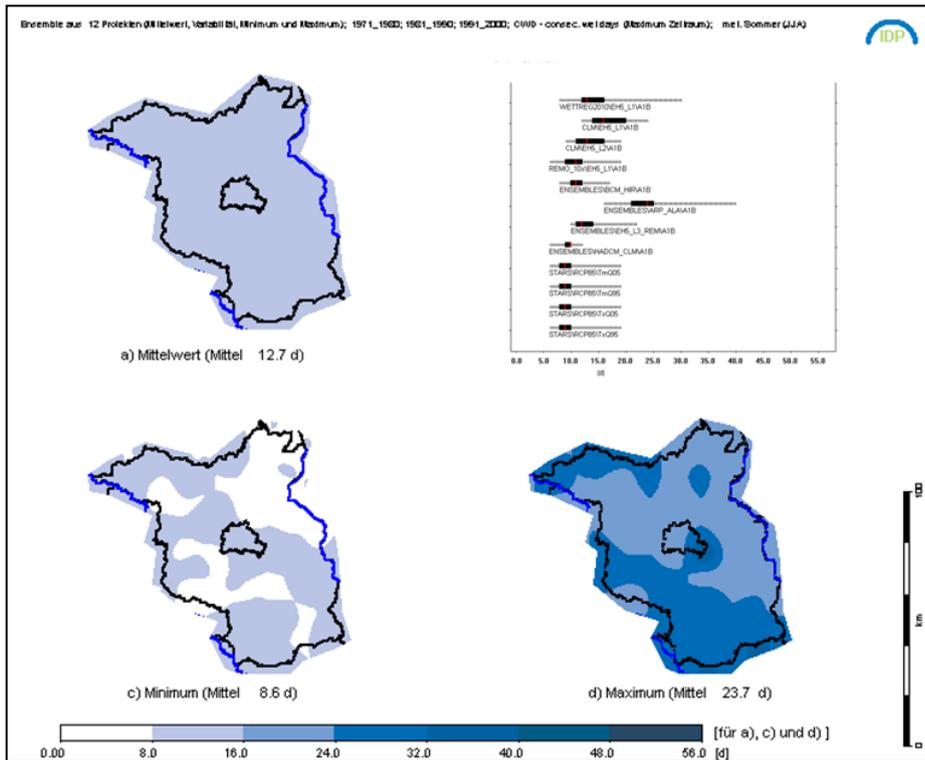


Abb. 34: Anzahl der Niederschlagstage in Folge im Sommer im Basiszeitraum 1971 – 2000.

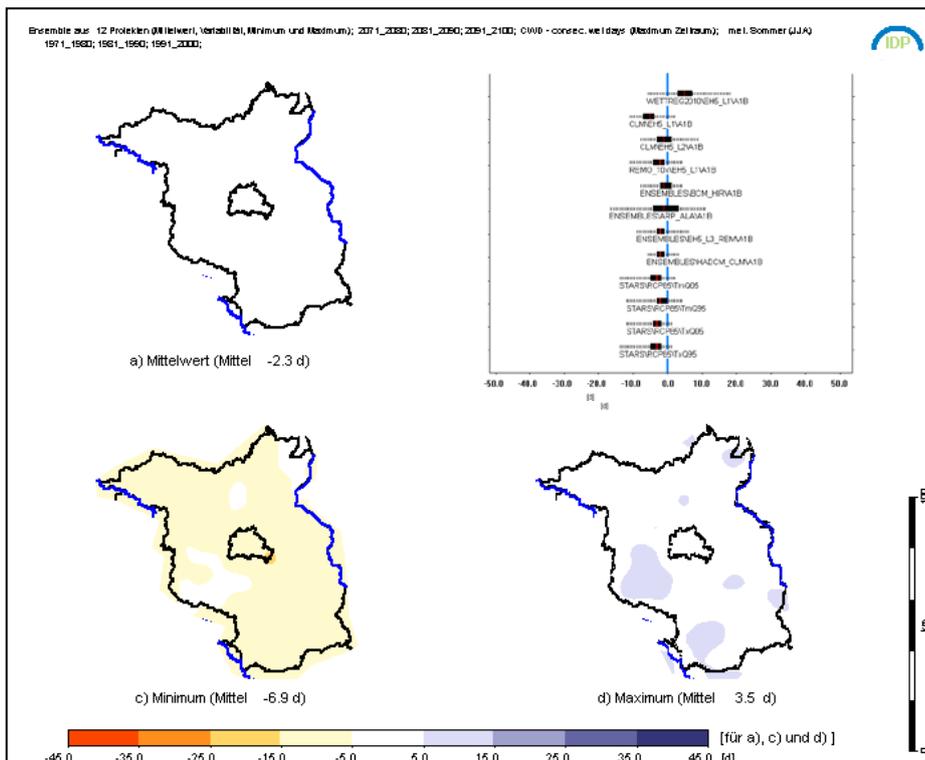


Abb. 35: Änderung der Anzahl der Niederschlagstage in Folge im Sommer zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

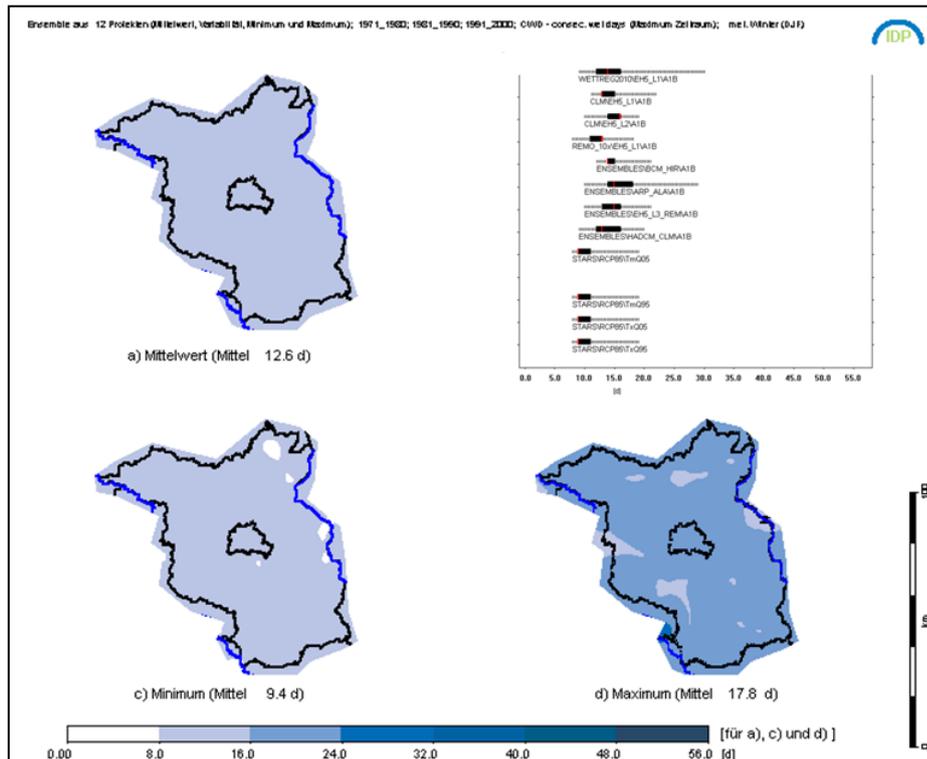


Abb. 36: Anzahl der Niederschlagstage in Folge im Winter im Basiszeitraum 1971 – 2000.

