

Klimamodellauswertung Sachsen-Anhalt 1961-2100

Synthesebericht



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz

Diese Schrift wird vom Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt kostenlos herausgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Der Nachdruck bedarf der Genehmigung. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf sie nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Impressum

Herausgeber

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt

Reideburger Str. 47 • 06116 Halle (Saale)

Tel.: 0345 5704-0

Fax: 0345 5704-605

E-Mail: poststelle@lau.mlu.sachsen-anhalt.de

www.lau.sachsen-anhalt.de

Erarbeitung

UlrichConsulting Max Ulrich e.K.

Fabrikstraße 10 • 04178 Leipzig

Registriert im Handelsregister am Amtsgericht zu Leipzig unter HRA 18650

Umschlaggestaltung unter Verwendung einer Grafik der „Warming Stripes“ von Ed Hawkins für Sachsen-Anhalt

1. Auflage

Juni 2021

Zitiervorschlag: Ulrich, Max (2021): Synthesebericht: Klimamodellauswertung Sachsen-Anhalt 1961-2100. Erarbeitung der klimatologischen Grundlagen und Durchführung einer Klimamodellanalyse für Sachsen-Anhalt. UlrichConsulting Max Ulrich e.K. im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	6
2. Begriffe und Grundlagen	7
3. Temperaturänderungen.....	13
Hitze	17
Vegetation	18
4. Niederschlagsänderungen	21
Winter.....	23
Starkregen.....	26
Dürre	29
5. Änderungen weiterer Klimaelemente	31
Luftfeuchtigkeit	31
Windgeschwindigkeit.....	34
Einstrahlung	35
6. Ausblick und Zusammenfassung	38
Ausblick – Weitere Analysen zum Klimawandel.....	38
Zusammenfassung.....	42
Literaturverzeichnis.....	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der Jahresmitteltemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	15
Abbildung 2: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der jährlichen Tiefsttemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	16
Abbildung 3: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der Anzahl der jährlichen Hitzetage für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	17
Abbildung 4: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der jährlichen Höchsttemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	18
Abbildung 5: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der Länge der thermischen Vegetationsperiode für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	19
Abbildung 6: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des Beginns der thermischen Vegetationsperiode für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	19
Abbildung 7: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des Jahresniederschlags für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	21
Abbildung 8: Niederschlagskenngrößen: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.	23
Abbildung 9: Änderung des Landesmittels der Niederschlagstage mit mindestens 1 mm Tagesniederschlag für das Gesamtjahr und die Jahreszeiten.	25

Abbildung 10: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des Sommerniederschlags für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	26
Abbildung 11: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des höchsten jährlichen 5-Tagesniederschlags für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	27
Abbildung 12: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der starken Niederschlagsmenge für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	28
Abbildung 13: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des jährlichen Saldos der Klimatischen Wasserbilanz für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.....	29
Abbildung 14: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der winterlichen mittleren relativen Luftfeuchtigkeit für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.....	32
Abbildung 15: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren sommerlichen Taupunkttemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	33
Abbildung 16: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren winterlichen Windgeschwindigkeit für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.	35
Abbildung 17: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren jährlichen Solarstrahlung für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.....	36
Abbildung 18: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren sommerlichen Solarstrahlung für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.....	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturkenngrößen: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.....	14
Tabelle 2: Niederschlagskenngrößen: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.....	22
Tabelle 3: Weitere Klimakenngrößen: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.....	31
Tabelle 4: Die bedeutendsten Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.	42

Einleitung

Der Klimawandel ist in Sachsen-Anhalt Realität geworden. Die Abnahme von Tagen, an denen die Temperatur unter null Grad Celsius bleibt (Eistage), Hitzewellen wie in den Jahren 2018 und 2019, Waldsterben durch Trockenstress und damit einhergehender Schädlingsbefall wie im Oberharz sowie Missernten sind nur einige Beispiele. All diese Effekte zeigen sich bereits jetzt, bei einer Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperatur in Sachsen-Anhalt von ca. 1,2°K im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990.

Geht der Klimawandel ungebremst weiter, wird global mit einem Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur von bis zu fünf Grad Celsius gerechnet. Bei schneller und entschlossener Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen lässt sich die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius begrenzen. Das sind die erwarteten Bandbreiten für die zukünftige Klimaentwicklung.

Es stellt sich die Frage, wie es mit dem Klima und den damit zusammenhängenden Lebensbedingungen in Sachsen-Anhalt innerhalb dieser Bandbreiten weitergeht. Wie stark werden sich die Klimaelemente in Sachsen-Anhalt verändern, insbesondere die Temperaturen und die Niederschläge? Werden Hitzewellen die Regel statt die Ausnahme? Kommt es zu einer Häufung und Intensivierung von Starkniederschlagsereignissen und Hochwässern?

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Klimamodellauswertung Sachsen-Anhalt 1961-2100“ wurden unter anderem die zuvor gestellten Fragen betrachtet. Der Synthesebericht fasst die wichtigsten Ergebnisse des Projektes zusammen und zeichnet ein Bild der möglichen Veränderungen des Klimas in Sachsen-Anhalt bis zum Jahr 2100.

Im zweiten Kapitel werden Begriffe und Grundlagen der Klimaanalyse erläutert. In den Kapiteln drei bis fünf werden Klimaänderungen für die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag, Wind, Luftfeuchtigkeit und Strahlung dargestellt. Kapitel sechs enthält einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf sowie eine Zusammenfassung.

2. Begriffe und Grundlagen

- **Klimamodelle**

Klimamodelle sind Rechenmodelle, die unter der Annahme von Klimaszenarien die Änderungen des Klimas berechnen, indem sie das gesamte System Erde-Atmosphäre-Biosphäre-Eiskappen-Böden mit seinen Wechselwirkungen berücksichtigen. Die Klimamodelle, die in dieser Studie verwendet wurden, basieren auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und sind unter Beachtung von Qualitätskriterien sorgfältig ausgewählt worden (Struve, et al., 2020).

- **Klimaszenarien**

Für die Projektionen des Klimawandels sind vom IPCC Szenarien entwickelt worden, die unterschiedliche Annahmen zur Entwicklung der menschlichen Aktivitäten, des Wirtschaftswachstums und der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen treffen (Moss, et al., 2010). Darauf basierend, sind *Repräsentative Pfade* (RCPs) für die Konzentrationen von *Treibhausgasen* (THG) entwickelt worden. Die unterschiedlichen RCPs werden nach dem Strahlungsantrieb bezeichnet, ausgedrückt in Watt je Quadratmeter (Wm^{-2}). Für diese Studie sind die extremsten RCPs untersucht worden (RCP2.6 und RCP8.5). Die Ergebnisse decken damit die zu erwartende Bandbreite ab. Das RCP2.6 wird auch als *Szenario mit konsequentem globalen Klimaschutz* bezeichnet, da die THG-Konzentrationen nach 2050 zurückgehen, während das RCP8.5 von einem unverminderten Anstieg der THG-Konzentrationen ausgeht und *Szenario ohne globalen Klimaschutz* genannt wird.

- **Klimaprojektion**

Klimaprojektionen sind die Ergebnisse der Klimamodelle, die unter der Annahme eines Klimaszenarios entstehen. Klimaprojektionen sind keine Prognosen, sondern eine Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Klimaszenarien. Das Ergebnis einer Klimaprojektion kann nicht direkt als Vorhersage für einen Zeitraum interpretiert werden. Der Betrachtungszeitraum beträgt mindestens 30 Jahre.

- **Ensemble**

Ein Ensemble ist die Teilmenge der Klimaprojektionen. In diesem Bericht werden die Auswertungen der Projektionen des mitteldeutschen Kernensembles (MDK) vorgestellt. Das MDK deckt die Bandbreiten der klimatischen Entwicklungen in Sachsen-Anhalt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ab.

- **Änderungssignale**

Änderungssignale bezeichnen die absoluten oder relativen Änderungen einer Klimakenngröße zwischen zwei Zeiträumen. In diesem Bericht beziehen sich die Änderungssignale immer auf die Referenzperiode 1961-1990 und werden jeweils für den Zeitraum 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) angegeben.

- **Hitzebelastung**

Die Hitzebelastung wird in diesem Bericht durch die Betrachtung der jährlichen Anzahl der heißen Tage beschrieben. Diese Kenngröße bezeichnet die Anzahl der Tage, an denen eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C überschritten wird.

- **Vegetationsperiode**

In diesem Bericht wird die thermische Definition der Vegetationsperiode verwendet. Diese beinhaltet, dass die Vegetationsperiode startet, wenn das erste Mal im Jahr an mindestens 6 Tagen in Folge eine Tagesmitteltemperatur von über 5 °C herrscht. Die Vegetationsperiode endet, wenn nach dem 01. Juni an mindestens 6 Tagen in Folge eine Tagesmitteltemperatur von unter 5 °C herrscht.

- **Wahrscheinliche Änderung**

Die wahrscheinliche Änderung ist die Spannbreite der Änderungssignale, in dem 66 % der Klimaprojektion liegen, die um den Median herum verteilt sind. Der Median ist der Wert, der von der Hälfte der Projektionen über- und der anderen Hälfte unterschritten wird. In diesem Bericht wird der wahrscheinliche Bereich eines Änderungssignales immer in Klammern angegeben.

- **Starker und Schwacher Wandel**

Der starke Wandel bezeichnet das 85. Perzentil und der schwache Wandel das 15. Perzentil der Änderungssignale einer Klimakenngröße. Das 85. (15.) Perzentil ist der Wert aus der Verteilung der Projektionen, der höher ist als 85 % (15 %) der Projektionen.

- **Was ist Klima?**

Das Wetter bezeichnet die an einem Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretenden atmosphärischen Kenngrößen wie Temperatur, Niederschlag, Wind usw. Im Gegensatz dazu, beschreibt das Klima die langjährigen Mittelwerte und Schwankungsbreiten der Klimaelemente Temperatur, Niederschlag, Wind, Luftfeuchtigkeit und Einstrahlung über langjährige Perioden von mindestens 30 Jahren Länge. In diesem Bericht werden die Schwankungsbreiten aus den Wertebereichen der Klimakenngrößen ermittelt, die in diesen langjährigen Zeiträumen auftreten.

- **Wodurch kann das derzeitige Klima von Sachsen-Anhalt charakterisiert werden?**

Das Klima der Referenzperiode 1961-1990 und auch das derzeitige Klima ist ein warmgemäßigtes Mittelbreitenklima im Übergang von maritim zu kontinental beeinflusstem Klima. Die Winter sind in den tiefen Lagen relativ mild und schneearm mit Mitteltemperaturen nahe oder knapp über dem Gefrierpunkt. Im Harz ist aufgrund der Höhenlage an einer Vielzahl der Tage im Winter mit einer Schneedecke zu rechnen. Die Sommer sind warm, aber nicht heiß. Die Niederschläge sind in den tiefen Lagen - und damit in den größten Teilen des Landes - im Sommerhalbjahr stärker ausgeprägt als im Winter, während sie in den Mittelgebirgen gleichmäßig über das Jahr verteilt sind. Verbreitet

fallen weniger als 600 Liter/m², teilweise sogar weniger als 500 Liter/m² im Jahresmittel. Damit ist Sachsen-Anhalt ein sehr trockenes Bundesland. Sommerliche Hitzebelastungen sind moderat und nehmen, wie die sommerliche Mitteltemperatur, von Nordwesten nach Südosten zu. Der Harz stellt aufgrund seiner exponierten Lage eine Besonderheit dar und ist bedeutend nasser und kühler.

- **Was versteht man unter Klimawandel**

Das Klima ändert sich, in der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft aufgrund unterschiedlicher Ursachen. Dies bezeichnet man als Klimawandel. Der derzeit stattfindende Klimawandel wird maßgeblich durch die Emission von anthropogenen Treibhausgasen verursacht, deren Zunahme einen größeren Verbleib von Energie in der Atmosphäre und damit eine Erwärmung hervorruft. Der derzeitige, menschengemachte Klimawandel unterscheidet sich von vergangenen Klimaänderungen dadurch, dass die Geschwindigkeit der Änderungen sehr groß ist (Pachauri, et al., 2014). Vergangene Klimaänderungen haben sich in der Regel über Tausende Jahre erstreckt, weil sie durch langsame Änderungen im Kohlenstoffkreislauf und der Sonneneinstrahlung verursacht worden sind (Quintero & Wiens, 2013).

- **Warum werden die Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt untersucht?**

Die Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt zeigen sich unter anderem durch ein verstärktes Auftreten von Wetterextremen wie Hitzewellen, sehr milden Wintern, Dürreperioden und Starkregenfällen. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf gesellschaftliche Bereiche wie Landwirtschaft, Gebäude, Infrastruktur, Energieerzeugung usw. untersuchen und Anpassungsmaßnahmen durchführen zu können, müssen die Änderungen des Klimas in Sachsen-Anhalt bekannt sein.

- **Welche Aussagen können mit den Ergebnissen dieser Studie getroffen werden?**

Sowohl auf Landesebene, als auch auf regionaler Ebene ist es erstmals möglich, statistisch gesicherte Wertebereiche für zu erwartende Klimaänderungen abzuschätzen. Deshalb kann diese Studie als Grundlage für weitere Arbeiten dienen. Die Ergebnisse der Klimamodellauswertung für Sachsen-Anhalt beziehen sich auf die Änderungen der Mittelwerte der Klimaelemente sowie auf die Zu- oder Abnahme von Belastungen wie Hitze oder Trockenheit als Folge des Klimawandels.

- **Welche Aussagen können mit den Ergebnissen dieser Studie nicht getroffen werden?**

Über die Änderungen von Extremwerten, insbesondere in Bezug auf Niederschlagsereignisse können nur begrenzte Aussagen getroffen werden.

- **Warum ist es wichtig den zukünftigen Klimazustand zu kennen?**

Die Erwärmung durch den menschengemachten Klimawandel wird weitere Änderungen zur Folge haben, die sich auf andere Klimaelemente wie Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Bewölkungsverhältnisse auswirken werden. Da diese Klimaelemente für verschiedene Aktivitäten von erheblicher Bedeutung sind, ist es wichtig, die Änderung der Klimaelemente abzuschätzen. Die Kenntnis der Bandbreite der möglichen Änderungen des Klimas in Sachsen-Anhalt stellt die Grundlage für Arbeiten dar, welche die Folgen des Klimawandels untersuchen.

- **Wie hat sich der Klimawandel bisher auf Sachsen-Anhalt ausgewirkt?**

Der Monitoringbericht des Landesamtes für Umwelt (LAU) (Unglaube & Wollmert, 2020) sowie eine Vorstudie zur Untersuchung von Änderungen des Klimas in der Zeit von 1951-2014 (Spekat, Einnfalt, & Jackisch, 2016) haben ergeben, dass bereits eine deutliche Erwärmung von etwa 1,4 Kelvin seit 1951 stattgefunden hat und der Trend zum Anstieg weiter anhält. Entsprechend ist ein Rückgang von Eistagen, Frosttagen und Tagen mit Schneedecke in Sachsen-Anhalt sowie eine Zunahme von Sommer- und Hitzetagen sowie der Anzahl und Länge von Hitzeperioden zu registrieren. Bezüglich des Niederschlages konnten keine gravierenden Änderungen festgestellt werden. Jedoch nimmt die Verdunstung zu, was sich seit einigen Jahren durch Dürreereignisse und ein Absinken des Grundwasserspiegels äußert (Unglaube & Wollmert, 2020).