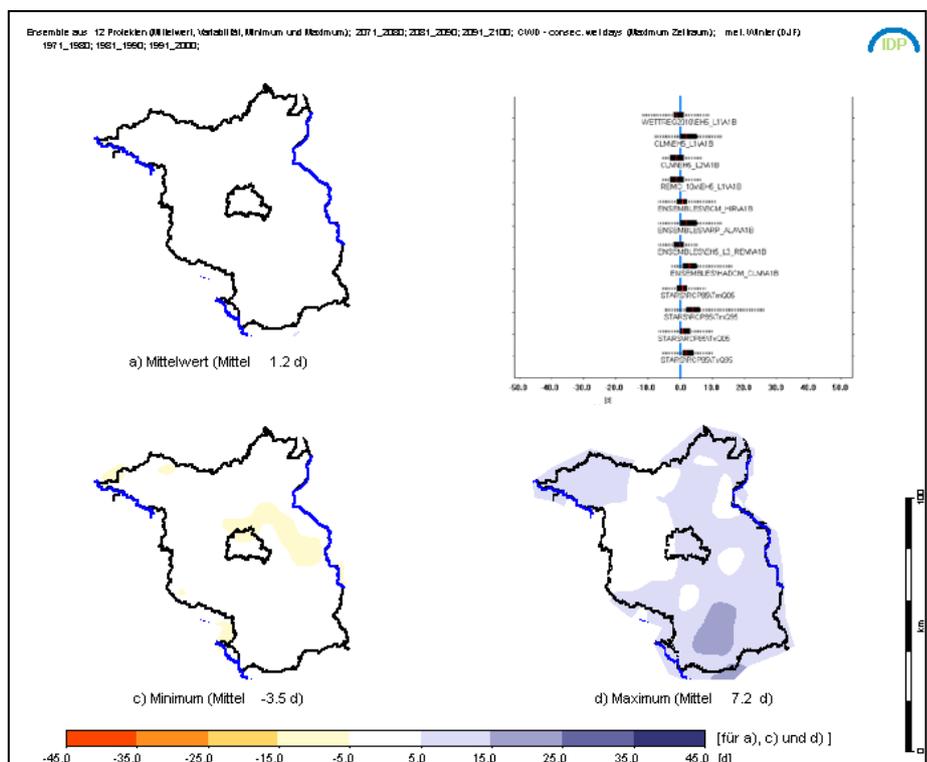


Abb. 37: Änderung der Anzahl der Niederschlagstage in Folge im Winter zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

### **Starkniederschläge Total (R90th TOT)**

Im **Sommer** des Basiszeitraumes 1971 – 2000 liegen die Werte für die Starkniederschläge zwischen 23,6 und 35,1 mm. Im Mittel werden hier 30,7 mm Niederschlag für ein Starkniederschlagsereignis dargestellt (Abbildung 38)

Für die Starkniederschläge im Sommer wird für den Projektionszeitraum im Mittel eine Zunahme des totalen Starkniederschlags von 3,5 mm modelliert. Die Werte variieren hier zwischen einer Abnahme um 4,2 mm bis zu einer deutlichen Zunahme um 10,3 mm (Abbildung 39).

Die Modellergebnisse sind hier sehr unterschiedlich. Das SRES-A1b-Szenario Wettreg und die STARS-Modelle modellieren eine etwas trockenere Zukunft, als die anderen A1B-Modelle. Als Gesamttrend ist dennoch deutlich eher eine Zunahme der Starkniederschläge zu erkennen.

Die **Winter** sind im Basiszeitraum vergleichsweise trocken. Die Spannweite der Werte liegt im Basiszeitraum zwischen 15,4 und 29,5 mm und im Mittel bei 19,7 mm (Abbildung 40).

Auch für den Winter wird für die Projektion eine Zunahme modelliert, die für die kalte Jahreszeit jedoch etwas stärker ausgeprägt ist, als für den Sommer. Als Minimum wird nur eine sehr geringe Abnahme um 0,3 mm projiziert, während das Maximum eine Zunahme von 10,6 mm aufzeigt. Im Mittel wird hier eine Zunahme um 5,4 mm erwartet (Abbildung 41).

Im Vergleich zum Sommer sind die Wintermodellergebnisse deutlich stärker in Richtung einer Starkniederschlagszunahme ausgeprägt. Außer dem Wettreg-Modell wird von keinem anderen Modell eine mögliche Abnahme der Starkniederschläge projiziert, sodass der Gesamttrend aller Modelle eine deutliche Zunahme darstellt.

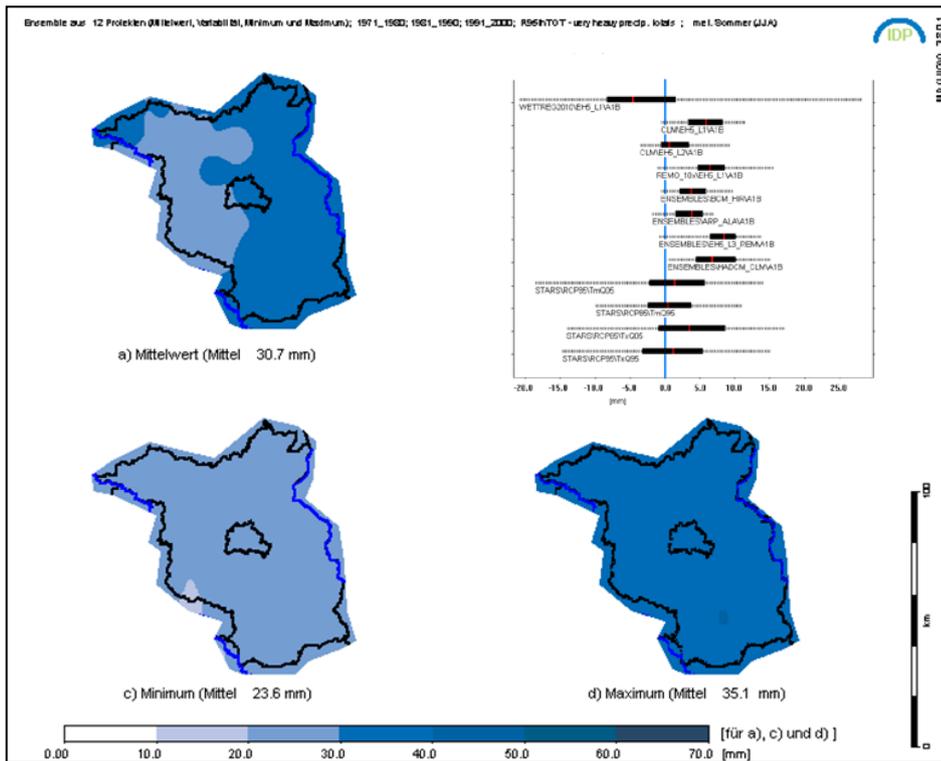


Abb. 38: Starkniederschläge Total im Sommer im Basiszeitraum 1971 – 2000.