- **Was wissen wir bereits über zukünftige Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt?**

Studien zukünftigen Klimafolgen wurden in den Jahren 2013 (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012; Pfützner, Klöcking, Schumann, & Hesse, 2013), und 2017 (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017) erstellt. Diese kamen zu dem Ergebnis, dass die Erwärmung weiter anhalten wird. Bezüglich des Niederschlages sind aus diesen Arbeiten keine eindeutigen Rückschlüsse abzuleiten. Tendenziell nimmt die Gefahr von Starkregenereignissen zu, vor allem lokale Gewitter im Sommer. Kältewellen und Schneefälle nehmen deutlich ab und Hitzewellen werden häufiger.

- **Welchen Anlass gibt es für diese Studie?**

Die erwähnten Vorstudien stützen sich auf lediglich eine oder zwei Klimaprojektionen und sind daher mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies betrifft insbesondere die Aussage zur Zunahme von Starkregen bei Gewittern im Sommer, da sich die Bedingungen zur Bildung für solche Wettererscheinungen zwischen unterschiedlichen Projektionen möglicherweise erheblich unterscheiden. Mit den neueren Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 sowie den regionalisierten Klimaprojektionen des CORDEX Projektes (Jacob, et al., 2014) ist eine

größere Datenbasis verfügbar. Die regionalisierten Klimaprojektionen wurden einer ausführlichen Qualitätsprüfung unterzogen (Struve, et al., 2020). Im Ergebnis stehen jetzt 17 Projektionen für das RCP2.6 und 25 Projektionen für das RCP8.5 bereit. Dabei wurde ein Kernensemble von jeweils sieben Projektionen ausgewählt, das die Bandbreite der Klimaelemente mit einer geringeren Anzahl an Projektionen wiedergibt (Struve, et al., 2020). Mit einer größeren Datenbasis kann die Bandbreite und damit die Unsicherheit der Klimaänderungen besser eingeordnet werden.

3. Temperaturänderungen

Die zukünftigen Temperaturänderungen werden gegenüber der Referenzperiode deutlich ausfallen. Selbst unter den Bedingungen des RCP2.6 mit konsequentem globalen Klimaschutz wird die Erwärmung für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 etwa +1,5 Kelvin (+1,1 ... +2,1 Kelvin) betragen. Die Erwärmung seit 1990 beträgt etwa 1 Kelvin (Unglaube & Wollmert, 2020) Die Erwärmung im RCP2.6 hält bis in die nahe Zukunft an. Anschließend stabilisiert sich das Temperaturniveau in der fernen Zukunft bei +1,6 K (+1,1 ... +2,2 K) gegenüber der Referenzperiode (siehe Abbildung 1). Unter den Bedingungen des RCP8.5 ohne globale Klimaschutzanstrengungen wird sich die Jahresmitteltemperatur bis in die nahe Zukunft um etwa +1,9 K (+1,5 ... +2,4 K) erhöhen. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird die Temperatur im Vergleich zum Zeitraum 2021-2050 um etwa weitere +2,3 K ansteigen, was einer Erwärmung von +4,2 K (+3,2 ... +5,2 K) im Jahresmittel gegenüber 1961-1990 entspricht. Die Erwärmung setzt sich unter der Annahme des RCP8.5 nicht nur fort, sondern beschleunigt sich noch im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Die Erwärmung ist in beiden Klimaszenarien und Zukunftszeiträumen über die gesamte Fläche von Sachsen-Anhalt gleichmäßig verteilt und auch im Jahresverlauf ähnlich stark. Der Erwärmung im Frühjahr ist etwas weniger stark, während die Temperatur im Sommer etwas deutlicher zulegt, um etwa jeweils 0,2-0,4 K im Vergleich zum Jahresmittel und noch stärker im Zeitraum 2071-2100 unter den Voraussetzungen des RCP8.5. Die sommerliche Erwärmung ist im RCP8.5 im Zeitraum 2071-2100 sehr stark ausgeprägt und beträgt im Mittel +5,5 K (+3,5 ...+7,1 K) gegenüber der Referenzperiode. Tabelle 1 bietet eine Zusammenfassung der wichtigsten Klimaänderungen in Bezug auf Kenngrößen im Umfeld der Temperatur.

Tabelle 1: Temperaturkenngößen: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.

Klimakenngröße	RCP2.6 2021-2050	RCP8.5 2021-2050	RCP2.6 2071-2100	RCP8.5 2071-2100
Mittelwert und wahrscheinliche Bandbreite				
T _{mit} , Jahresmittel	+1,5 K (+1,1 ... +2,1 K)	+1,9 K (+1,5 ... +2,4 K)	+1,6 K (+1,1 ... +2,2 K)	+4,2 K (+3,2 ... +5,2 K)
Maximales Jährliches T _{max}	+2,0 K (+0,8 ... +3,3 K)	+2,0 K (+1,3 ... +3,1 K)	+1,9 K (+1,2 ... +3,2 K)	+5,9 K (+3,1 ... +9,5 K)
Minimales Jährliches T _{min}	+2,1 K (+1,4 ... +3,1 K)	+3,0 K (+1,8 ... +4,2 K)	+2,2 K (+1,6 ... +3,1 K)	+6,0 K (+4,5 ... +7,8 K)
Anzahl der jährlichen Eistage, T _{max} < 0 °C	-11 (-14 ... -9)	-13 (-16 ... -10)	-12 (-14 ... -9)	-22 (-23 ... -20)
Anzahl der jährlichen Hitzetage, T _{max} ≥ 30 °C	+8 (+3 ... +13)	+9 (+4 ... +18)	+8 (+4 ... +14)	+32 (+17 ... +60)
Länge der thermischen Vegetationsperiode	+28 Tage (+20 ... +39 Tage)	+35 Tage (+26 ... +41 Tage)	+29 Tage (+22 ... +35 Tage)	+75 Tage (+70 ... +84 Tage)
Beginn der thermischen Vegetationsperiode	-18 Tage (-24 ... -12 Tage)	-23 Tage (-28 ... -14 Tage)	-19 Tage (-23 ... -15 Tage)	-47 Tage (-54 ... -43 Tage)

Unter den zukünftigen Klimabedingungen wird Sachsen-Anhalt einer wärmeren Klasse der gemäßigten Klimazone zugeordnet. Die Klimazonen verschieben sich nach Norden. Sachsen-Anhalt wandert im Vergleich zu den heutigen Temperaturbedingungen in Zukunft südwärts bezüglich des Temperaturklimas. Die Bedingungen - bezüglich Temperatur - des RCP2.6 entsprechen etwa denjenigen in Nordfrankreich, während im RCP8.5 Sachsen-Anhalt im Zeitraum

2021-2050 etwa nach Norditalien wandert und bis zum Ende des Jahrhunderts der Sizilien erreicht wird.

Die Klimamodelle stimmen darin überein, dass eine Erwärmung stattfinden wird und die Unsicherheitsbereiche für das RCP2.6 und die nahe Zukunft im RCP8.5 relativ klein sind. Diese Unsicherheiten sind kleiner als die Standardabweichung der jährlichen Mitteltemperaturen, die ein ungefähres Maß für die Variabilität der Jahresmitteltemperatur darstellt. Am Ende des Jahrhunderts vergrößert sich die Streuung im RCP8.5 deutlich. Dies wird dadurch verursacht, dass die Repräsentation des Klimasystems in den Modellen unvollständig ist und in manche Modelle Effekte wie das Schmelzen der Permafrostböden oder die Freisetzung von am Meeresboden gebundenen Methanvorräten nicht berücksichtigen können. Solche als Kippunkte bezeichneten Prozesse verursachen einen großen Teil der Unsicherheit, was im Umkehrschluss bedeutet, dass im RCP8.5 möglicherweise solche Kippunkte überschritten werden und die Auswirkungen auf das Klimasystem nicht absehbar sind.

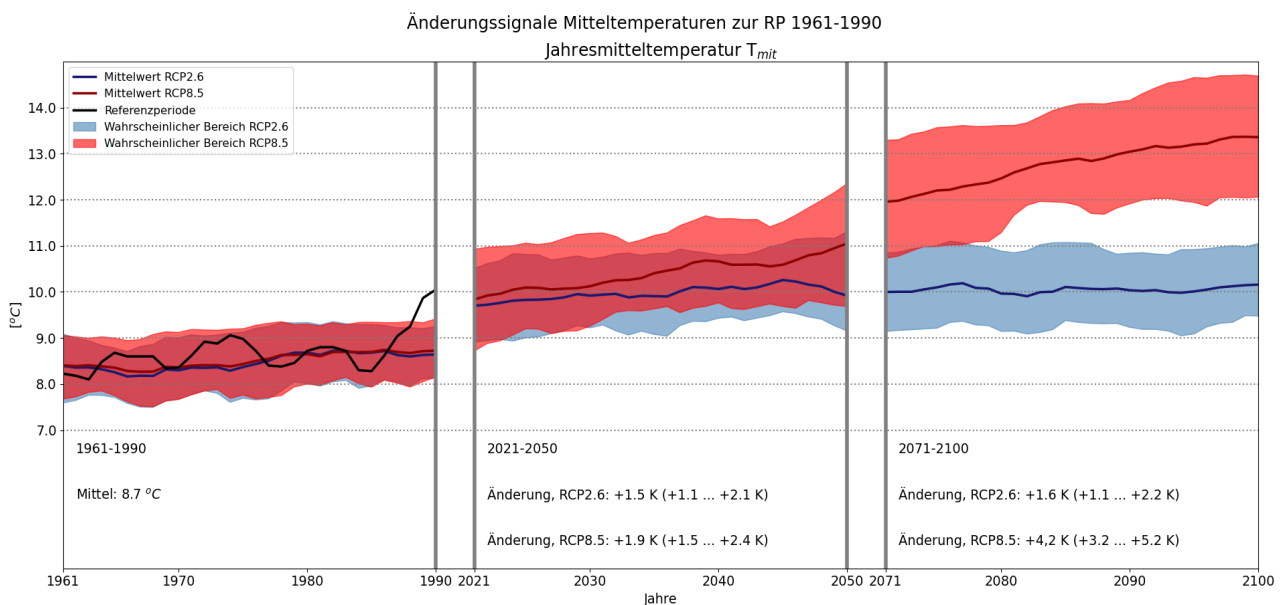


Abbildung 1: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der Jahresmitteltemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Anhand der in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Erwärmung des Klimas über das Temperaturspektrum hinweg nicht gleichmäßig erfolgt. Die Erhöhung der Maximaltemperaturen ist im RCP2.6 etwa 1 K und im RCP8.5 sogar bis zu 2 K stärker ausgeprägt als die Erwärmung der Mitteltemperaturen. Die tiefen Extremtemperaturen erhöhen sich um etwa 0,5 K mehr als die hohen Extremtemperaturen.

Viele Menschen erinnern sich an die Kältewelle und den Wintereinbruch Ende des Jahre 1978 , oder an die teilweise vereiste Elbe im Winter 1995/96 - als jüngstes Ereignis sticht der Wintereinbruch im Februar 2021 hervor. Der Klimawandel wird dazu führen, dass solche Ereignisse seltener werden.

Die Änderungen der Kenngrößen, die mit dem unteren Bereich des Temperaturspektrums in Verbindung gebracht werden, sind exemplarisch für die Eistage in Abbildung 2 dargestellt. Die Anzahl der Eistage geht im RCP2.6 um etwa 11-12 oder 40 % zurück, im RCP8.5 werden in der nahen Zukunft zunächst 13 Eistage weniger auftreten (-50 %) und bis zum Ende des Jahrhunderts wird sich die Anzahl um 22 Tage oder 85 % verringern. Für Nächte mit Frost und strengem Frost gilt ähnliches, auch die Anzahl der Heizgradtage - ein Maß für die Aufwendungen für Heizenergie - geht ebenfalls deutlich zurück. Die Unsicherheitsbereiche sind für diese Parameter überraschend klein und das bedeutet, dass die Änderungen im Winterklima als relativ gut gesichert angesehen werden können. Im Harz ist die absolute Abnahme der Kenngröße für kalte Temperaturen deutlich größer, jedoch stimmen relativ betrachtet diese Änderungen mit denen in anderen Regionen überein. Der Anstieg der Minimaltemperaturen und eine geringere Anzahl an Eis- und Frosttagen bedeutet auch, dass die Anzahl der Schneedeckentage in allen Höhenlagen drastisch abnehmen wird.

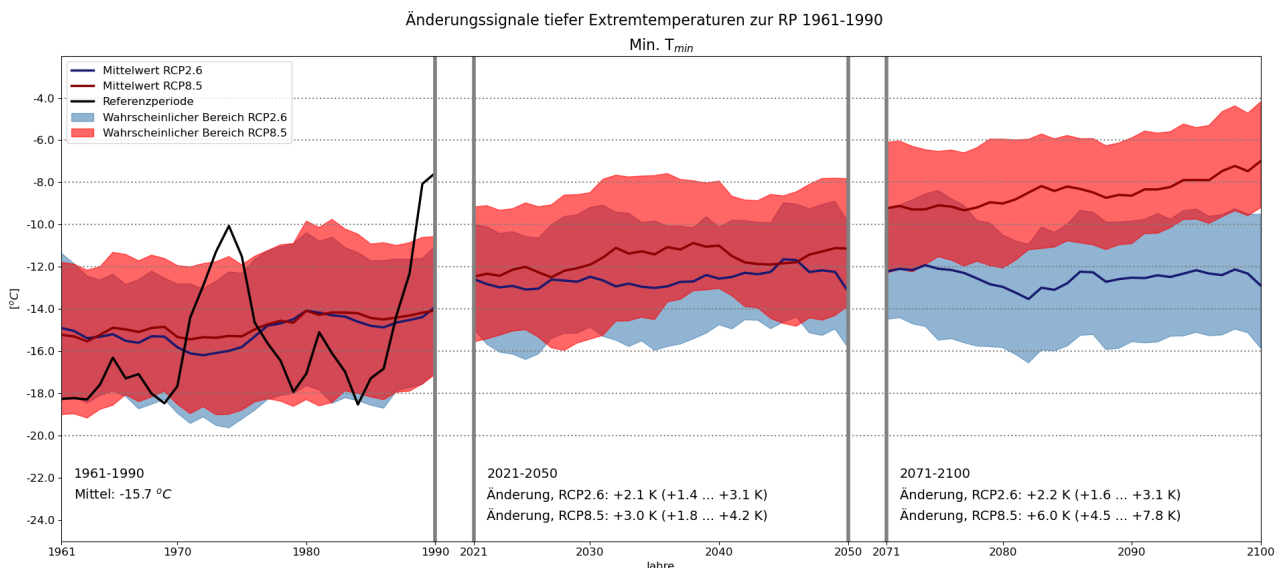


Abbildung 2: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der jährlichen Tiefsttemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Hitze

Hitzewellen sind in der Berichterstattung und im Bewusstsein der Menschen mittlerweile fest verankert, insbesondere seit im Jahr 2019 die Tageshöchsttemperatur von 40 °C an mehreren Orten und an mehreren Tagen in Deutschland überschritten bzw. knapp erreicht wurde (Bernburg (Saale): 39,6 °C). Wie bereits erwähnt, fällt die Erwärmung im Sommer in beiden Klimaszenarien etwas stärker aus als im Jahresmittel. Zusätzlich steigen die Tageshöchsttemperaturen noch etwas stärker an als die Mitteltemperaturen, was einen stärkeren Tagesgang der Temperatur zur Folge hat.

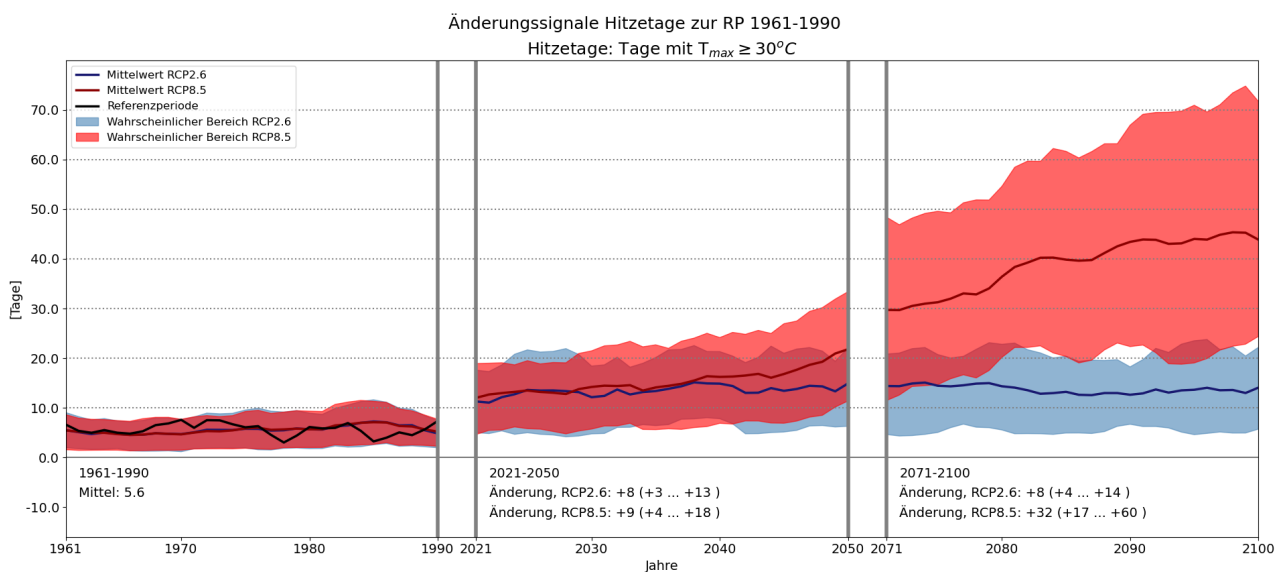


Abbildung 3: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der Anzahl der jährlichen Hitzetage für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Die Änderungen der Kenngrößen, die mit den Themen Wärme, Hitze und Sommer verbunden werden, sind in Tabelle 1 sowie den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Die mittlere maximale Temperatur steigt im RCP8.5 teilweise im Mittel auf bis zu über 40 °C die Anzahl der Sommertage nimmt im Extremfall auf bis zu 90 im Mittel zu und die Anzahl der Hitzetage vervielfacht sich im RCP8.5 in der fernen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990. Stellt man die Kenngrößen dar, welche die Hitzebelastung abbilden - das sind die Anzahl der Tage mit starker Hitzebelastung und die Anzahl der Kühlgradtage - dann ist festzustellen, dass sich das Hitze-Klima in Sachsen-Anhalt deutlich ändern wird. Tage mit starker Hitzebelastung - in der Referenzperiode praktisch nicht vorhanden - nehmen im RCP2.6 moderat und im RCP8.5 sehr deutlich zu, das gleiche trifft auf die Kühlgradtage zu, die ein Maß für Aufwendungen zur Kühlung von Gebäuden darstellen. Die Schwankungsbreite der Kenngrößen zur Hitzebelastung ist relativ groß, besonders

im RCP8.5, wo teilweise Erwärmungsraten von nahe +10 K bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im wahrscheinlichen Bereich für die mittlere jährliche maximale Temperatur auftreten.

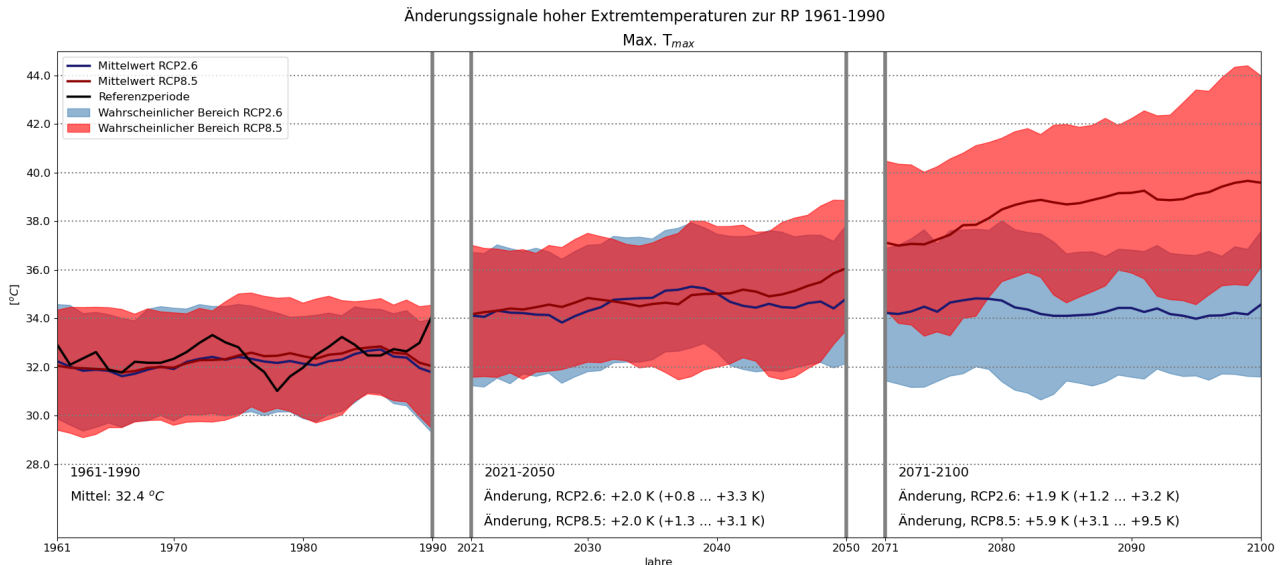


Abbildung 4: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der jährlichen Höchsttemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Vegetation

Die Vegetationsperiode ist für Sachsen-Anhalt ein wichtiger Bestandteil des Klimas, da viele Regionen von der Land- und Forstwirtschaft geprägt sind. Die Änderungen der Kenngrößen der klimatologischen Vegetationsperiode sind in Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Die Länge der Vegetationsperiode verändert sich durch den Klimawandel deutlich, im RCP8.5 können in Extremfällen sogar Jahre mit durchgehender Vegetationsperiode auftreten, da die Länge der thermischen Vegetationsperiode von Jahr zu Jahr stark schwankt. Unter Annahme des RCP2.6 verlängert sich die Vegetationsperiode um etwa +28 bis +29 (+20 ... +39) Tage gegenüber der Referenzperiode in beiden Zukunftszeiträumen und unter den Bedingungen des RCP8.5 verlängert sich die thermische Vegetationsperiode um +35 (+26 ... +41) Tage im Zeitraum 2021-2050 sowie +76 (+70 ... +84) Tage im Zeitraum 2071-2100.

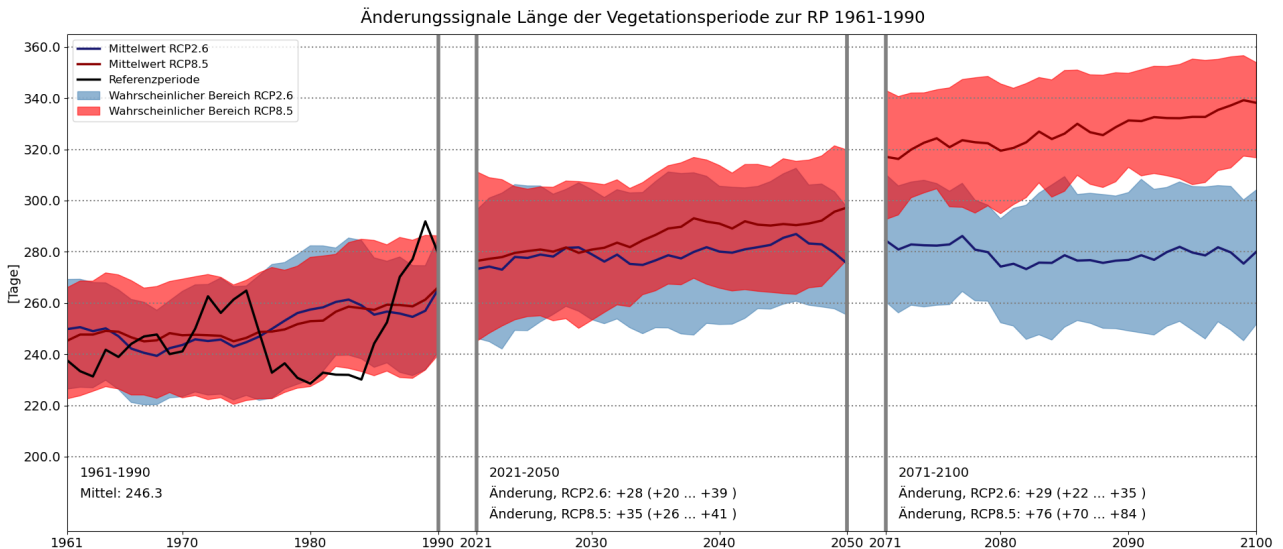


Abbildung 5: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der Länge der thermischen Vegetationsperiode für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsens-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Gleichzeitig verkürzt sich die Länge der Ruheperiode deutlich und der Beginn der Vegetationsperiode verschiebt sich im RCP2.6 von Mitte März in der Referenzperiode in den späten Februar und im RCP8.5 in den späten Januar bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Da gleichzeitig die Erwärmung des Frühlings am geringsten ausfällt und außerdem die Tagestiefsttemperaturen weniger von der Erwärmung betroffen sind als die Mittel- oder Höchsttemperaturen, besteht eine größere Wahrscheinlichkeit für Spätfröste, welche erhebliche Schäden in der Land- und Forstwirtschaft verursachen können.

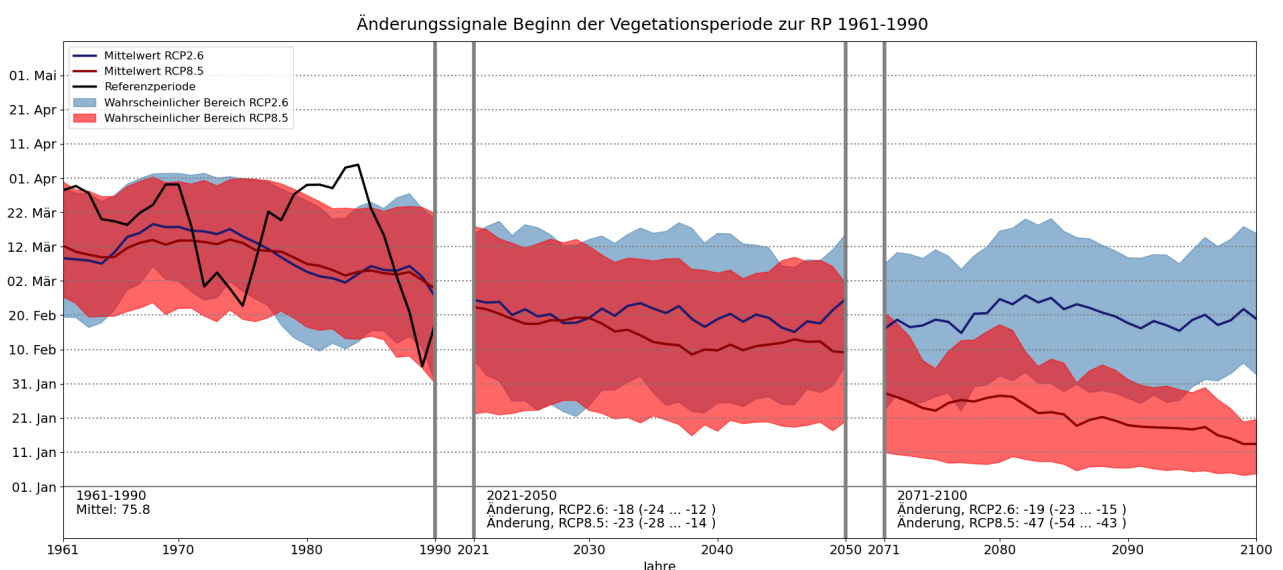


Abbildung 6: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des Beginns der thermischen Vegetationsperiode für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsens-Anhalts

der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

4. Niederschlagsänderungen

Die Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen ist unsicher, da im Verlauf der Jahreszeiten gegensätzliche Änderungssignale durch die Klimaprojektionen berechnet werden. Anhand der weiten Streuung des wahrscheinlichen Bereichs und auch der bereits geglätteten Verläufe der Jahresniederschläge aus den HYRAS-Daten in der Referenzperiode ist in Abbildung 7 erkennbar, dass die Variation des Niederschlags von Jahr zu Jahr sehr groß ist. Insgesamt ist eine leichte Zunahme der jährlichen Niederschlagsmenge von etwa +20 mm in allen Zeiträumen und Klimaszenarien zu erkennen. Der wahrscheinliche Bereich der Bandbreite der Änderungssignale ist im RCP8.5 deutlich größer, besonders in der fernen Zukunft, wo die Bandbreite im RCP8.5 teilweise mehr als doppelt so groß ist wie im RCP2.6.

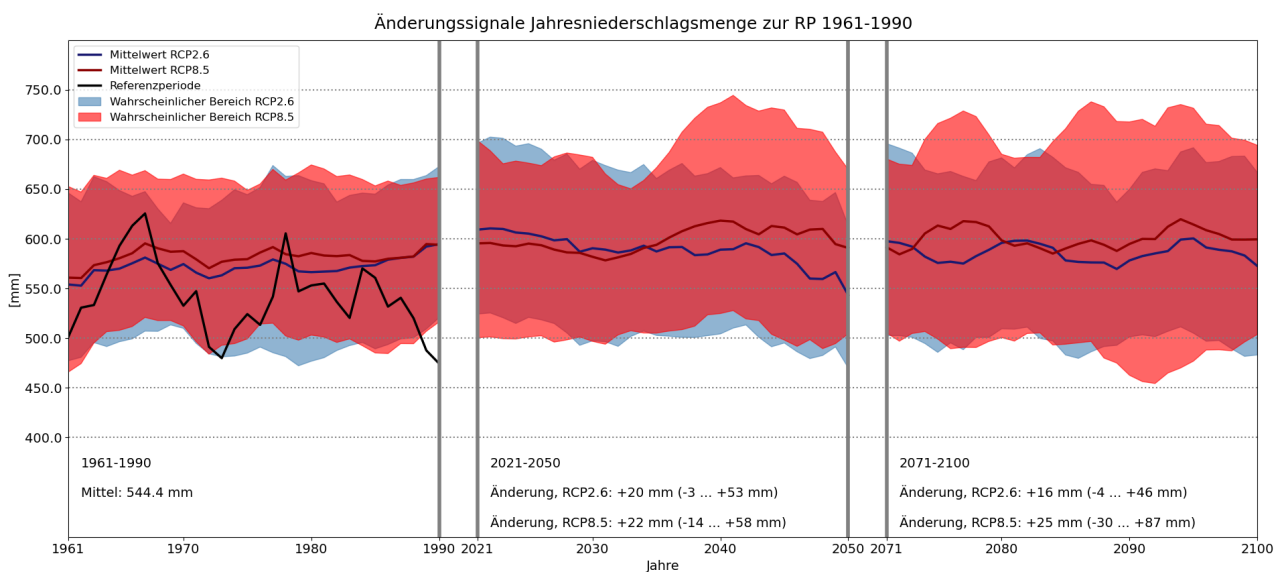


Abbildung 7: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des Jahresniederschlags für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Da auch negative Änderungssignale in der wahrscheinlichen Bandbreite enthalten sind und die Änderungssignale statistisch nicht robust sind, ist eine Aussage, ob sich die Jahresniederschlagsmenge signifikant ändert, schwierig. Wahrscheinlich dürfte diese Änderung durch den Klimawandel im Vergleich zur Streuung der Mengen zwischen einzelnen Jahren gering ausfallen.