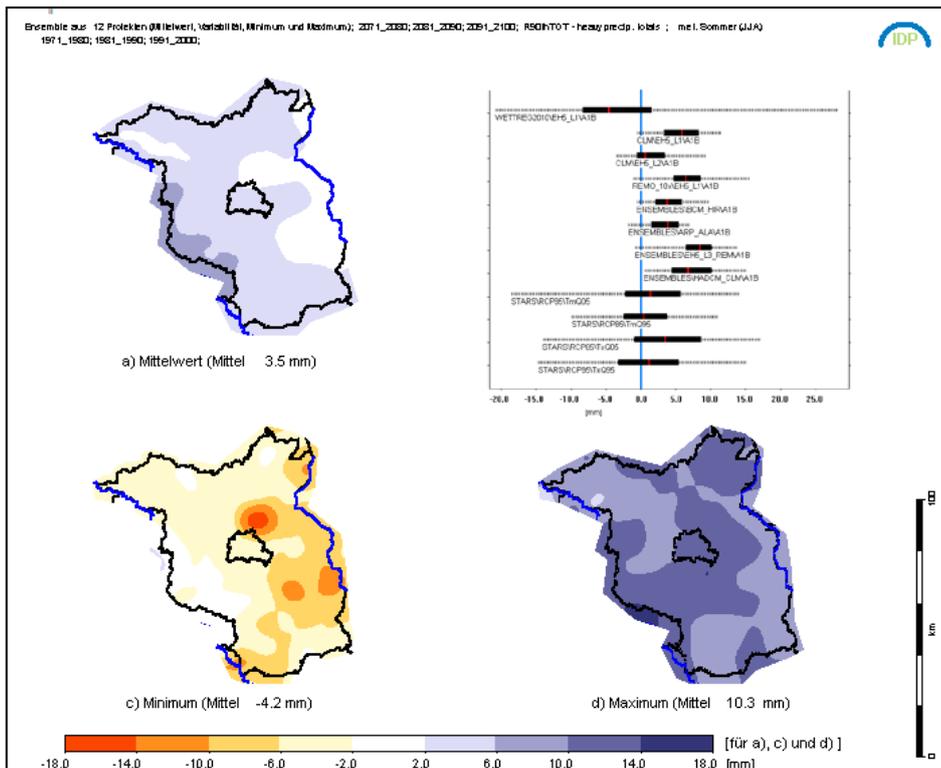


Abb. 39: Änderung der Starkniederschläge Total im Sommer zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

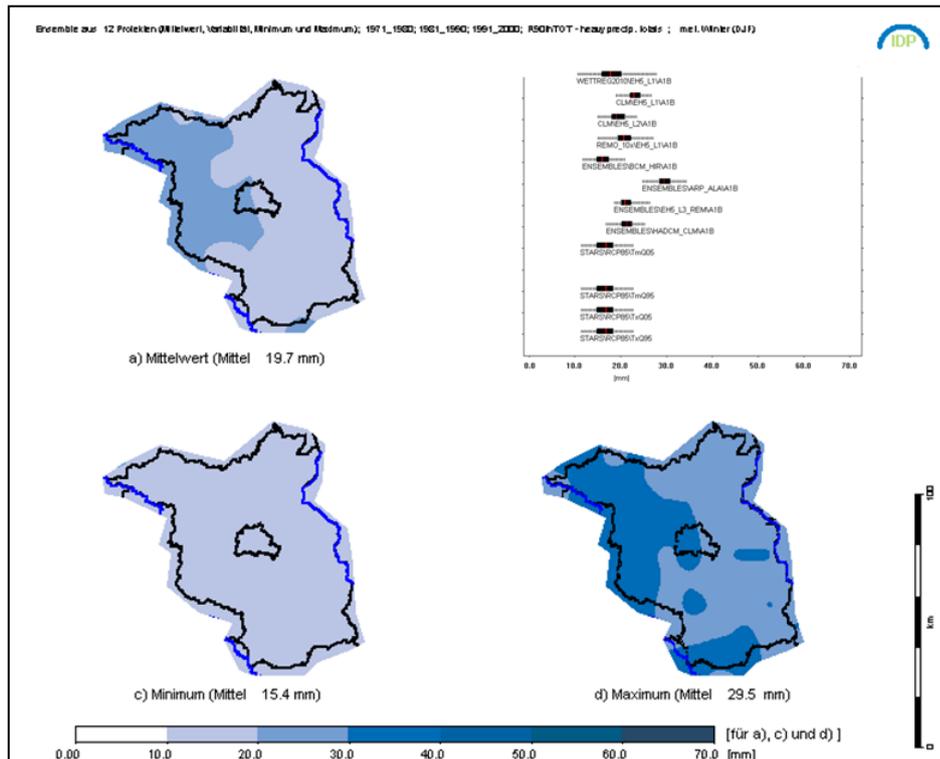


Abb. 40: Starkniederschläge Total im Winter im Basiszeitraum 1971 – 2000.

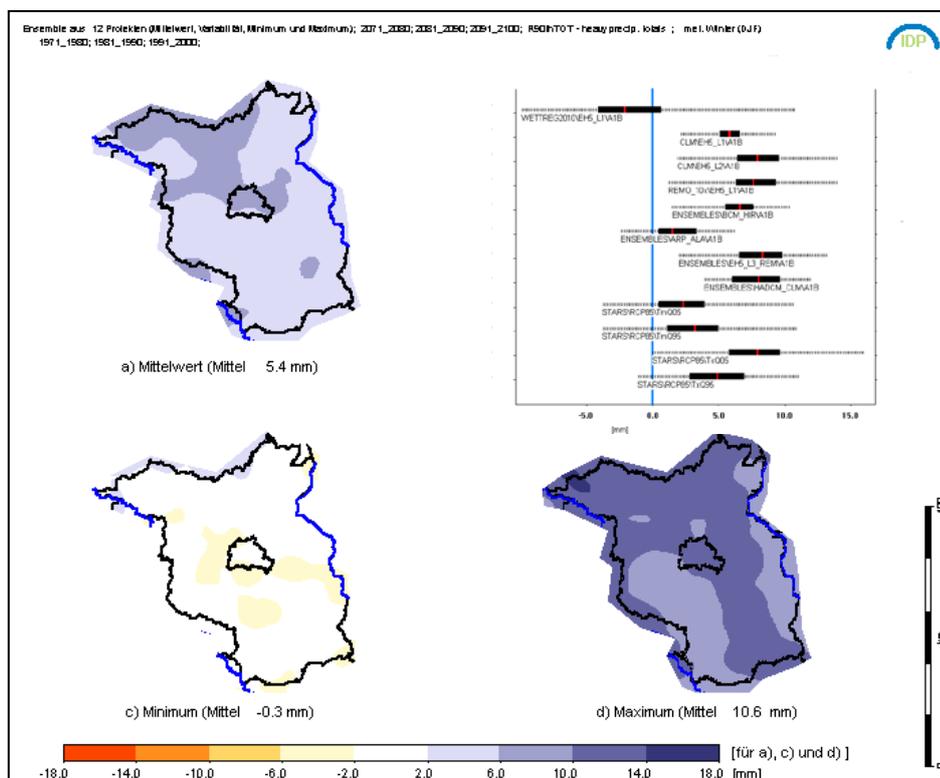


Abb. 41: Änderung der Starkniederschläge Total im Winter zwischen 1971 - 2000 und 2071 – 2100.

## 1-Tages-Niederschläge (RX1)

Aus den modellierten Ergebnissen für den Basiszeitraum wird deutlich, dass die **sommerlichen** 1-Tages-Niederschläge erheblich stärker ausgeprägt sind als die Winter-1-Tages-Niederschläge. Im Sommer sind 44,9 mm bis sogar 130,2 mm Niederschläge an einem Tag möglich. Im Mittel ergeben sich Niederschlagsmengen von 81,7 mm (Abbildung 42).