Generell ist der Parameter Niederschlag für numerische Modelle schwierig zu erfassen, da die Prozesse der Niederschlagsbildung in einem Teil der Atmosphäre ablaufen, aus dem keine regelmäßigen Messungen vorliegen. Daher sind die genauen Vorgänge und Einflussgrößen nicht genau bekannt. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Annahmen in den Modellen über die

Bildung von Niederschlägen getroffen. In Tabelle 2 sind die wesentlichen Änderungssignale von Niederschlagskenngrößen dargestellt.

Tabelle 2: Niederschlagskenngrößen: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.

Klimakenngröße	RCP2.6 2021-2050	RCP8.5 2021-2050	RCP2.6 2071-2100	RCP8.5 2071-2100
Mittelwert und wahrscheinliche Bandbreite				
Jahresniederschlag	+20 mm (-3 ... +53 mm)	+22 mm (-14 ... +58 mm)	+16 mm (-4 ... +46 mm)	+25 mm (-30 ... +87 mm)
Winterniederschlag	+11 mm (+5 ... +18 mm)	+15 mm (+4 ... +26 mm)	+10 mm (+2 ... +14 mm)	+28 mm (+14 ... +36 mm)
Sommerniederschlag	-10 mm (-23 ... +4 mm)	-11 mm (-28 ... +6 mm)	-7 mm (-22 ... +10 mm)	-31 mm (-64 ... +8 mm)
Maximaler 5-Tagesniederschlag	-0 mm (-5 ... +3 mm)	+1 mm (-2 ... +6 mm)	+0 mm (-2 ... +2 mm)	+3 mm (-4 ... +10 mm)
Starke Niederschlagsmenge	+3 mm (-3 ... +10 mm)	+8 mm (-2 ... +19 mm)	+3 mm (-4 ... +12 mm)	+17 mm (-6 ... +37 mm)
Tage mit moderater Dürre ($SPI_{90} \leq -1$)	+0 (-5 ... +8)	+2 (-7 ... +9)	+1 (-5 ... +6)	+13 (-3 ... +36)
Tage mit moderater Nässe ($SPI_{90} \geq +1$)	+11 (-2 ... +21)	+13 (+2 ... +29)	+12 (+2 ... +29)	+27 (+11 ... +47)
Anzahl von Perioden mit mindestens 10 Trockentagen ($P < 1$ mm)	+1 (-1 ... +2)	+1 (-0 ... +3)	+1 (-1 ... +3)	+5 (+0 ... +8)
Jahressaldo Klimatische Wasserbilanz	-34 mm (-79 ... +13 mm)	-44 mm (-118 ... +24 mm)	-38 mm (-77 ... +9 mm)	-128 mm (-258 ... -12 mm)

Winter

Die Änderungen der Niederschläge im Winter sind in Abbildung 8 dargestellt. Insgesamt zeigt sich ein Trend zunehmender Niederschläge, der auch statistisch in beiden Szenarien robust, jedoch unterschiedlich ausgeprägt ist. Im RCP2.6 nimmt die Niederschlagsmenge von Dezember bis Februar um etwa +11 mm (+5 ... +18 mm) bzw. +10 % (+4 % ... +15 %) gegenüber der Referenzperiode zu. Die Zunahme ist nahezu gleich für die beiden betrachteten Zukunftszeiträume. Die Änderung der winterlichen Niederschlagsmengen setzt sich im RCP2.6 nach dem Jahr 2050 nicht fort.

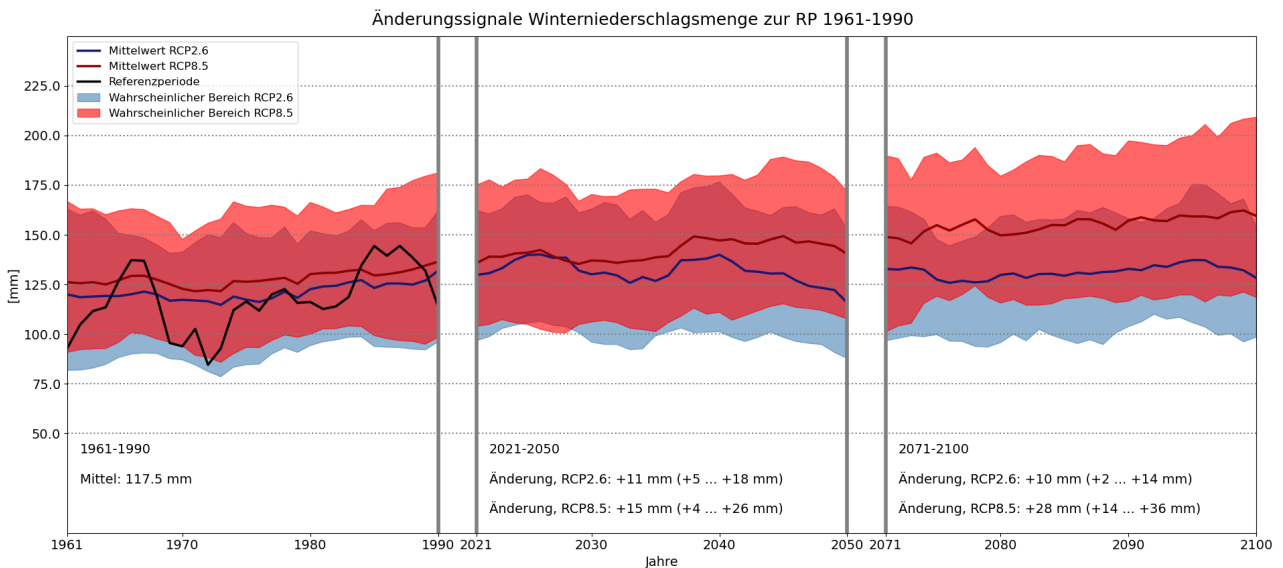


Abbildung 8: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des Winterniederschlags für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Unter den Voraussetzungen des RCP8.5 nimmt der winterliche Niederschlag zunächst um +15 mm (+4 ... +26 mm) bzw. um +13 % (+3 ... +22 %) bis zum Zeitraum 2021-2050 zu. Bis zum Zeitraum 2071-2100 nimmt der Winterniederschlag weiter zu, gegenüber der Referenzperiode um +28 mm (+14 ... +36 mm) bzw. um +24 % (+12 ... +32 %). Diese Zunahme ist wahrscheinlich dadurch bedingt, dass die wärmere Luft mehr Wasserdampf aus der Verdunstung über wärmeren Meeresoberflächen aufnehmen kann und mit größeren Wassermengen beladen Sachsen-Anhalt erreicht. Möglicherweise spielt die Änderung der winterlichen Zirkulation eine Rolle, da die Anzahl der winterlichen Niederschlagstage leicht zunimmt (Abb. 9).

Änderungssignal Niederschlagstage mit $P \geq 1$ mm zur RP 1961-1990

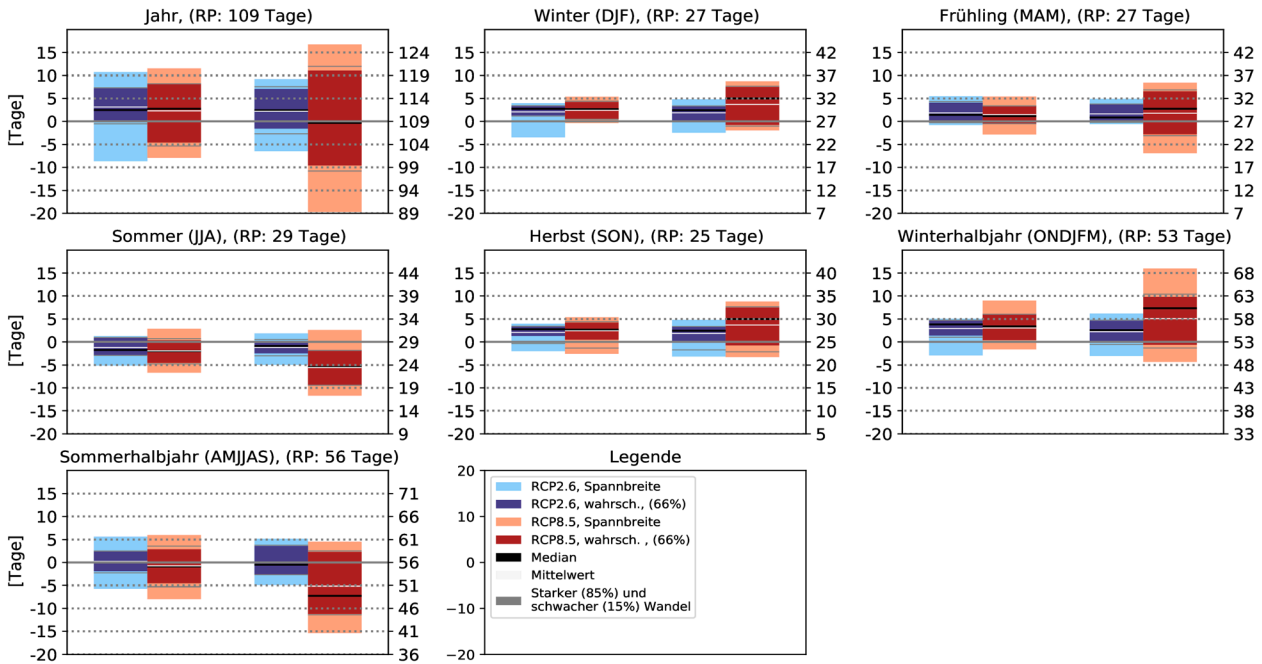


Abbildung 9: Änderung des Landesmittels der Niederschlagstage mit mindestens 1 mm Tagesniederschlag für das Gesamtjahr und die Jahreszeiten. Für die nahe Zukunft jeweils links und die ferne Zukunft rechts.

Sommer

Die Niederschläge im Sommer ändern sich ebenfalls, und zwar in die entgegengesetzte Richtung der Winterniederschläge (Abbildung 10). Der Rückgang der Niederschlagsmengen liegt im RCP2.6 bei unter 7 % und ist damit im Vergleich zur jährlichen Variabilität relativ gering. Aus diesem Grund ist das Änderungssignal für den Sommerniederschlag im RCP2.6 statistisch nicht robust, eine bedeutsame Änderung eher unwahrscheinlich. Ganz anders im RCP8.5, unter dessen Bedingungen die Abnahme zunächst -11 mm (-28 ... +6 mm) betragen würde bis in den Zeitraum 2021-2050 und sich auf -31 mm (-64 ... +8 mm) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verschärfen würde. Aufgrund der Tatsache, dass auch positive Änderungssignale im wahrscheinlichen Bereich der Bandbreite enthalten sind, ist eine klare Aussage bezüglich der Änderungssignale der sommerlichen Niederschläge schwierig. Da die negativen Änderungssignale insgesamt in Anzahl und Deutlichkeit überwiegen, ist eine Abnahme der Niederschläge im Sommer wahrscheinlicher als eine Zunahme. In dieser Betrachtung sind Starkregenereignisse nicht berücksichtigt, da die untersuchten Klimaprojektionen solche Ereignisse nicht hinreichend auflösen können.

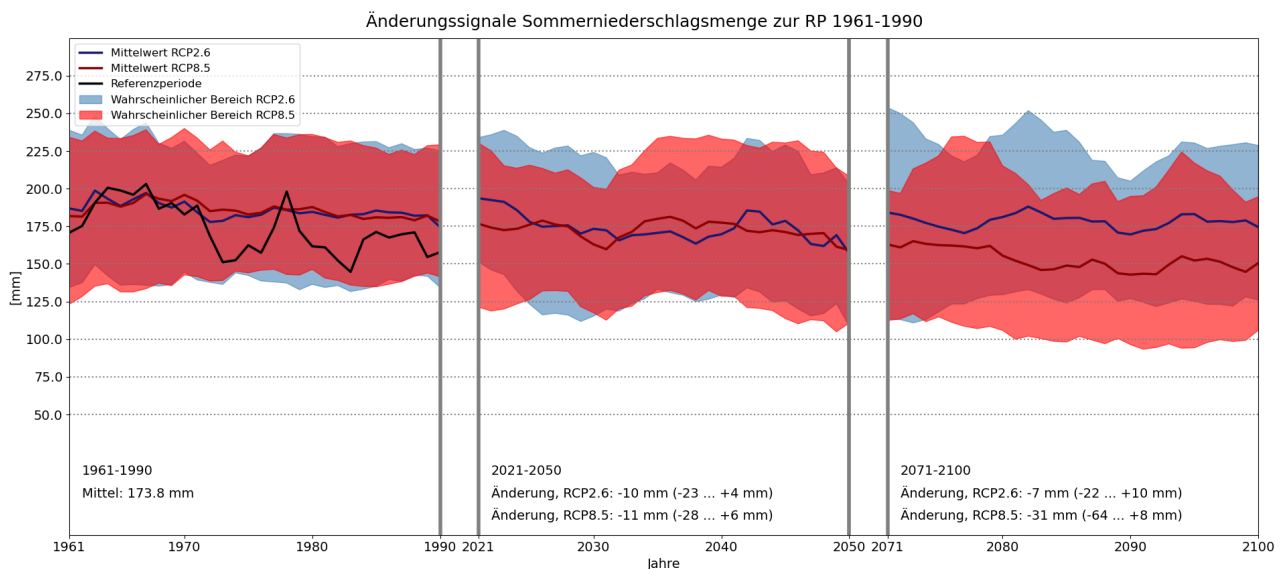


Abbildung 10: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des Sommerniederschlags für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Neben der Menge der sommerlichen Niederschläge wird im RCP8.5 wahrscheinlich die Anzahl der Tage mit Niederschlag über 1 mm etwas zurückgehen, wobei sich das Änderungssignal in der Zukunft mit voranschreitender Erwärmung verstärkt (Abb. 9). Die geringere Anzahl von Niederschlagstagen ist möglicherweise auf eine Veränderung der sommerlichen Zirkulation mit einer nördlicheren Lage der Druckgebiete zurückzuführen. Dies bedeutet, dass die subtropische Hochdruckzelle, welche normalerweise über dem Mittelmeerraum liegt, verstärkt Einfluss auf Mitteleuropa nimmt. Im RCP2.6 ist die Änderung der Niederschlagstage wahrscheinlich unbedeutend.

Starkregen

Starkregenereignisse können als kurzzeitige, konvektive Regengüsse auftreten und lokal schwere Schäden anrichten oder auch großräumig in der Regel über einige Tage hinweg durch anhaltende Regenfälle zu regionalen Hochwassern führen. Beispiele für solche Hochwasserereignisse in Sachsen-Anhalt sind das „Jahrhunderthochwasser“ aus dem Jahr 2002 und auch das Hochwasser aus dem Sommer 2013 oder das Hochwasser zu Beginn des Jahres 2011. Solche Ereignisse können mit der Betrachtung der 5-tägigen Niederschlagssumme erfasst werden. In diesem Projekt wurde das mittlere jährliche Maximum der 5-tägigen Niederschlagssumme untersucht und ist in Abbildung 11 dargestellt. Für die Klimaprojektionen des RCP2.6 ist erkennbar, dass keine wesentliche Änderung projiziert wird. Im RCP8.5 findet im Mittel der Projektionen ein leichter

Anstieg gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 von +1 mm im Zeitraum 2021-2050 und +3 mm im Zeitraum 2071-2100 statt. Dies entspricht einer Erhöhung von etwa +2 % bzw. +6 % gegenüber der Referenzperiode. Die Tatsachen, dass auch negative Änderungssignale vorhanden sind und die Streuung groß ist unterstreichen die Unsicherheit in diesem Änderungssignal.

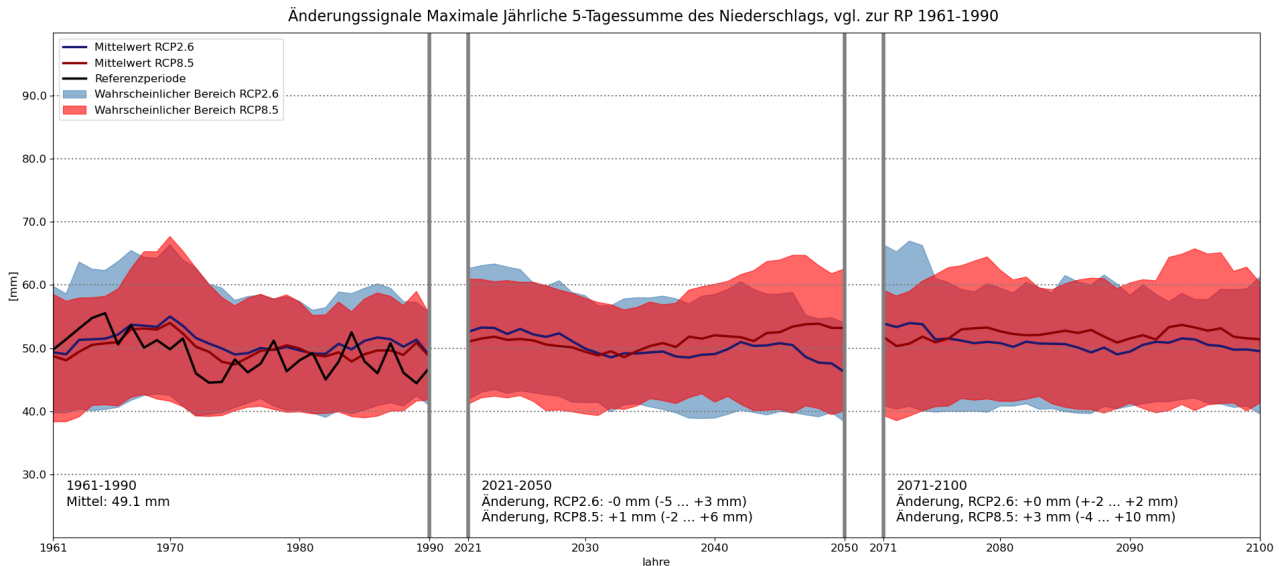


Abbildung 11: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des höchsten jährlichen 5-Tagesniederschlags für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Um große Niederschlagsmengen an einzelnen Tagen z.B. durch starke Gewittergüsse zu beurteilen, wird die Summe des Niederschlags an den Tagen betrachtet, an denen der Tagesniederschlag größer ist als an mindestens 95 % der gesamten Niederschlagstage. Dies wird als starke Niederschlagsmenge bezeichnet. Die Ergebnisse der Auswertung des Referenzensembles sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Änderungen der starken Niederschlagsmenge sind im Mittel für beide Klimaszenarien positiv, aber auch hier ist die Bandbreite sehr groß und durch das Vorhandensein von negativen Änderungen wird unterstrichen, dass große Unsicherheiten existieren. Ob diese Unsicherheiten durch die Repräsentation von Niederschlagsprozessen in den Modellen oder durch Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung der für Sachsen-Anhalt relevanten Wetterlagen verursacht wird, kann mit dieser Studie nicht beantwortet werden. Im RCP2.6 steigt die starke Niederschlagsmenge gegenüber der Referenzperiode um +3 mm (-3 ... +10 mm) bzw. +3 mm (-4 ... +12 mm) in den Zeiträumen 2021-2050 bzw. 2071-2100 an, dies entspricht im Mittel einem Anstieg um etwa +2 %. Unter den Bedingungen des RCP8.5 nimmt die starke Niederschlagsmenge zunächst um +8 mm (-2 ... +19 mm) zu bis zum Zeitraum 2021-2050, im Zeitraum 2071-2100 beträgt der Anstieg +17 mm (-6 ...

+37 mm) gegenüber der Referenzperiode. Die mittleren Anstiege im RCP8.5 entsprechen relativen Änderungen von +4 % bzw. +9 %.

Der Anstieg der starken Niederschlagsmenge fällt im Vergleich zum Anstieg der maximalen jährlichen 5-Tagesmenge deutlicher und eindeutiger aus. Im RCP2.6 findet nur ein Anstieg der starken Niederschlagsmenge statt. Dies deutet darauf hin, dass kurzzeitige starke Niederschlagsereignisse durch heftige, lokale Regengüsse deutlicher zunehmen werden als regionale Hochwasserlagen, wenn auch eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Richtung und eine große Unsicherheit bezüglich der Stärke der Änderung besteht. Ein Anstieg der Starkregenfälle ist konsistent mit der Erhöhung von Feuchte und Temperatur, die wiederum einen größeren Energiegehalt in der unteren Atmosphäre bedingen. Dass Perioden mit größeren Niederschlagsmengen zunehmen werden, ist auch an den Änderungen der Tage mit moderater Nässe zu erkennen (Tab. 2). Die Änderung dieser Kenngröße beträgt im RCP2.6 +11 Tage (-2 ... +21 Tage) für den Zeitraum 2021-2050 und +12 Tage (+2 ... +29 Tage) für den Zeitraum 2071-2100. Dies entspricht im Mittel einer Zunahme von +50 % bzw. +60 % gegenüber der Referenzperiode. Unter den Voraussetzungen des RCP8.5 nimmt die Anzahl der Tage mit moderater Nässe gegenüber der Referenzperiode um +13 Tage (+2 ... +29 Tage) in der nahen und +27 Tage (+11 ... +47 Tage) in der fernen Zukunft zu. In Relation zur Referenzperiode 1961-1990 beträgt die mittlere Zunahme +65 % in der nahen und +135 % in der fernen Zukunft. Angesichts der Zunahme von erhöhten Niederschlägen sind Perioden mit Überschüssen an Niederschlägen zu erwarten, wobei diese Zunahme sich auf das Winterhalbjahr beschränken dürfte.

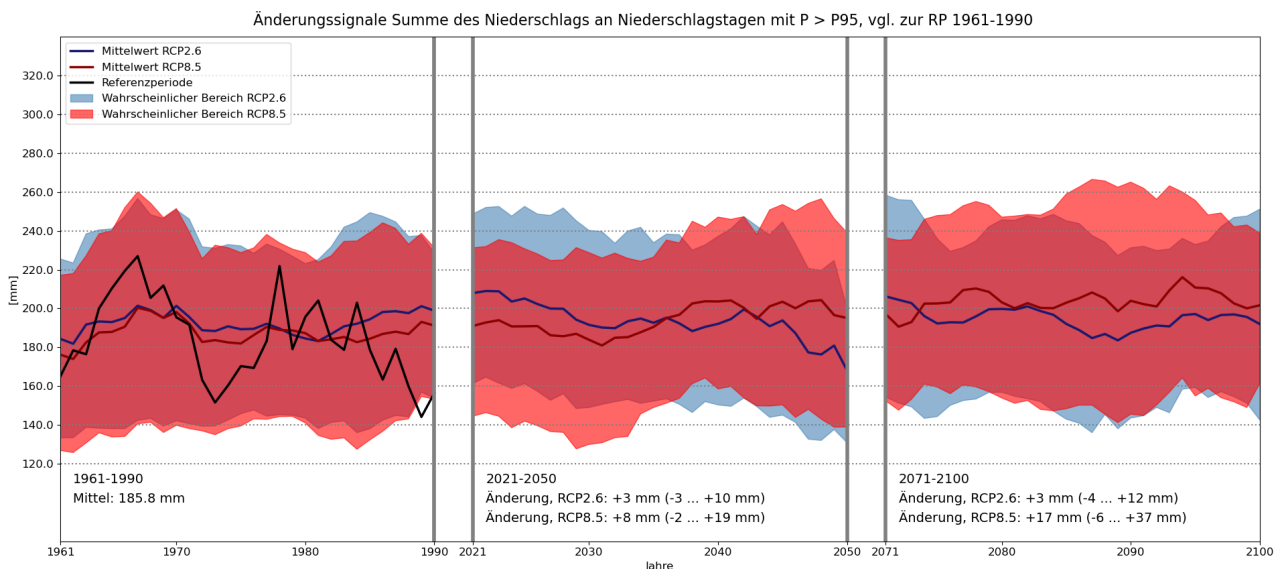


Abbildung 12: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der starken Niederschlagsmenge für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Da die Änderung von Starkregenfällen ein bedeutsamer Aspekt in der Klimafolgenforschung ist und die in dieser Studie verwendeten Datensätze und Methoden lediglich geeignet sind, mittlere Änderungen zu erfassen, Starkregenfälle jedoch Extremereignisse darstellen, ist eine Untersuchung mit vertieften methodischen Ansätzen empfehlenswert.

Dürre

In den letzten Jahren ist die große Vulnerabilität des Wasserhaushaltes in Sachsen-Anhalt deutlich geworden (Unglaube & Wollmert, 2020). Diese wird durch die geringen durchschnittlichen Niederschlagsmengen in großen Teilen des Landes bestimmt. Durch die Zunahme der Temperatur, kommt es zu deutlich größeren Verdunstungsraten, was bei gleichzeitig geringeren Niederschlagsmengen im Sommer über das Jahr hinweg zu einer Reduktion des Saldos der klimatischen Wasserbilanz (KWB) führt (Abb. 13). Die Reduktion der KWB beträgt im RCP2.6 etwa -34 mm (-79 ... +13 mm) in der nahen Zukunft und -38 mm (-77 ... +9 mm) in der fernen Zukunft. Unter den Bedingungen des RCP8.5 nimmt die KWB bis zum Zeitraum 2021-2050 um -44 mm (-118 ... +24 mm) ab, bis zum Zeitraum 2071-2100 verstärkt sich das Defizit der KWB gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 um -128 mm (-252 ... -12 mm). Für beide Klimaszenarien sind die Änderungssignale trotz der großen Bandbreite und teilweise positiver Änderungssignale robust.

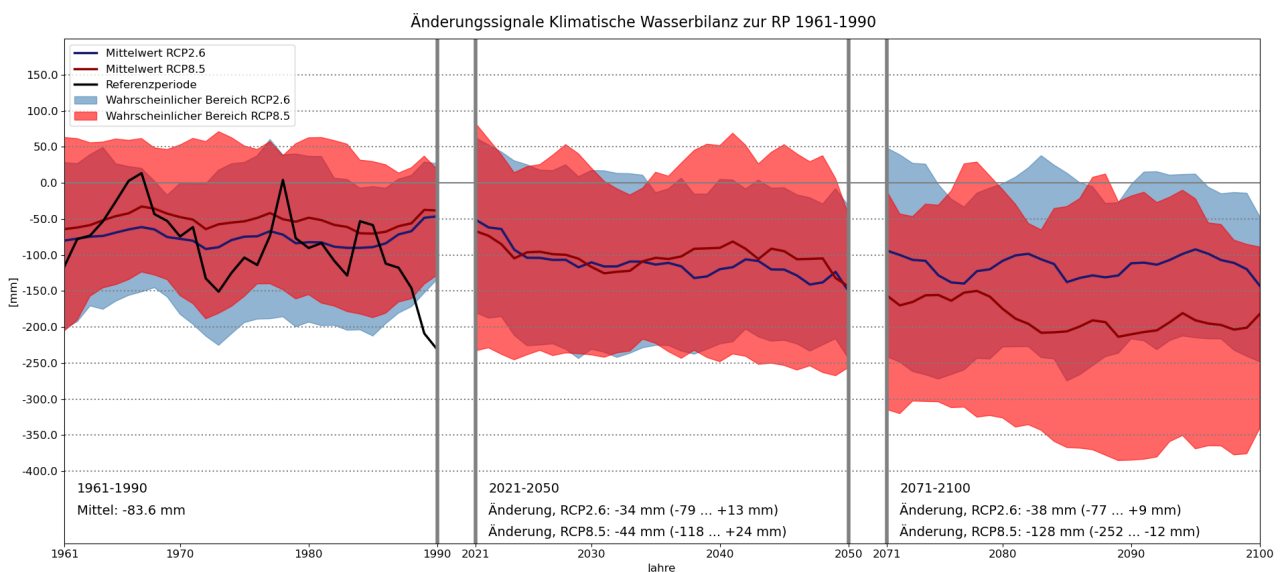


Abbildung 13: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels des jährlichen Saldos der Klimatischen Wasserbilanz für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

In Tabelle 3 sind die Änderungssignale weiterer Kenngrößen dargestellt. Die Anzahl der Tage mit moderater Dürre wird sich im RCP2.6 kaum ändern, während unter den Bedingungen des RCP8.5

eine zunehmende Tendenz erkennbar ist mit +2 Tagen (-7 ... +9 Tage) bis in die nahe und +13 Tagen (-3 ... +36 Tage) bis zur fernen Zukunft.

Diese Erhöhung entspricht relativ zur Referenzperiode 1961-1990 im Mittel +17 % bzw. +113 %. Auch die Anzahl von Perioden mit mindestens 10 trockenen Tagen in Folge nimmt zu, im RCP2.6 um etwa +1 (-1 ... +2) und im RCP8.5 zunächst um +1 (-0 ... +3) Perioden in der nahen Zukunft und +5 (+0 ... +8) Perioden in der fernen Zukunft (Tab. 2). Gegenüber der Referenzperiode entspricht dies im Mittel einer Zunahme von +15 % im RCP2.6 und in der Zeit von 2021-2050 im RCP8.5 sowie +74 % im Zeitraum 2071-2100 unter den Voraussetzungen des RCP8.5. Diese Änderungssignale sind für das RCP8.5 in der fernen Zukunft robust, während dies für den Zeitraum 2021-2050 sowie im RCP2.6 nicht der Fall ist. Eine Erhöhung der Häufigkeit und der Länge von Dürreperioden im RCP8.5 ist konsistent mit den zu erwartenden Verschiebungen der Druckgebilde nach Norden, was im Sommer dazu führen dürfte, dass die subtropische Hochdruckzelle mehr Einfluss auf die Wetterlagen in Sachsen-Anhalt haben dürfte und somit Niederschlagsbildung unterdrückt wird. Dass die Belastungen der Vegetation durch Trockenstress zunehmen ist daher zu erwarten und wird in Handlungsempfehlungen zur Auswahl von Baumarten bereits deutlich hervorgehoben (Hamkerns, Spellmann, Nagel, & Buresch, 2020).

5. Änderungen weiterer Klimaelemente

Das Klima wird auch durch weitere Klimaelemente charakterisiert, deren Änderungssignale auch im Rahmen dieser Studie untersucht worden sind. Im Folgenden werden dazu die Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung betrachtet. Die Änderungssignale sind wie bei allen anderen Kenngrößen für die Projektionen des RCP2.6 deutlich weniger stark ausgeprägt als für die Projektionen des RCP8.5.

Tabelle 3: Weitere Klimakenngrößen: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.