Für die 1-Tages-Sommerniederschläge im Projektionszeitraum ist die Spannweite der modellierten Werte wieder sehr groß. Die Werte variieren zwischen einer starken Abnahme der 1-Tages-Niederschläge um 64,3 mm, während als Maximum eine starke Zunahme um 73,5 mm aufgezeigt wird. Im Mittel wird dennoch eher von einer leichten Abnahme der sommerlichen 1-Tages-Niederschläge von 4,7 mm ausgegangen (Abbildung 43).

Auch für die 1-Tages-Niederschläge modellieren die RCP-Szenarien im Sommer deutlich trockenere Verhältnisse und eher eine Abnahme des Tagesniederschlags. Gemeinsam mit den anderen Modellen wird hier als gemeinsamer Trend ein leichter Rückgang der Tagesniederschläge erwartet.

Die **Winter** im Basiszeitraum dagegen unterliegen gemäßigten Tagesniederschlägen, die zwischen 20,7 und 42,7 mm variieren. Es ergibt sich hier ein Tagesniederschlagsmittel von 27,7 mm (Abbildung 44).

Für den Projektionszeitraum variieren die Werte für die Winterniederschläge nicht so stark wie für den Sommer. Hier wird eine leichte Zunahme von 4,4 mm im Mittel dargestellt, während die Spannweite der Werte zwischen einer Abnahme um 7,3 mm bis zu einer Zunahme um 15,9 mm liegt (Abbildung 45).

Hier decken sich alle Ergebnisse der verschiedenen Modelle sehr gut miteinander, sodass als Gesamttrend eine leichte Zunahme der Tages-Winter-Niederschläge zu erkennen ist.

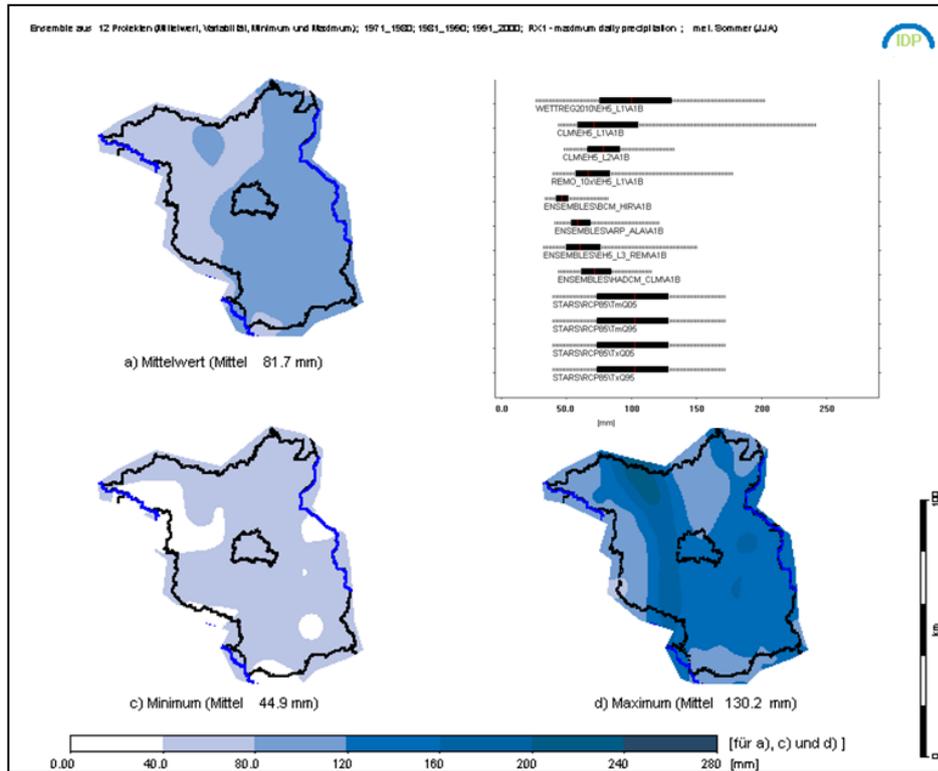


Abb. 42: 1-Tages-Niederschläge im Sommer im Basiszeitraum 1971 – 2000.

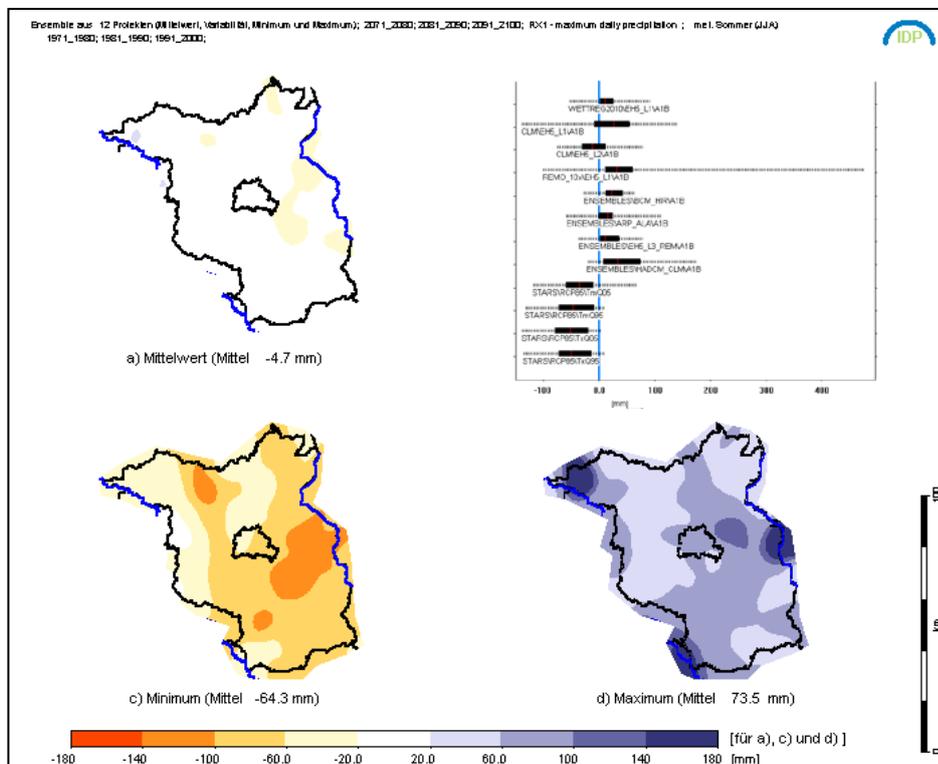


Abb. 43: Änderung der 1-Tages-Niederschläge im Sommer zwischen 1971 - 2000 und 2071 – 2100.

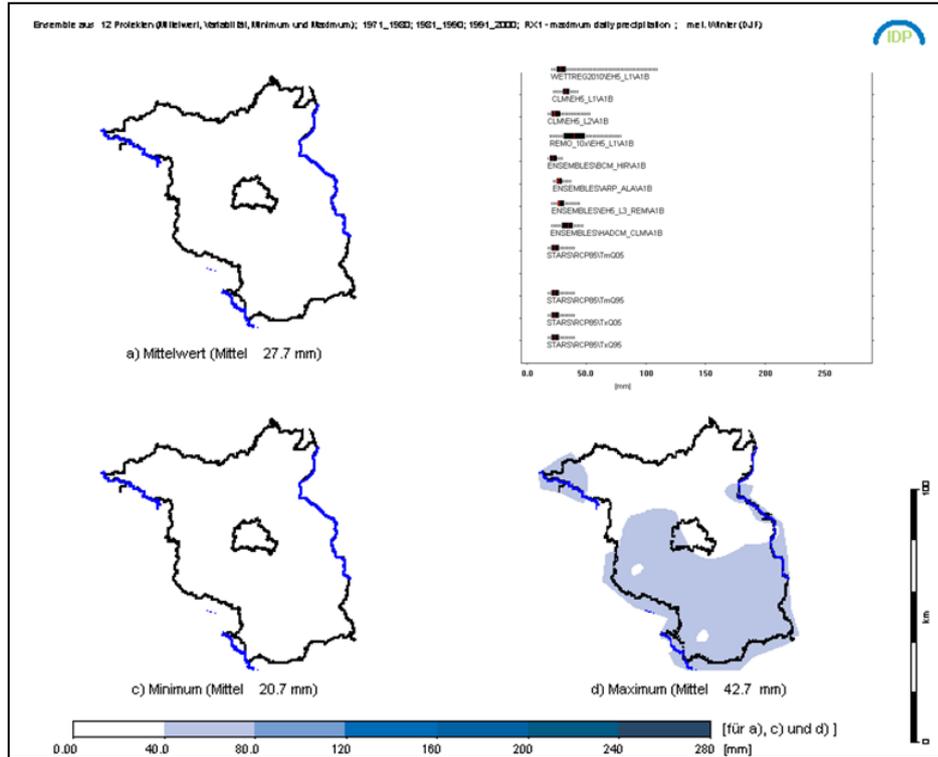


Abb. 44: 1-Tages-Niederschläge im Winter im Basiszeitraum 1971 – 2000.

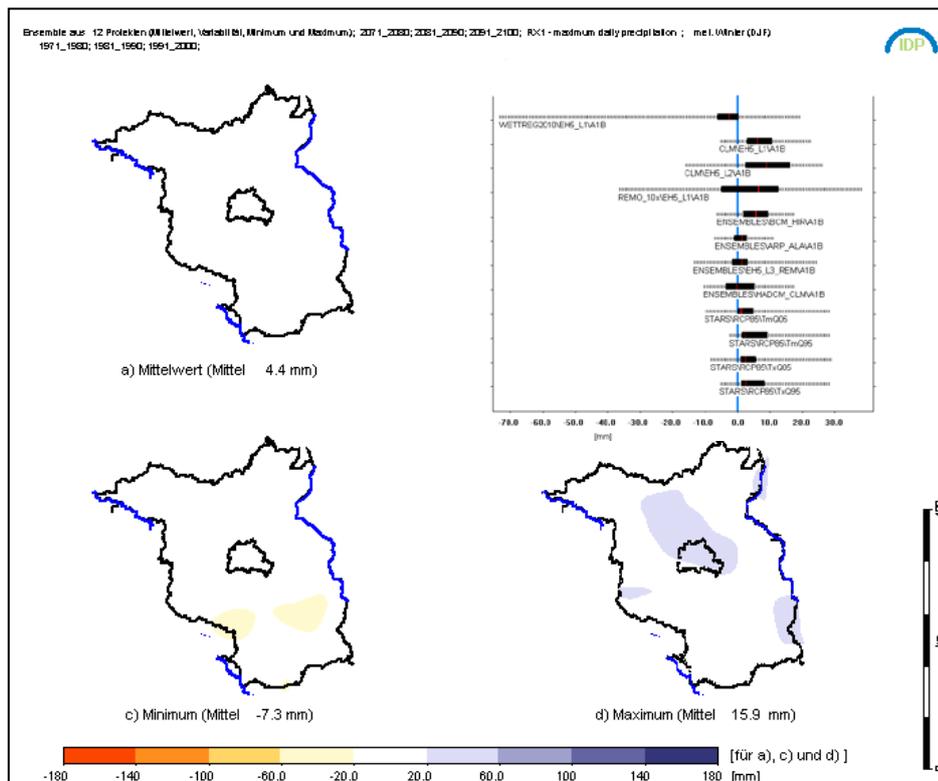


Abb. 45: Änderung der 1-Tages-Niederschläge im Winter zwischen 1971 – 2000 und 2071 – 2100.

## 5-Tages-Niederschläge (RX5)

Auch für die 5-Tages-Niederschläge gilt, dass die **sommerlichen** Niederschläge im Basiszeitraum wesentlich intensiver als die Winterniederschläge sind. Die 5-Tages-Niederschlagswerte liegen zwischen 72,9 mm und 159,9 mm. Im Mittel fallen 110 mm innerhalb einer 5-Tages-Niederschlagsperiode (Abbildung 46).

Für die projizierten sommerlichen 5-Tages-Niederschläge liegt ebenfalls eine große Spannweite der Werte vor. Während im Mittel nur eine sehr leichte Abnahme der 5-Tages-Niederschläge im Projektionszeitraum von 2 mm projiziert wird, variieren die Werte zwischen einer starken Abnahme von 69,1 mm bis zu einer starken Zunahme von 84,9 mm (Abbildung 47).

Die Ergebnisse der Modelle variieren stark, wobei vor allem die RCP8.5-Szenarien am deutlichsten trockenere Verhältnisse projizieren. Eine Aussage für einen Veränderungstrend ist somit nicht möglich.

Die **Winter**-5-Tagesniederschläge variieren im Basiszeitraum zwischen 47,1 mm und 85,8 mm. Im Mittel fallen 62,8 mm in 5 Tagen mit Niederschlag in Folge (Abbildung 48).

Im Winter wird im Projektionszeitraum im Mittel eine geringe Veränderung und eine Abnahme um 0,9 mm dargestellt. Die Spannweite der Werte liegt zwischen einer Abnahme um 17,9 und einer Zunahme um 15,3 mm (Abbildung 49).

Die Modellergebnisse für den 5-Tages-Niederschlag liegen alle sehr nah beieinander, sodass als Gesamttrend aller Modelle von fast keiner Veränderung des winterlichen 5-Tages-Niederschlages auszugehen ist.

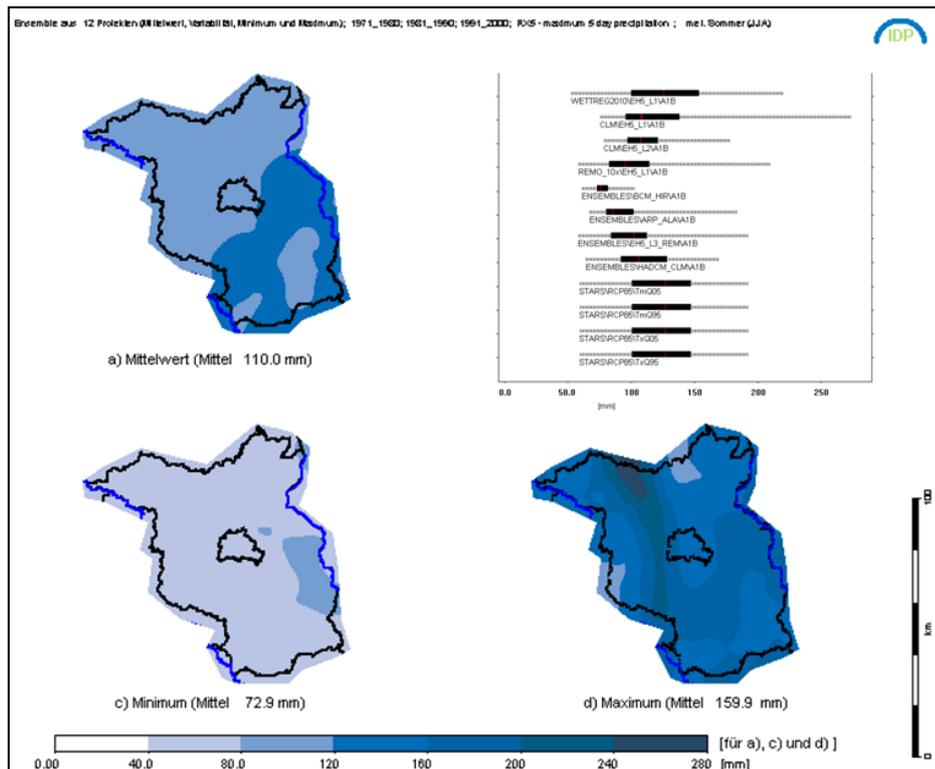


Abb. 46: 5-Tages-Niederschläge im Sommer im Basiszeitraum 1971 – 2000.