Klimakenngröße	RCP2.6 2021-2050	RCP8.5 2021-2050	RCP2.6 2071-2100	RCP8.5 2071-2100
Mittelwert und wahrscheinliche Bandbreite				
Winterliche, mittlere Windgeschwindigkeit	+0,05 m s⁻¹ (-0,01 ... +0,10 m s ⁻¹)	+0,10 m s⁻¹ (-0,02 ... +0,21 m s ⁻¹)	+0,02 m s⁻¹ (-0,07 ... +0,11 m s ⁻¹)	+0,21 m s⁻¹ (-0,01 ... +0,32 m s ⁻¹)
Sommerliche, mittlere Solarstrahlung	+4 W m⁻² (+0 ... +7 W m ⁻²)	+10 W m⁻² (-1 ... +22 W m ⁻²)	+3 W m⁻² (-1 ... +8 W m ⁻²)	+17 W m⁻² (+0 ... +48 W m ⁻²)
Winterliche, mittlere relative Luftfeuchtigkeit	-0,4 % (-0,6 ... +0,1 %)	-0,4 % (-1,0 ... +0,2 %)	-0,5 % (-0,8 ... +0,0 %)	-1,3 % (-2,1 ... -0,6 %)
Sommerliche, mittlere Taupunkttemperatur	+0,4 K (-0,4 ... +1,5 K)	+1,4 K (+1,2 ... +1,5 K)	+0,5 K (-0,3 ... +1,4 K)	+3,4 K (+2,9 ... 4,3 K)

Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit, welche das Verhältnis aus vorhandenem Wasserdampf und Aufnahmefähigkeit der Luft beschreibt, wird sich im Zuge des Klimawandels nur wenig verändern. Im Winter wird der Anstieg der Temperatur einen größeren Anstieg der Aufnahmekapazität der Luft bewirken, als der Anstieg des Wasserdampfgehaltes durch die Erhöhung der Verdunstung.

Entsprechend wird die relative Luftfeuchtigkeit im Winter geringfügig abnehmen. Die Änderungsrate ist im Zeitraum 2021-2050 für beide Klimaszenarien sehr gering, im Zeitraum 2071-2100 ist die Änderung im RCP8.5 mit -1,3 % (-2,1 ... -0,6 %) etwas stärker ausgeprägt (Abb. 14). Eine Verringerung der winterlichen relativen Luftfeuchtigkeit dürfte eine geringere Neigung zu Nebel zur Folge haben.

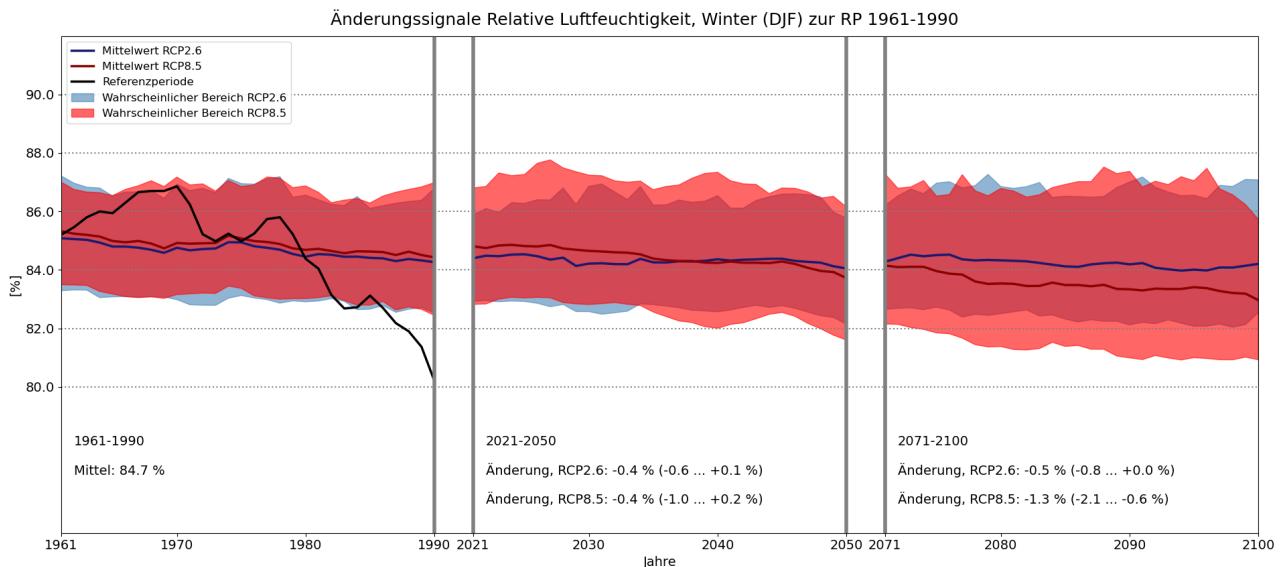


Abbildung 14: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der winterlichen mittleren relativen Luftfeuchtigkeit für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Für die Beurteilung der Änderungssignale der Luftfeuchtigkeit im Sommer ist die relative Luftfeuchtigkeit nicht das beste Maß. Besser geeignet zur Beurteilung der Änderung der Luftfeuchtigkeit ist die Taupunkttemperatur, die den Wert der Temperatur angibt, bei deren unterschreiten Kondensation eintritt. Je höher die Taupunkttemperatur, desto höher ist auch die absolute Luftfeuchtigkeit. Taupunkttemperaturen über 15 °C werden oft als schwül und

unangenehm empfunden, weshalb der Taupunkt auch für die Beurteilung der thermischen Belastung herangezogen werden kann.

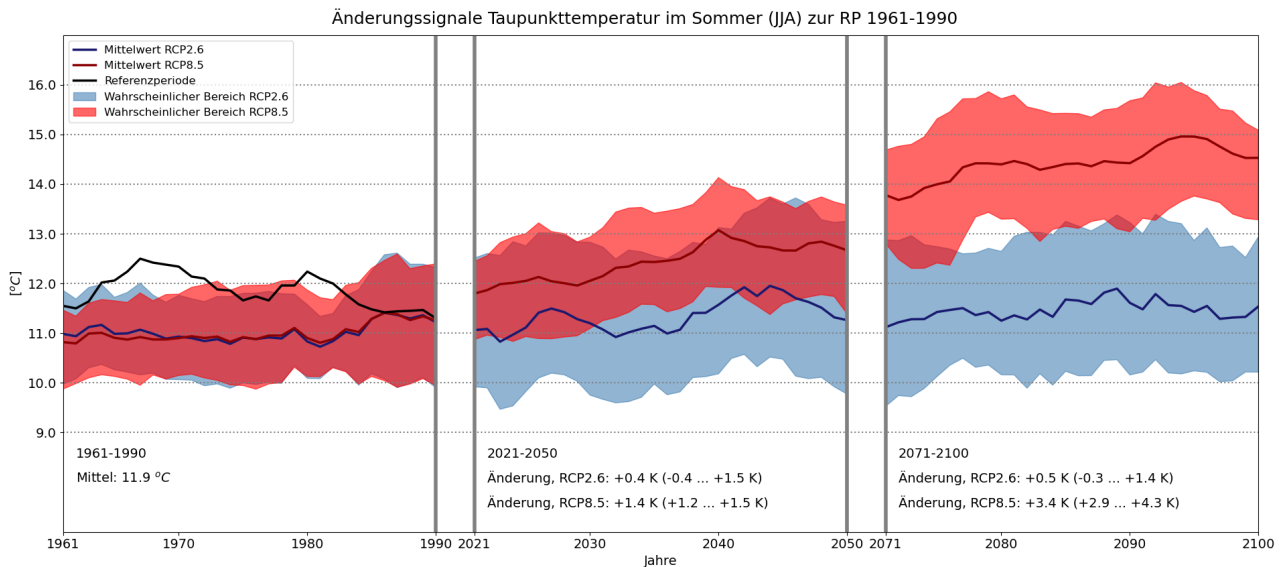


Abbildung 15: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren sommerlichen Taupunkttemperatur für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Wie in Abbildung 15 ersichtlich ist, wird unter den Bedingungen des RCP2.6 die Taupunkttemperatur nur geringfügig ansteigen, während der Anstieg im RCP8.5 bereits im Zeitraum von 2021-2050 deutlich größer ist. Die Projektionen des RCP2.6 zeigen einen Anstieg des mittleren sommerlichen Taupunktes um etwa +0,5 K (-0,4 ... +1,5 K). Dies ist kein robustes Änderungssignal, da die Höhe des Anstieges gering ist und nicht übereinstimmend von einer überwiegenden Mehrheit der Projektionen überhaupt ein Anstieg berechnet wird. Im RCP8.5 hingegen, steigt der Taupunkt im Zeitraum 2021-2050 zunächst um +1,4 K (+1,2 ... +1,5 K) gegenüber der Referenzperiode an, im Zeitraum 2071-2100 steigt der Taupunkt weiter auf +3,4 K (+2,9 ... +4,3 K) gegenüber der Referenzperiode an. Die Klimaprojektionen zeigen einen etwa -0,5 K geringeren Taupunkt in der Referenzperiode, was möglicherweise darauf hinweist, dass die Darstellung der Prozesse und Bedingungen in der bodennahen Schicht in den Klimaprojektionen nicht die tatsächlichen Bedingungen widerspiegelt. Der Anstieg des Taupunktes im RCP8.5 ist auf eine temperaturbedingt erhöhte Verdunstung zurückzuführen. Höhere Taupunkte verschärfen die thermischen Belastungen durch ansteigende Temperaturen zusätzlich. In der bodennahen Schicht der Atmosphäre steht mehr Energie für konvektive Wetterereignisse mit Unwettergefahr bereit, welche unter geeigneten Bedingungen freigesetzt werden könnte. Weshalb der Taupunkt im RCP2.6 deutlich weniger stark ansteigt als die Temperatur, ist aus den untersuchten Daten nicht ersichtlich. Möglicherweise unterscheiden sich die Muster der sommerlichen Zirkulation.

Windgeschwindigkeit

Die mittlere saisonale und jährliche Windgeschwindigkeit wird sich im Zuge des Klimawandels kaum verändern mit Ausnahme der winterlichen und sommerlichen Windgeschwindigkeit im RCP8.5 für den Zeitraum 2071-2100. Für das RCP8.5 liegen im Zeitraum 2071-2100 robuste Änderungssignale zu etwas windigeren Wintern und weniger windigen Sommern vor. In Abbildung 16 sind Änderungen der mittleren winterlichen Windgeschwindigkeit dargestellt. Im RCP2.6 ist wie bereits erwähnt keine wesentliche Änderung erkennbar, während im RCP8.5 eine Erhöhung von $+0,1 \text{ ms}^{-1}$ ($0,0 \dots +0,21 \text{ ms}^{-1}$) im Zeitraum 2021-2050 und eine Erhöhung von $+0,21 \text{ ms}^{-1}$ ($+0,01 \dots +0,32 \text{ ms}^{-1}$) gegenüber der Referenzperiode projiziert wird.

Die Ursache für diese Änderungen der Windgeschwindigkeit im RCP8.5 muss in der Änderung der Zirkulation begründet sein. Sie sind nicht konsistent mit der Erkenntnis, dass die Zugbahnen der atlantischen Tiefdruckgebiete nach Norden verschoben werden. Möglicherweise ist durch die bodennahe Erwärmung und in der Folge weniger starken Abkopplung bodennaher Schichten der Troposphäre, die Neigung zu Inversionswetterlagen geringer. Solche Vermutungen müssen durch weitere Untersuchungen überprüft werden. Die Zunahme der Windgeschwindigkeit könnte möglicherweise durch intensivere Winterstürme hervorgerufen werden, welche große Schäden anrichten würden. Die Abnahme der Windgeschwindigkeit im Sommer unter den Bedingungen des RCP8.5 ist konsistent mit der Nordwärtsverlagerung der subtropischen Hochdruckzelle und der damit verbundenen Abnahme des Auftretens von windreichen Wetterlagen im Sommer. Aus meteorologischer Sicht können ruhige und großräumig windarme Wetterlagen im Sommer ein großes Gefahrenpotential für lokale Starkregenfälle aufweisen, die möglicherweise nicht von den Klimaprojektionen erkannt werden.

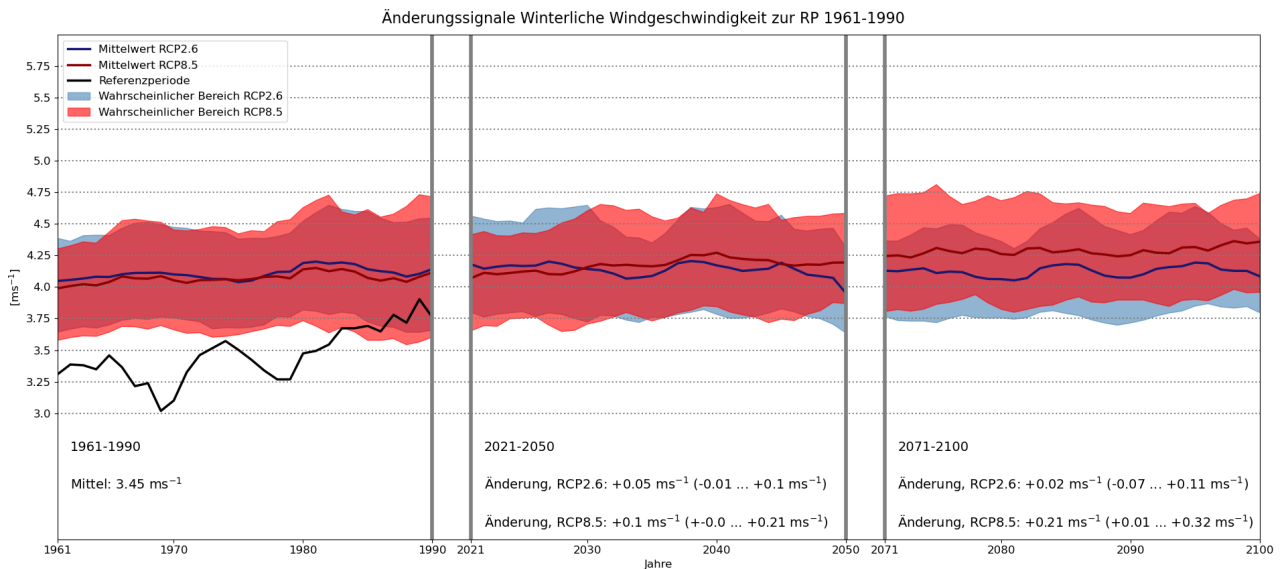


Abbildung 16: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren winterlichen Windgeschwindigkeit für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Einstrahlung

Für die jährliche mittlere Solarstrahlung wird im RCP2.6 keine wesentliche Änderung projiziert, während im RCP8.5 ein Anstieg von $+4 \text{ Wm}^{-2}$ ($-1 \dots +14 \text{ Wm}^{-2}$) stattfindet bis zum Zeitraum 2021-2050 und ein Anstieg von $+6 \text{ Wm}^{-2}$ ($-2 \dots +26 \text{ Wm}^{-2}$) gegenüber der Referenzperiode bis zum Zeitraum 2071-2100 (Abb. 17). Die große Streuung der Änderungssignale ist bemerkenswert.

Der Anstieg der jährlichen Solarstrahlung im RCP8.5 erfolgt durch die Änderungen im Sommer, während die Änderungssignale in allen anderen Jahreszeiten nicht robust sind. In Abbildung 18 sind die sommerlichen Änderungssignale der Solarstrahlung dargestellt. Auch für das RCP2.6 wird eine Zunahme von etwa $+4$ bzw. $+3 \text{ Wm}^{-2}$ ($-1 \dots +8 \text{ Wm}^{-2}$) für beide Zukunftszeiträume projiziert, die ebenfalls robust ist. Die Robustheit dieses Änderungssignals verliert sich bei jährlicher Betrachtung aufgrund der geringen Höhe des Änderungssignals. Im RCP8.5 nimmt die Solarstrahlung um $+10 \text{ Wm}^{-2}$ ($-1 \dots +22 \text{ Wm}^{-2}$) oder etwa $+5 \%$ bis zum Zeitraum 2021-2050 zu. Im Zeitraum 2071-2100 liegt die sommerliche Solarstrahlung im RCP8.5 um $+17 \text{ Wm}^{-2}$ ($0 \dots +48 \text{ Wm}^{-2}$) über den Werten der Referenzperiode.