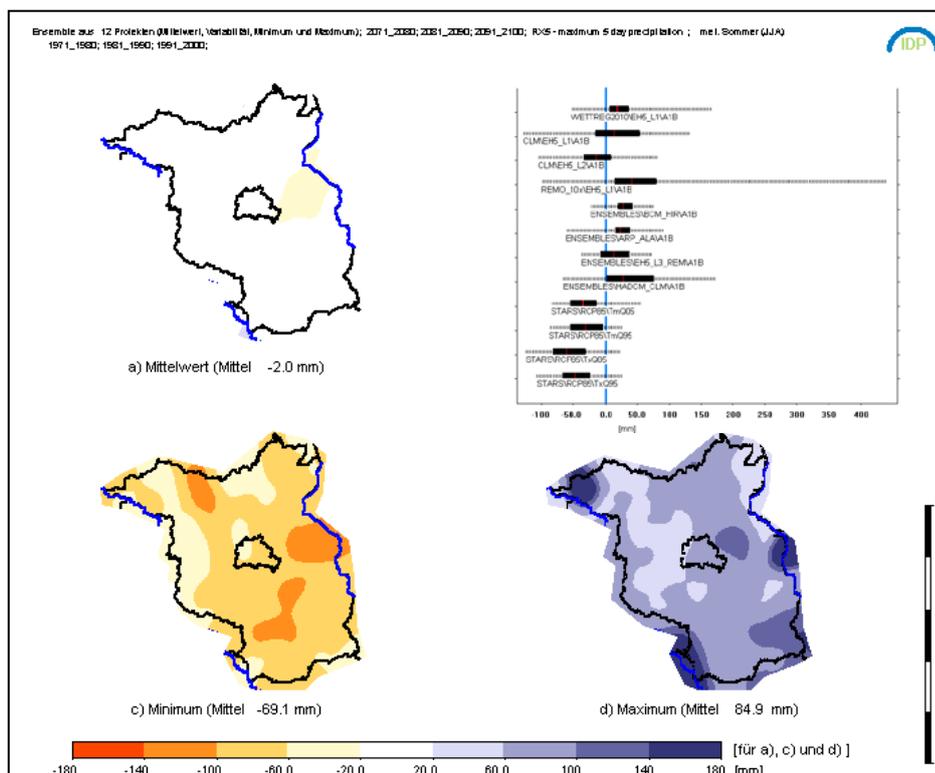


Abb. 47: Änderung der 5-Tages-Niederschläge im Sommer im Projektionszeitraum 2071 – 2100.

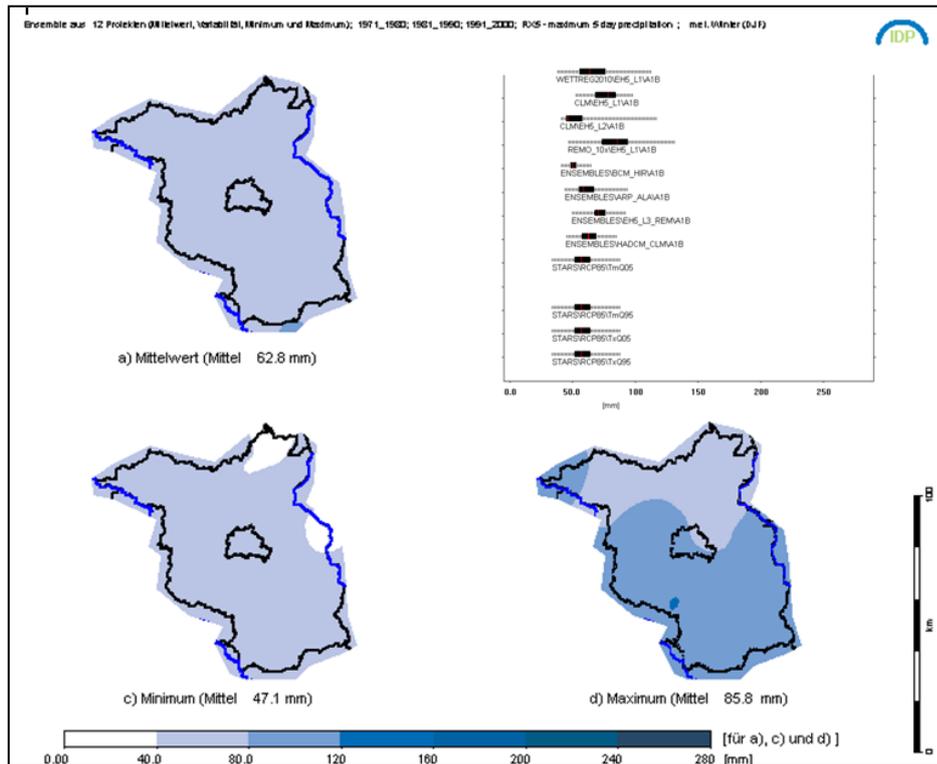


Abb. 48: 5-Tages-Niederschläge im Winter im Basiszeitraum 1971 – 2000.

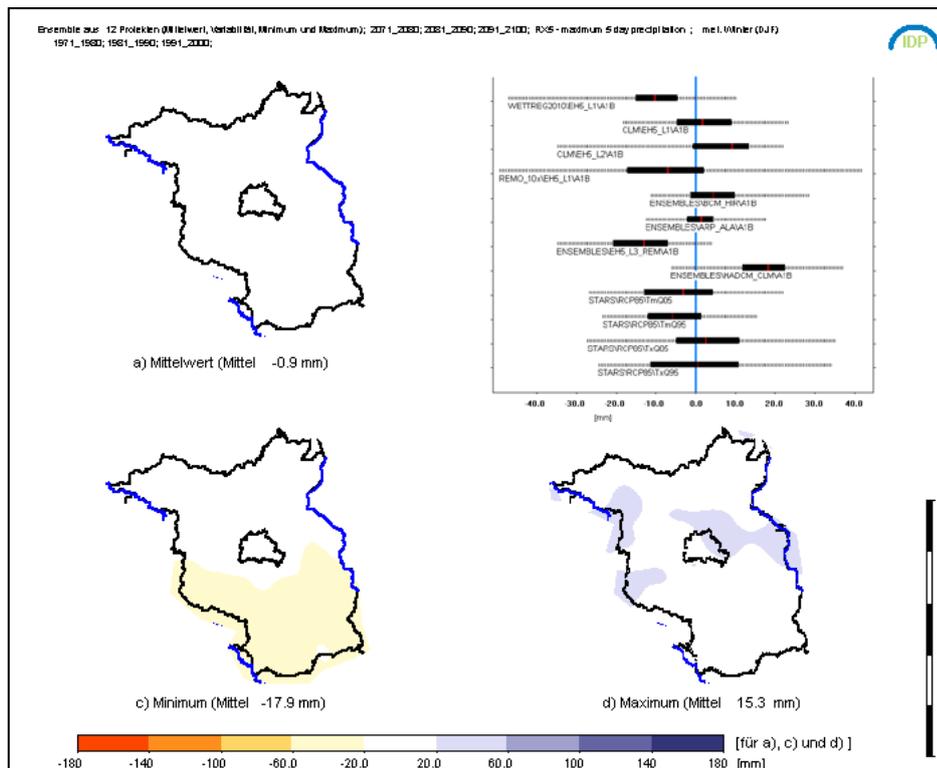


Abb. 49: Änderung der 5-Tages-Niederschläge im Winter zwischen 1971-2000 und 2071 – 2100.