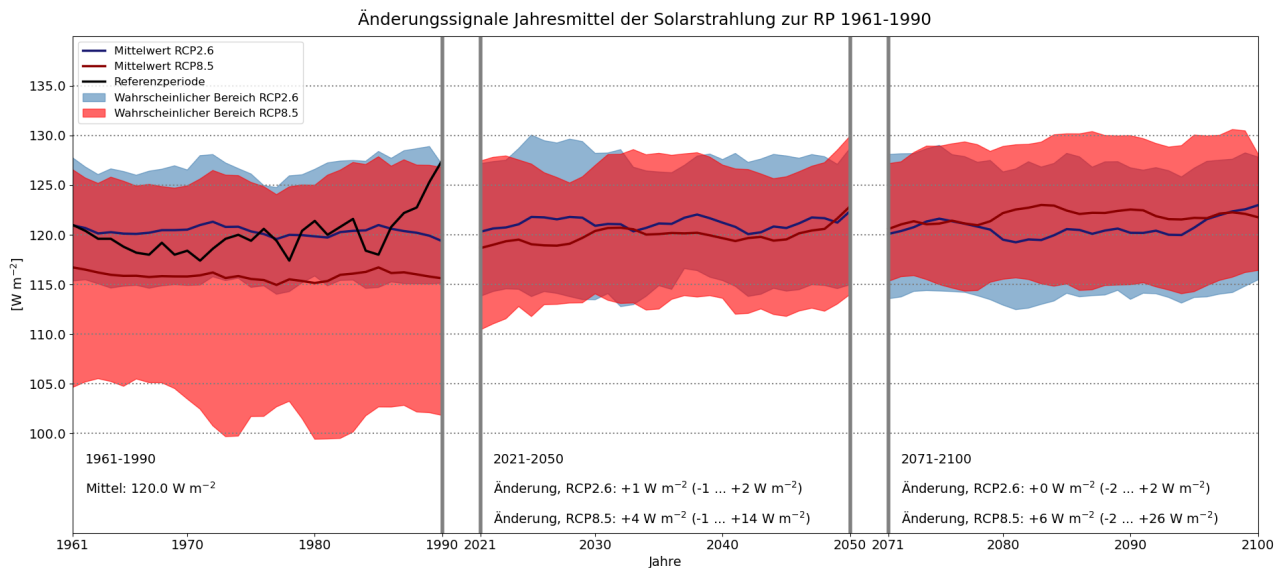


Abbildung 17: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren jährlichen Solarstrahlung für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

Die deutliche Erhöhung der Solarstrahlung im Sommer lässt sich auf eine höhere Sonnenscheindauer bzw. einen geringeren Bedeckungsgrad zurückführen, da sich die an der Obergrenze der Erdatmosphäre eintreffende Solarstrahlung innerhalb von 140 Jahren nicht wesentlich ändert. Eine solche Änderung der Bewölkungsverhältnisse ist wahrscheinlich auf die Nordwärtsverschiebung der Druckgebilde im Sommerhalbjahr zurückzuführen, die zu ansteigender Häufigkeit von Hochdruckperioden über Sachsen-Anhalt führen dürften. Diese Überlegungen müssen durch weitere Forschungsarbeiten bestätigt werden, auch weil Änderungen möglicherweise weitreichende Konsequenzen haben könnten, wie z.B. eine deutliche Änderung des üblichen Niederschlagsregimes.

Die Änderungssignale der Solarstrahlung sind mit großen Unsicherheiten versehen, weil eine Vielzahl von Annahmen zur Berechnung in die Klimamodelle einfließen (Hübener, et al., 2017). Die in dieser Studie festgestellten Signale sind konsistent mit den Ergebnissen weiterer Arbeiten zur Änderung der Zirkulation in Mitteleuropa und einer Zunahme des Einflusses von subtropischen Hochdruckgebieten im Sommerhalbjahr (Cherchi, et al., 2018).

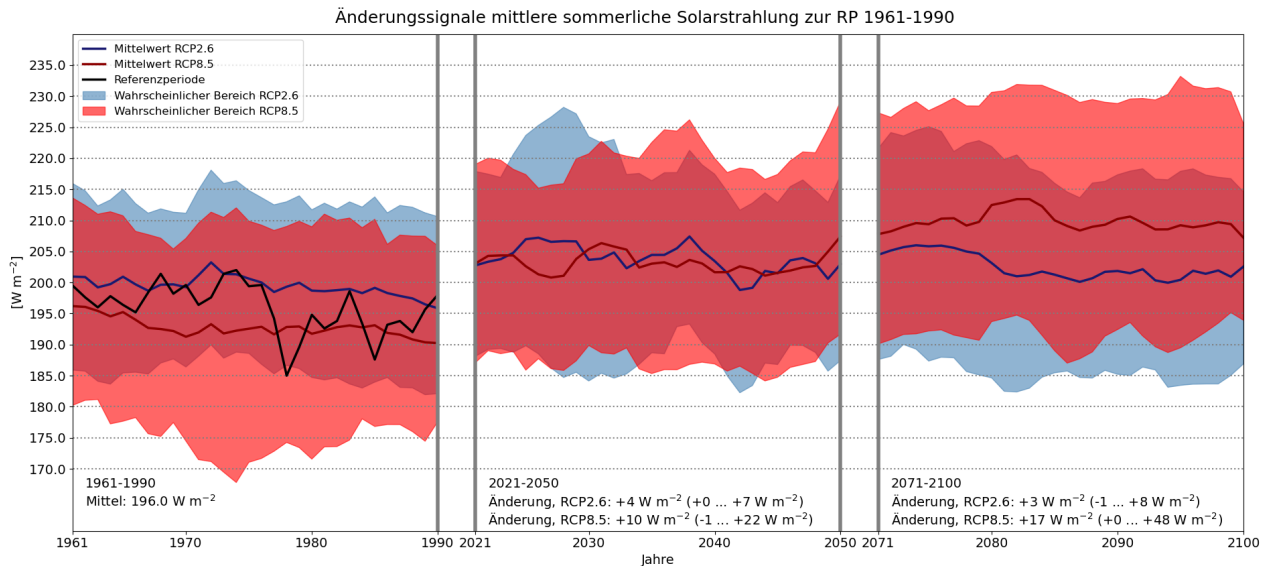


Abbildung 18: Verlauf des 5-jährigen gleitenden Mittels der mittleren sommerlichen Solarstrahlung für das Referenzensemble. Dargestellt ist das Landesmittel Sachsen-Anhalts der HYRAS-Daten (schwarz, nur von 1961-1990), des RCP2.6 (blau) und des RCP8.5 (rot). Für die Klimaprojektionen sind der Mittelwert und der wahrscheinliche Bereich dargestellt.

6. Ausblick und Zusammenfassung

Der Klimawandel wird in Sachsen-Anhalt stark spürbar sein, unabhängig vom betrachteten Klimaszenario. Das Eintreten des RCP2.6 wird als relativ unwahrscheinlich angesehen, da es von massiven globalen Anstrengungen zum Klimaschutz ausgeht, welche jedoch nicht in dem von diesem Szenario festgelegten Maße voranschreiten. Aufgrund der Tatsache, dass Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden, ist auch ein Eintreten des RCP8.5 als relativ unwahrscheinlich anzusehen. Dennoch besteht Unsicherheit, ob sich die zukünftigen Klimaänderungen zwischen den beiden betrachteten Szenarien abspielen. Die heutigen Klimamodelle berücksichtigen zum Beispiel Prozesse wie das Freisetzen von Methanvorräten in Land- und Meeresböden als Folge der Erwärmung noch nicht hinreichend.

Der vorliegende Synthesebericht bietet eine wichtige Datengrundlage für weitere Arbeiten zur Abschätzung und Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Ergänzende klimawissenschaftliche Forschungsarbeiten werden empfohlen, um zum Beispiel Änderungen von Extremereignissen wie Starkregenfälle besser darzustellen. Im Folgenden soll auf einige weitere Arbeiten eingegangen werden, die empfehlenswert erscheinen. Dabei handelt es sich um die Begutachtung und Quantifizierung der Änderungssignale bezüglich extremer Wetterereignisse. Daran anschließend werden die Ergebnisse der Studie zusammengefasst, um einen schnellen Überblick über die wesentlichen Punkte zu bekommen.

Ausblick – Weitere Analysen zum Klimawandel

Da in diesem Projekt eine Reihe an Klimakenngrößen auf der Grundlage von Tageswerten ausgewertet wurden und der Fokus der Betrachtung auf der Änderung des mittleren Klimazustandes liegt, ist es empfehlenswert, weitere Forschungsarbeiten auf der geschaffenen Datengrundlage durchzuführen mit einem Fokus auf außergewöhnliche und schadensträchtige Wettererscheinungen. Außerdem ist im Rahmen einer solchen Forschungsarbeit die Untersuchung der Änderungen der Zirkulation sowie der Lage und Zugbahnen der für Sachsen-Anhalts Klima relevanten Druckgebilde von Interesse. Extreme bzw. schadensträchtige Wetterereignisse gehen aus markanten Wetterlagen hervor, weshalb eine Untersuchung der Häufigkeit und Eigenschaften der Wetterlagen wichtige Informationen über das Auftreten extremer Wetterlagen liefern kann. Für Sachsen-Anhalt sind aus unserer Sicht folgende extreme oder schadensträchtige Wetterlagen von Bedeutung:

- **Dauerregen**

Lang anhaltende, ergiebige Regenfälle können zu jeder Jahreszeit auftreten. Für Sachsen-Anhalt lassen sich solche Ereignisse oftmals auf bestimmte Wetterlagen zurückführen.

- **Starkregen**

Kurzzeitige Starkregenfälle können örtlich eng begrenzt oder auf größerer Fläche auftreten und stehen oftmals im Zusammenhang mit sommerlichen Gewitterlagen. Die Arbeiten in diesem Projekt zeigen, dass die Möglichkeit besteht, dass Starkregenfälle als Folge des Klimawandels intensiver ausfallen. Für eine genauere Aussage ist eine feinskaligere Betrachtung und gegebenenfalls eine Modellierung zu empfehlen, ähnlich zur Methodik in (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017).

- **Hitzewellen**

Hitzewellen entstehen durch anhaltende Zufuhr warmer Luftmassen im Sommer. Eine deutliche Zunahme von Intensität, Länge und Häufigkeit von Hitzewellen ist im Zuge des Klimawandels zu erwarten. Die Arbeiten in diesem Projekt haben dies bereits gezeigt, jedoch sind besonders langanhaltende Hitzewellen sehr schadensträchtig und eine Abschätzung, ob solche Ereignisse häufiger auftreten werden, kann aufgrund des gewählten Untersuchungsansatzes nicht präzisiert werden. Daher wird empfohlen, eine statistische Extremwertbetrachtung der Daten der Klimaprojektionen durchzuführen, welche zur Beantwortung weiterer Fragen bezüglich des Auftretens von Hitzewellen herangezogen werden kann.

- **Schneefälle**

Schneefälle treten meistens durch Aufgleiten wärmerer Luft auf kältere Luftmassen auf. In Sachsen-Anhalt gehören Schneefälle zum normalen Spektrum an Wettererscheinungen. Schneefall kann zu Beeinträchtigungen führen und ist ein wichtiger Faktor im Tourismus ebenso wie das Schmelzwasser im Frühjahr für die Trinkwasserversorgung durch Talsperren. Die vorliegende Studie hat Schneefälle nicht explizit untersucht, jedoch dürfte eine Abnahme der Neuschneesumme aufgrund der Erwärmung wahrscheinlich sein. Es ist auch möglich, dass die Kombination von höherer Feuchte in seltenen Fällen zu stärkeren Schneefällen führen.

- **Eis-/Gefrierender Regen**

Wenn Niederschläge in flüssiger Form auf gefrorene Böden treffen, kommt es zu gefrierendem Regen, der zu erheblichen Verkehrsbehinderungen und Verletzungsgefahren führt. Üblicherweise ist gefrierender Regen an eine starke Luftmassengrenze oder Warmfront nach einer Frostperiode gekoppelt. Ob solche Wetterlagen zukünftig seltener oder häufiger vorkommen, wurde in diesem Projekt nicht untersucht. Es kann davon

ausgegangen werden, dass aufgrund der höheren Temperaturen die Voraussetzungen für gefrierenden Regen seltener erfüllt sein werden.

- **Tornados und Gewitterböen**

Die hohen Windgeschwindigkeiten durch Tornados und kleinräumige Fallböen im Umfeld von starken konvektiven Erscheinungen sind an starke Windscherung und labile Luftschichtungen und spezielle Bedingungen und Wetterlagen gebunden. Sie sind hauptsächlich Erscheinungen des Sommerhalbjahres und können erheblichen Schaden anrichten. Welche Änderungen in Bezug auf diese Wettererscheinungen im Zuge des Klimawandels auftreten, ist im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht worden. Deshalb ist es empfehlenswert, die vertikale Schichtung inklusive der großräumigen Bedingungen der Windscherung der Atmosphäre in den Klimaprojektionen zu untersuchen.

- **Hagelunwetter**

Hagel ist eine sommerliche Wettererscheinung, die an besondere Bedingungen gebunden ist. Hagel tritt oftmals dann auf, wenn in der mittleren Troposphäre eine trockene Schicht eingelagert ist, die dazu führt, dass Kühlraten durch Verdunstung und Aufwinde besonders stark werden, sodass große Hagelkörner entstehen können. Ob mehr oder weniger, stärkere oder schwächere Hagelereignisse im Zuge des Klimawandels zu erwarten sind, kann nicht mit den Ergebnissen dieser Studie beantwortet werden. Auch hierfür sind Untersuchungen der vertikalen Schichtung einer Luftmasse z.B. mithilfe der Auswertung von Konvektionsindizes als hilfreich einzustufen.

- **Staubstürme**

Durch Windböen aufgewirbelter Staub wird bei trockenen Böden bereits bei geringeren Windgeschwindigkeiten abgetragen. Die Erwärmung wird durch verstärkte potentielle Verdunstungsraten zu einer rascheren Austrocknung von Böden führen, sodass Staubverwehungen im Zuge des Klimawandels häufiger auftreten könnten.

- **Nebel**

Sichtbehinderung und Eisansatz können bei Nebel zu Behinderungen und Schäden führen. Nebel ist an hohe relative Luftfeuchtigkeit und schwache Winde gekoppelt und tritt am häufigsten unter winterlichen Hochdruckwetterlagen auf. Aus der in diesem Projekt durchgeführten Untersuchung ist abzuleiten, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Winter wahrscheinlich leicht abnimmt und die Windgeschwindigkeit wahrscheinlich geringfügig zunimmt, was die Bedingung für Nebelbildung erschweren dürfte. Ob dies durch eine geringere Anzahl an günstigen Tagen oder eine Verschiebung des Zustandes an ungünstigen Tagen auftritt, ist nicht Bestandteil dieser Untersuchung, sodass es aus

unserer Sicht empfehlenswert ist, die Bedingungen für Nebel in einer weiteren Studie, die auf der in diesem Projekt geschaffenen Datenbasis aufbaut, zu untersuchen.