#### 4.2.4 Vergleichende Auswertung für die jahreszeitliche Differenzierung ausgewählter Niederschlagsparameter

Für die ausgewählten Niederschlagsparameter sind die Ergebnisse differenziert zu betrachten (Tabelle 4).

Für elf Positionen ist die Zunahme von Feuchte signifikant, während gleichzeitig an acht Positionen eine starke Niederschlagsabnahme dargestellt wird. An nur fünf Positionen ist mit keiner oder nur einer geringen Veränderung zu rechnen.

Für den Parameter **Feuchtetage in Folge (CWD)** sind die Ergebnisse für die jeweiligen Jahreszeiten sehr unterschiedlich. Hier wird für den Sommer eine Abnahme von 18%, für den Winter kaum eine Veränderung der Niederschlagstage in Folgen projiziert.

Anders verhält sich die Veränderung der **Starkniederschläge (R90th TOT)**. Für diesen Parameter wird sowohl in den Sommer- als auch in den Wintermonaten eine signifikante Zunahme erwartet. Im Sommer kann diese Zunahme zwischen 11 und 30% liegen, im Winter sogar bei 27 bis 37%.

Index	Ausgangswerte			Änderungssignal			Einheit
	Min BZ	Mitt BZ	Max BZ	Min PJ	Mitt PJ	Max PJ	
<b>CWD</b>							
Sommer	8,6	12,7	23,7	-7	-2,3	3,5	d
Winter	9,4	12,6	17,8	-3,5	1	7	d
<b>R90thTOT</b>							
Sommer	23,6	30,7	35,1	-4	3,5	10	mm
Winter	15,4	19,7	29,5	-0,3	5,4	11	mm
<b>RX1</b>							
Sommer	44,9	81,7	130,2	-65	-5	70	mm
Winter	20,7	27,7	42,7	-7,3	4,4	15,9	mm
<b>RX5</b>							
Sommer	72,9	110,0	159,9	-70	-2	85	mm
Winter	47,1	62,8	85,8	-18	-1	15	mm

	keine / kaum Veränderung ≤ 10%
	Zunahme von Feuchte/ Abnahme von Trockenheit > 10%
	Zunahme von Trockenheit/ Abnahme von Feuchte > 10%

Tab. 4 Auswertung für Minimal-, Mittel- und Maximalwerte für die jahreszeitliche Differenzierung in Sommer und Winter für den Projektionszeitraum (PJ) im Vergleich zum Basiszeitraum (BZ).

Für die **1-Tages-Niederschläge (RX1)** liegen die projizierten Werte jedoch wieder sehr weit auseinander. Sowohl eine starke Abnahme als auch eine starke Zunahme sind hier möglich. Im Mittel ist die Veränderung nicht signifikant. Dennoch ist auch erkennbar, dass in den Sommermonaten die Niederschläge eher eine Tendenz zur Abnahme aufweisen, während die Winterniederschläge eher zunehmen, hier auch über dem Signifikanzniveau.

Die Werte der projizierten **5-Tages-Niederschläge (RX5)** ergeben im Mittel keine signifikante Änderung. Auch variieren die Minimal- und Maximalwerte sehr stark. Die Aussagen bezüglich dieses Parameters sind sehr heterogen.

Insgesamt lässt sich bei der Betrachtung der ausgewählte Niederschlagsparameter ein Trend zu eher trockeneren Sommern mit einer gleichzeitigen Zunahme von Starkniederschlagsereignissen ausmachen. Auch im Winter werden mehr Starkniederschlagsaufkommen und 1-Tages-Niederschläge mit höheren Niederschlagssummen projiziert.

In der Tabelle 5 sind alle Ergebnisse der Auswertung in sehr verkürzter Form hinsichtlich Modellübereinstimmung und des jeweiligen Trends erfasst.

Index	Modell- übereinstimmung	Trend
<b>1-Tages-Niederschläge (RX1) (Jahr)</b>	Gut	Trend: leichte Abnahme, besonders RCP trocken, A1B etwas feuchter, kaum Veränderung
Sommer	Gering	RCP modellieren am trockensten, Gesamttrend zeigt dennoch in Richtung einer leichten Abnahme, nur geringe Veränderung
Winter	Gut	Zunahme im Mittel um ~16%
<b>5-Tages-Niederschläge (RX5) (Jahr)</b>	Gering	RCP besonders trocken, A1B deutlich feuchter, große Spannweite der Werte, Gesamttrend sehr leicht positiv, nur geringe Veränderung
Sommer	Gering	RCP deutlich trockener als A1B, große Spannweite der Werte, Gesamttrend leicht negativ, nur geringe Veränderung
Winter	Gut	Kaum/keine Veränderung
<b>Starkniederschläge (R90th TOT) (Jahr)</b>	Gut	RCP etwas trockener als A1B, Gesamttrend zeigt nur schwache Veränderung
Sommer	Gering	Gesamttrend zeigt dennoch eine Zunahme der Starkniederschläge um ~ 11%, Wetterg und STARS modellieren am trockensten
Winter	Gut	deutliche Zunahme der Starkniederschläge um ~ 27%
<b>Anzahl der aufeinander folgenden Feuchtetage (CWD) (Jahr)</b>	Gut	kaum Veränderung
Sommer	Gut	Trend zeigt Abnahme um ~ 18%
Winter	Gut	Trend zeigt nur eine sehr geringe Abnahme, kaum Veränderung
<b>Anzahl der aufeinander folgenden Trockentage CDD (Jahr)</b>	Gut	Zunahme der Trockenheit um ~19%
<b>Trockenperioden (DP) (Jahr)</b>	Gut	leichte Zunahme der Anzahl der jährlichen Trockenperioden um ~10%
<b>Hitzetage (TX) (Jahr)</b>	Gut	RCP projiziert stärkste Zunahme von Hitzetagen, A1B zeigt deutlich geringere Zunahme, Gesamttrend einheitlich als Zunahme der Hitzetage, im Mittel Zunahme um ~255% projiziert
<b>Tropennächte (TN) (Jahr)</b>	Gering, aber gemeinsame Tendenz	RCP zeigen fast keine Veränderung der Tropennächte → Gesamttendenz noch immer in Richtung einer sehr starken Zunahme der Tropennächte im Mittel um 700%

	keine / kaum Veränderung $\leq 10\%$
	Zunahme von Feuchte/ Abnahme von Trockenheit $> 10\%$
	Zunahme von Trockenheit/ Abnahme von Feuchte $> 10\%$
	Zunahme von Hitze $> 10\%$

Tab. 5 Übersicht aller Modellergebnisse hinsichtlich Modellübereinstimmung und Trend.

## 5. Fazit

Die **Entwicklung der Extremwetterrisiken** für Berlin-Brandenburg in Form von Starkniederschlag, Hitze und Dürre wird sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verschärfen. Die Verdeutlichung der Schäden durch Extremereignisse erhöht den klimapolitischen Handlungsdruck.

Die **Jahresdurchschnittstemperatur** für die Region wird zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich ansteigen, wenn globale Klimaschutzaktivitäten nicht konsequent umgesetzt werden. Bereits im letzten Jahrhundert hat sich die Durchschnittstemperatur in Brandenburg um fast ein Grad erhöht. Der Anstieg erfolgte jedoch nicht konstant, sondern hat sich besonders seit dem Zeitraum 1971-2000 entwickelt. Zuvor lagen die 30-jährigen Mittelwerte der Temperatur nur leicht schwankend zwischen 8,6 °C und 8,7 °C. Ab dem genannten Zeitraum begann die deutliche Erwärmung, die im letzten Tricennium (1981-2010) zu einem Temperaturmittel von 9,3 °C geführt hat. Die Tendenz zu einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur wird verstärkt sichtbar bei der Veränderung der Maximalwerte. So stiegen diese in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts noch stärker an als die Mittelwerte. Im letzten Tricennium wurde ein Maximalwert von 10,4 °C erreicht, der 1,2 K wärmer als im ersten Zeitraum ist.

Die **Ergebnisse der Datenauswertung** für das Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) zeigen, dass die verwendeten Szenarien, RCP8.5 und SRES-A1B trotz Unterschiede hinsichtlich der Modellierung von Feuchte und Trockenheit, dennoch meist einen gemeinsamen Trend besitzen. Lediglich in fünf von 16 Teilergebnissen wird nur eine geringe Modellübereinstimmung entdeckt (Tabelle 5). Deutlich wird zudem, dass die RCP8.5 Szenarien des STARS-Modells deutlich „trockenere“ Ergebnisse als alle SRES-A1B-Szenarien (mit der Ausnahme von Wettreg2010) liefern.

Einige der Auswertungsergebnisse zeigen nur sehr geringe bis gar keine Veränderungen. Vor allem sind die Projektionsergebnisse bezüglich der Niederschlagsentwicklung weniger belastbar. Deutliche Entwicklungstendenzen mit größeren Modellübereinstimmungen zeigen vornehmlich die Trockenheits- und Dürreindizes.

Für einige der verwendeten Indizes kann kein allgemeiner Trend zur Veränderung zum Ende des 21. Jahrhunderts festgestellt werden. So wird kaum eine Veränderung für die **5-Tages-Niederschläge** für den Winterzeitraum dargestellt. Dieser Index ist besonders von Bedeutung für die Entstehung von Hochwasser. Diesbezüglich ist der Index zur **Anzahl der Feuchtetage in Folge** ebenfalls von Bedeutung. Hier kann vornehmlich eine Abnahme in den Sommermonaten festgestellt werden.

Zudem wird deutlich, dass sich die Niederschläge von den Sommermonaten in den Winter verschieben werden. Bei gleichbleibendem oder sich kaum veränderndem Jahresniederschlag und gleichzeitiger Zunahme und Verstärkung der **Starkniederschlags-** und der **1-Tages-Niederschlagssummen** im Winter ist zu erwarten, dass ein größerer Teil des Jahresniederschlags in Form von Starkniederschlagsereignissen fällt. Hiermit kann von einem Anstieg des lokalen Überschwemmungsrisikos, vor allem in Bereichen mit hohem Versiegelungsanteil und Schäden in bewohnten Bereichen gerechnet werden. Starkniederschläge bringen auch eine hohe Erosionsgefährdung mit sich. Vor allem an Trockenperioden anschließend führen sie zu Bodenauswaschungen, -degradation und zu Erosion.

Für beide **Trockenheitsindizes** sind eine deutliche Verlängerung und das häufigere Auftreten von Trockenheitsphasen erkennbar. Die Anzahl der Feuchtetage hingegen wird leicht rückläufig sein. Zudem werden die Anzahl der **Hitzetage** stark und das Auftreten von **Tropennächten** deutlich zunehmen. In dieser Kombination ist davon auszugehen, dass

sowohl das Dürre- als auch das Waldbrandrisiko zunehmen werden. Ebenfalls zunehmende Risiken für die Binnenschifffahrt, Landwirtschaft und Gesundheit durch Hitzebelastung sind möglich.

Neben den Veränderungen der einzelnen Extremereignisse spielen auch potentielle Wechselwirkungen zwischen den sich zum Teil zuspitzenden Extremen eine größere Rolle. Das direkte Aufeinanderfolgen von unterschiedlichen Extremen verstärkt die Folgen der Einzelereignisse. Insbesondere die zunehmende Trockenheit wird in Zukunft ein Problem darstellen, da die Region Berlin-Brandenburg bereits heute zu den niederschlagärmsten Regionen der Bundesrepublik Deutschland gehört. Gleichzeitig werden die Wintermonate feuchter, sodass das häufigere Auftreten von Wasserknappheit und Wasserüberschuss hinsichtlich der Planung von Wasserspeicherung, Dammbau, die Schaffung von Retentionsflächen und Überflutungsschutzmaßnahmen berücksichtigt werden muss.

## Quellen, Literatur

**Dorfner, M. (2015):** Entwicklung von Niederschlags-, Trockenheits- und Hitzeextremen für die Region Berlin-Brandenburg im Zuge des Klimawandels bis zum Ende des 21. Jahrhunderts; Bachelorarbeit im Fach Geographie Humboldt-Universität zu Berlin.

**Imbery, F. und Plagemann, S. (2011):** Die neuen RCP Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht, Deutscher Wetterdienst.

URL:

[http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KUPK/Homepage/Klimawandel/Klimaszenarien\\_\\_Zukunft/Emissionsszenarien/SzenarienRCP\\_\\_PDF,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/SzenarienRCP\\_PDF.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KUPK/Homepage/Klimawandel/Klimaszenarien__Zukunft/Emissionsszenarien/SzenarienRCP__PDF,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/SzenarienRCP_PDF.pdf)

**IPCC Special Report (2000):** Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. S. 4.

**Jacob, D. et al. (2012):** Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland - Ensemble Simulationen für die Klimafolgenforschung. - CSC Report 6 des Climate Service Center Germany. S.11.

**Kreienkamp, F. und Spekat, A. (2013):** IDP: Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse. Bedienungsanleitung. Bedienungsanleitung Version 3.6.2. Bericht. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Brandenburg, Potsdam OT Groß Glienicke, S. 118f. und 125f.

**Paeth, H. (2007):** Klimamodellsimulationen. In: Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Hrsg.: Endlicher, W. und Gerstengarbe, F.-W. Potsdam, S. 44-55.

**Sieg, B. (2015):** Bericht über die Auswertung von Starkniederschlägen in Brandenburg für die Jahre 2013 und 2014; unveröffentlichter Praktikumsbericht für LUGV Brandenburg.

**Treber, M. (2008):** Neue IPCC-Szenarien für den Fünften Sachstandsbericht. Germanwatch.

URL: <http://germanwatch.org/klima/mt08szen.pdf>

**van der Linden, P., Mitchell, J. F.B, Gilbert, P. (2009):** ENSEMBLES: Climate Change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter.

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

**Wenzel, St. (2015):** Analyse ausgewählter klimatischer Parameter der Region Berlin-Brandenburg für das 20. Jahrhundert; Bachelorarbeit im Fach Geographie Humboldt-Universität zu Berlin.