- **Sturmereignisse**

Starke Winde treten oftmals im Zusammenhang mit stark ausgeprägten winterlichen Tiefdruckgebieten auf und vornehmlich im Umfeld der Fronten dieser Tiefdruckgebiete. In dieser Studie ist ermittelt worden, dass unter den Bedingungen des RCP8.5 die mittlere Windgeschwindigkeit im Winter möglicherweise etwas zunimmt. Ob dies im Zusammenhang steht mit stärkeren oder häufigeren Stürmen, ist nicht abzuschätzen, ohne dass weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

- **Dürreperioden**

Perioden mit geringen Niederschlagsmengen werden im Zuge des Klimawandels häufiger auftreten und in Kombination mit einem Absinken des Grundwasserspiegels sind Dürreperioden unausweichlich, insbesondere wenn auch der steigende Wasserbedarf der Vegetation durch die längere Vegetationsperiode berücksichtigt wird. Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen, dass Perioden mit zusammenhängenden Trockentagen bei gleichzeitig höherer potentieller Verdunstung an Häufigkeit zunehmen werden.

- **Spätfröste**

Spätfröste treten dann auf, wenn die Vegetationsperiode ungewöhnlich früh beginnt und im Anschluss ein Kälteeinbruch für Fröste sorgt. Im Zuge des Klimawandels ist mit einer größeren Häufigkeit von Spätfrösten zu rechnen, da zum einen der Beginn der Vegetationsperiode früher eintritt, und zum anderen der Temperaturanstieg im Frühling am geringsten ausfällt. Außerdem fällt die Erwärmung der Minimumtemperaturen am wenigsten stark aus, sodass Fröste im Frühling immer noch auftreten werden.

Insgesamt gibt die vorliegende Arbeit einen detaillierten Überblick über die Änderung des mittleren Klimazustandes in Sachsen-Anhalt. Zusätzlich sind weitere Forschungsarbeiten zur Untersuchung der oben aufgeführten Extremerscheinungen empfehlenswert. Dazu könnten unterschiedliche Ansätze kombiniert werden, indem sowohl die Änderungen der Zirkulation, der Wetterlagen und die Änderungen der vertikalen Schichtung ausgewertet werden. Es wird eine meteorologische und klimatologische Begutachtung der Bedingungen für Extremwetterereignisse unter Durchführung von statistischer Modellierung als grundlegende Methodik für eine solche Untersuchung empfohlen. Auf diese Weise können verschiedene Aspekte von Extremwetter sowohl qualitativ als auch quantitativ ausgewertet werden, ohne dass zeitaufwendige numerische Simulationen durchgeführt werden müssen.

Zusammenfassung

Tabelle 4: Die bedeutendsten Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt: Änderungssignale des Mitteldeutschen Referenzensembles für Klimakenngrößen gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Die Klimakennwerte sind Gebietsmittel des Landes Sachsen-Anhalt und für das RCP2.6 und das RCP8.5 in den Zeiträumen 2021-2050 sowie 2071-2100 ausgewertet.

Klimakenngröße	RCP2.6 2021-2050	RCP8.5 2021-2050	RCP2.6 2071-2100	RCP8.5 2071-2100
Mittelwert und wahrscheinliche Bandbreite				
T _{mit} , Jahresmittel	+1,5 K (+1,1 ... +2,1 K)	+1,9 K (+1,5 ... +2,4 K)	+1,6 K (+1,1 ... +2,2 K)	+4,2 K (+3,2 ... +5,2 K)
Anzahl der jährlichen Hitzetage, T _{max} ≥ 30 °C	+8 (+3 ... +13)	+9 (+4 ... +18)	+8 (+4 ... +14)	+32 (+17 ... +60)
Länge der thermischen Vegetationsperiode	+28 Tage (+20 ... +39 Tage)	+35 Tage (+26 ... +41 Tage)	+29 Tage (+22 ... +35 Tage)	+75 Tage (+70 ... +84 Tage)
Winterliche, mittlere Windgeschwindigkeit	+0,05 m s⁻¹ (-0,01 ... +0,10 m s ⁻¹)	+0,10 m s⁻¹ (-0,02 ... +0,21 m s ⁻¹)	+0,02 m s⁻¹ (-0,07 ... +0,11 m s ⁻¹)	+0,21 m s⁻¹ (-0,01 ... +0,32 m s ⁻¹)
Winterniederschlag	+11 mm (+5 ... +18 mm)	+15 mm (+4 ... +26 mm)	+10 mm (+2 ... +14 mm)	+28 mm (+14 ... +36 mm)
Sommerniederschlag	-10 mm (-23 ... +4 mm)	-11 mm (-28 ... +6 mm)	-7 mm (-22 ... +10 mm)	-31 mm (-64 ... +8 mm)
Starke Niederschlagsmenge	+3 mm (-3 ... +10 mm)	+8 mm (-2 ... +19 mm)	+3 mm (-4 ... +12 mm)	+17 mm (-6 ... +37 mm)
Anzahl von Perioden mit mindestens 10 Trockentagen (P < 1 mm)	+1 (-1 ... +2)	+1 (-0 ... +3)	+1 (-1 ... +3)	+5 (+0 ... +8)
Jahressaldo Klimatische Wasserbilanz	-34 mm (-79 ... +13 mm)	-44 mm (-118 ... +24 mm)	-38 mm (-77 ... +9 mm)	-128 mm (-258 ... -12 mm)

Sommerliche, mittlere Solarstrahlung	+4 W m⁻² (+0 ... +7 W m ⁻²)	+10 W m⁻² (-1 ... +22 W m ⁻²)	+3 W m⁻² (-1 ... +8 W m ⁻²)	+17 W m⁻² (+0 ... +48 W m ⁻²)
Sommerliche, mittlere Taupunkttemperatur	+0,4 K (-0,4 ... +1,5 K)	+1,4K (+1,2 ... +1,5 K)	+0,5 K (-0,3 ... +1,4 K)	+3,4 K (+2,9 ... 4,3 K)

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit sind:

- **Das Klima in Sachsen-Anhalt wird deutlich wärmer.**

Die Temperaturen werden weiter ansteigen und die Temperaturänderung gegenüber der Referenzperiode beträgt +1,5 K (+1,1 ... +2,2 K) im RCP2.6 und +1,9 K (+1,5 ... +2,4 K) im RCP8.5 für den Zeitraum 2021-2050. Für den Zeitraum 2071-2100 beträgt die Temperaturänderung +4,2 K (+3,2 - +5,2 K) im RCP8.5 während im RCP2.6 kein wesentlicher Anstieg mehr stattfindet und das Änderungssignal +1,6 K (+1,1 ... +2,2 K) beträgt. Die Hitzebelastung und die Temperaturhöchstwerte werden deutlich zunehmen, im RCP8.5 nimmt die Anzahl der Hitzetage bis zum Zeitraum 2017-2100 wahrscheinlich um etwa 32 (+17 ... +59) Tage im Vergleich mit der Referenzperiode zu, während die Anzahl der Eistage um -22 (-23 ... -20) Tage zurückgeht, was einem Rückgang von etwa 85 % entspricht. Der Sommer wird sich um etwa 0,2 bis 0,4 K stärker erwärmen als das Jahresmittel, während der Frühling eine um den gleichen Betrag geringere Erwärmung erfährt. Die Tageshöchstwerte steigen um etwa 0,5 K stärker an als die Tiefstwerte.

- **Hitzewellen werden zunehmen.**

Die Anzahl der Sommer- und Hitzetage wird erheblich zunehmen, insbesondere unter den Voraussetzungen des RCP8.5. Auch die Länge der zusammenhängenden Hitzetage und die höchsten jährlichen Temperaturen, also die Intensität der Hitzewellen, werden zunehmen. Die Marke von 40 °C dürfte im Zuge des Klimawandels häufiger (bzw. in Sachsen-Anhalt erstmalig) erreicht und überschritten werden.

- **Der Jahresniederschlag ändert sich kaum, aber die jahreszeitliche Verteilung wird sich verändern.**

Der Jahresniederschlag wird sich wahrscheinlich nicht wesentlich ändern, eine geringe Zunahme von unter 5 % ist am wahrscheinlichsten. Die Änderungssignale des Jahresniederschlages sind nicht robust, da sie deutlich weniger groß sind als die jährliche

Variabilität der Niederschlagsmengen. Die jahreszeitliche Verteilung des Niederschlags wird sich unter den Voraussetzungen des RCP2.6 geringfügig und im Falle des RCP8.5 deutlich ändern. Im Winter werden die Niederschläge etwas zunehmen, während sie im Sommer wahrscheinlich etwas zurückgehen. Im RCP2.6 sind diese Änderungssignale weniger robust und auch schwächer als im RCP8.5.

- **Das Jahressaldo der Klimatischen Wasserbilanz wird abnehmen.**

Die bereits in weiten Teilen des Landes negative klimatische Wasserbilanz wird weiter in Richtung eines Defizits verschoben werden, besonders stark im RCP8.5. Dies wird zum einen durch die erhöhte potentielle Verdunstung hervorgerufen, aber auch weil im Sommerhalbjahr die Niederschläge deutlich abnehmen werden. Die Zunahme der Winterniederschläge wird teilweise durch die temperaturbedingte Zunahme der potentiellen Verdunstung kompensiert.

- **Starkregenfälle werden wahrscheinlich an Intensität zunehmen.**

Während eine robuste Veränderung der Häufigkeit von Starkregenfällen in dieser Untersuchung nicht gefunden werden konnte, wird die Intensität von Starkniederschlägen etwas zunehmen. Im Sommer werden die Niederschläge und die Niederschlagstage zwar abnehmen, aber die Intensität der Starkniederschläge nimmt zu.

- **Dürreperioden werden häufiger und intensiver auftreten**

Auch Dürreperioden werden zunehmen. Die Häufigkeit und Länge von trockenen Perioden wird im RCP8.5 erheblich und im RCP2.6 moderat zunehmen. Durch die erhöhten potentiellen Verdunstungsraten wird die Intensität der Dürreperioden deutlich zunehmen.

- **Die regionale Verteilung der Änderungssignale ist sehr einheitlich.**

In diesem Synthesebericht wird immer Bezug genommen auf das Landesmittel von Sachsen-Anhalt. Die regionale Verteilung der Änderungssignale ist sehr einheitlich. Dies kann im Endbericht zum Projekt nachgelesen werden. Wesentliche regionale Unterschiede ergeben sich in keiner Klimakenngröße, die Höhenlage des Harzes nimmt jedoch Einfluss auf die Geschwindigkeit und Intensität der Änderung, wenn Klimakengrößen betrachtet werden, die durch fixe Schwellwerte definiert werden. So nimmt die Anzahl der Hitzetage im Oberharz zunächst kaum zu, steigt bis zum Jahr 2100 unter den Bedingungen des RCP8.5 jedoch sprunghaft an.

- **Alle Änderungssignale sind im RCP8.5 deutlich stärker ausgeprägt als im RCP2.6.**

Das RCP2.6 zeichnet sich durch moderate Änderungssignale aus, die für den Parameter Niederschlag auch nur mäßig robust sind. Außerdem ändern sich die Klimakengrößen

zwischen den Perioden von 2021-2050 und 2071-2100 nicht wesentlich. Im RCP8.5 sind die Änderungssignale zur Referenzperiode 1961-1990 bereits im Zeitraum 2021-2050 etwas stärker ausgeprägt. Bis zum Zeitraum 2071-2100 verstärken sich die Änderungssignale noch erheblich und die Rate der Änderung ist vielfach stärker von der nahen bis zur fernen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode bis zur nahen Zukunft. Der Klimawandel verschärft und beschleunigt sich also im RCP8.5. Die beiden Klimaszenarien stellen die extremsten anzunehmenden Szenarien dar, es ist sehr wahrscheinlich, dass die tatsächliche Änderung des Klimazustandes zwischen den beiden Szenarien liegen wird. Dadurch, dass viele der derzeitigen Klimamodelle Rückkopplungsprozesse wie die Freisetzung von Methangasvorräten durch Tauprozesse und die Änderung der Aufnahmekapazität der Meere und Böden für Treibhausgase nicht hinreichend berücksichtigen können, ist es jedoch möglich, dass sich in nächster Zeit neue Erkenntnisse zum Klimawandel ergeben könnten. Möglicherweise ist dann von stärkeren Änderungen auszugehen, selbst unter Berücksichtigung von Klimaschutzmaßnahmen.

Die vorliegende Studie liefert als Datengrundlage für weitere Wirkmodellierungen einen wertvollen Beitrag zur Simulation des Bedarfs von Maßnahmen zur Klimaanpassung in Sachsen-Anhalt. Mit den Ergebnissen dieser Studie werden die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Änderung des mittleren Klimazustandes in Sachsen-Anhalt deutlich sichtbar gemacht. Neben einer eindeutigen Erwärmung ist eine Umverteilung der Niederschläge von den Sommermonaten in den Winter zu erwarten. Hitze- und Trockenperioden werden wahrscheinlich an Intensität und Häufigkeit zunehmen. Die in dieser Studie betrachteten Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 sind wahrscheinlich die unteren bzw. oberen Grenzwerte dessen, was im Zuge des Klimawandels tatsächlich bis in das Jahr 2100 in Sachsen-Anhalt passieren kann.

Literaturverzeichnis

- Ahrens, B., Herzog, S., Brisson, E., & Purr, C. (2017). *Abschlussbericht zum Projekt: Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Sachsen-Anhalt*. Fachpublikationen, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- Cherchi, A., Ambrizzi, T., Behera, S., Freitas, A. C., Morioka, Y., & Zhou, T. (2018). The response of subtropical highs to climate change. *Current Climate Change Reports*, S. 371-382.
- Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., & Walter, A. (2018). A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 3, S. 477-491.
- Hamkerns, H., Spellmann, H., Nagel, R. V., & Buresch, M. (2020). *Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen Anhalt*. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen Anhalt.
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., . . . Radtke, K. (2017). *Reklies De Ergebnisbericht*.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., . . . Georgievski, G. (2014). EURO CORDEX: new high resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 2, S. 563-578.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2012). *Durchführung einer Untersuchung zu den Folgendes Klimawandels in Sachsen - Anhalt. Teilbericht Los 1.1 und 1.2: Klima und Extreme*. Halle (Saale): Fachpublikationen, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des LAU.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., . . . Kram, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 7282, S. 747-756.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., . . . Dasgupta, P. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*.
- Pfützner, B., Klöcking, B., Schumann, A., & Hesse, P. (2013). *Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen Anhalt. Teilbericht Los 1.3: Wasser*. Halle (Saale): Fachpublikationen, Büro für Angewandte Hydrologie (BAH) im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des LAU.
- Quintero, I., & Wiens, J. J. (2013). Rates of projected climate change dramatically exceed past rates of climatic niche evolution among vertebrate species. *Ecology letters*, S. 1095-1103.

- Spekat, A., Einnfalt, T., & Jackisch, A. (2016). *Klimaanalyse Sachsen Anhalt für den Zeitraum 1951-2014 auf Basis von Beobachtungsdaten*. Halle (Saale): Fachpublikationen des LAU, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH und hydro & meteo GmbH & Co KG im Auftrag des LAU.
- Struve, S., Ehlert, I., Pfannenschmidt, K., Heyner, F., Franke, J., Kronenberg, R., & Eichhorn, M. (2020). *Mitteldeutsches Kernensemble (MDK) zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten*. Landesamt für Umweltschutz Sachsen Anhalt (LAU) Fachgebiet Klima, Erneuerbare Energie, Nachhaltigkeit, Umweltallianz, Geschäftsstelle AG Klima.
- Unglaube, M., & Wollmert, A. (2020). *Klimawandel in Sachsen Anhalt: Monitoringbericht 2020*. Fachpublikationen LAU, AG Klima, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt.